

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

*Сборник тезисов докладов  
V Международной научно-технической конференции*



**«Пути совершенствования технологических  
процессов и оборудования  
промышленного производства»**

**15 октября 2020 года**  
*Алчевск*

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

КАФЕДРА МАШИН МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Сборник материалов

V международной научно-технической конференции

15 октября 2020 г.

Алчевск, 2020

**Редакционная коллегия**

- Куберский С. В. — канд. техн. наук, проф. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Мокрицкий М. И. — и. о. заместителя управляющего (ЗАО «ВНЕШТОГСЕРВИС»)  
Пяткова Н. П. — канд. экон. наук, глава администрации г. Алчевска ЛНР  
Рябичев В. Д. — д-р техн. наук, проф. (ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)  
Зинченко А. М. — канд. экон. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Вишневецкий Д. А. — канд. техн. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Гутько Ю. И. — д-р техн. наук, проф. (ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)  
Еронько С. П. — д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)  
Корнеев С. В. — д-р техн. наук, проф. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Сотников А. Л. — д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)  
Жильцов А. П. — канд. техн. наук, доц. (ЛГТУ, г. Липецк, РФ)  
Изюмов Ю. В. — канд. техн. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Денищенко П. Н. — канд. техн. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Князьков О. В. — канд. техн. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Харламов Ю. А. — д-р техн. наук, проф. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)  
Чебан В. Г. — канд. техн. наук, доц. (ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

*Рекомендовано Ученым советом ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»  
(Протокол № 4 от 27.11.2020)*

**Пути совершенствования** технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник материалов V международной научно-технической конференции (15 октября 2020 г.). — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. — 195 с.

Настоящий сборник содержит тезисы докладов преподавателей, научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений, работников промышленных предприятий, представленных на V международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства». В сборник вошли материалы конференции, освещающие проблемы и новейшие технологии металлургического и горного оборудования, обработки металлов давлением, гидравлических машин, технологии машиностроения, охраны труда и экологии в машиностроении. Сборник адресован научным работникам, преподавателям, аспирантам, студентам, работникам промышленных предприятий, а также всем интересующимся проблемами в данных областях.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	7
<b>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Ковалева О. А., Ткачев М. Ю.</b> Изучение условий формирования очага деформации в зоне реза трубы клиновым ножом.....	7
<b>Еронько С. П., Ткачев М. Ю., Понамарёва Е. А., Цыхмистро Е. С.</b> Теоретическое и модельное исследования прочностных параметров перемычки, образующейся на входе в канал ковшового затвора.....	11
<b>Бабак К. Ю.</b> Мерные шаблоны для радиографического контроля опасных производственных объектов.....	15
<b>Мороз В. В., Долгих В. П., Левченко Э. П., Мальков С. Л.</b> Исследования полей напряжений зуба звездочки ротора одновалковой зубчатой дробилки.....	18
<b>Мележик Р. С., Власенко Д. А.</b> К вопросу исследования динамики валковой дробилки.....	22
<b>Левченко Э. П.</b> Основные направления использования накопительного энергетического эффекта при диспергировании материалов.....	25
<b>Власенко Д. А.</b> Способ определения мощности привода валковых дробилок с гладкими валками.....	28
<b>Петров П. А., Подгорный В. Ю.</b> Исследование динамических нагрузок в приводе рабочих клеток.....	31
<b>Петров П. А., Подгорный В. Ю.</b> Методы повышения стойкости роликов МНЛЗ.....	33
<b>Вишневский Д. А., Бондарь Н. А., Сотников А. Л.</b> Надежность человека-оператора в системе «Человек-машина».....	35
<b>Ткачев М. Ю., Стребиж Н. В.</b> Обоснование использования упругих (пружинных) гаек в узлах механизмов и машин.....	37
<b>Бревнов А. А., Бревнова О. В., Левченко Э. П.</b> Улучшение начальных условий движения материала на входном участке центробежно-ударной дробильно-измельчительной машины.....	40
<b>Павлиненко О. И., Левченко Э. П., Куценко Е. В.</b> Эффективное направление получения абразивного стального материала в роторно- ударном измельчителе.....	44
<b>Жильцов А. П., Харитоненко А. А., Кузьмин А. Ю.</b> Повышение производственно-технологических показателей оборудования для подготовки и подачи материалов на колошник доменной печи.....	47
<b>Жильцов А. П., Челядина А. Л., Соколов Д. С., Костылев Д. Е.</b> Применение мобильных систем при реализации технического обслуживания и ремонт прокатного комплекса.....	51
<b>Козачишен В. А., Изюмов Ю. В., Козачишена Е. С.</b> Система мониторинга опор проходной роликовой печи стана 600.....	54
СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	57
<b>Медведчук С. А., Гутько Ю. И., Слота Д. В.</b> Особенности конструирования литниковых систем для вакуумно-пленочной формовки.....	57

<b>Батышев К. А., Хованская В. А., Крымов И. А., Волотов И. В., Свинороев Ю. А.</b> Отливки из силуминов, полученные литьем с кристаллизацией под давлением – механические свойства и структура .....	58
<b>Батышев К. А., Демьянов Е. Д., Семенов К.Г., Хованская В.А., Гутько Ю. И.</b> Получение цинковых сплавов из низкосортного лома .....	60
<b>Батышев К. А., Демьянов Е. Д., Хованская В. А., Гутько Ю. И.</b> Получение вторичных алюминиевых сплавов их низкосортного сырья литейных цехов..	63
<b>Гутько Ю. И., Низмеев А. А.</b> Применение бойков с переменным углом заходного конуса для радиального обжатия ....	65
<b>Свинороев Ю. А., Гутько Ю. И., Батышев К. А., Семенов К. Г.</b> Использование литейных связующих на основе технического лигнина в литейном производстве.....	67
<b>Зинченко А. М., Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.</b> Пути повышения эффективности обработки глубоких отверстий.....	70
<b>Батышев К. А., Семенов К. Г., Ворончихин А. Д., Свинороев Ю. А., Гутько Ю. И.</b> Разработка технологии литья с кристаллизацией под давлением низколегированных сплавов меди с железом .....	74
<b>Денисова Н. А., Коробко В. С.</b> Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процесс резьбонарезания.....	77
<b>Желтобрюхова О. Е., Денисова Е. В.</b> Исследование эффективности применения пластического сверления для получения отверстий в тонкостенных заготовках.....	79
<b>Таровик А.Б., Сушили А.В.</b> Методика проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий .....	81
<b>Кучма С. Н., Стародубов С. Ю, Матвеева И. В.</b> Современные технологии удаления заусенцев .....	83
<b>Свинороев Ю. А., Гутько Ю. И., Батышев К. А., Семенов К. Г.</b> Экологический аспект при моделировании и разработке технологических процессов литья.....	86
<b>Георгиевский М. Г., Батышев К. А., Семенов К. Г., Свинороев, Ю.А., Зеркалов Г. Л.</b> Усовершенствование конструкций современных шестеренных гидромашин .....	89
<b>СЕКЦИЯ МЕТАЛЛУРГИИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>92</b>
<b>Куберский С. В., Федотов О. В., Стоцкая О. В., Завгородний С. Р.</b> Разработка физической модели промежуточного ковша МНЛЗ с электромагнитным перемешиванием расплава для использования в качестве имитаторов маловязких жидкостей .....	92
<b>Сотников А.Л., Стриченко С.М.</b> Современное состояние и пути развития технологии непрерывной разливки стали на МНЛЗ .....	95
<b>Роговский А. Н., Шипельников А. А.</b> К вопросу об эффективной технологии продувки аргоном в сталеразливочном ковше для гомогенизации и защиты от вторичного окисления стали.....	97
<b>Диментьев А. О., Должиков В. В.</b> Статистический анализ химических составов агломерационной шихты и агломерата ....	103
<b>Божанова Е. С.</b> Электрохимическое концентрирование металлов из разбавленных растворов с применением инверсионной вольтамперометрии.....	105

<b>Власенко Д. А.</b> Способ повышения степени однородности гранулометрического состава агломерата путем модернизации одновалковой дробилки .....	107
<b>Асламова Я. Ю.</b> Совершенствование технологии формирования слоя высокоофлюсованной шихты на агломерационной машине.....	110
<b>Воронько М. И., Проценко В. И., Проценко М. Ю.</b> Основная ценность кремнеземсодержащих материалов для дугового глубинного восстановления кремния .....	114
<b>Ткачев Р. Ю., Канчукова М. В.</b> Перспективы использования тепла отработанного шлака после доменного производства.....	118
<b>Куберский С. В., Романчук А. Н., Романчук Я. А., Стоцкая О. В.</b> Исследование массообменных процессов при пульсирующей подаче инертного газа в жидкий расплав сталеразливочного ковша .....	121
<b>СЕКЦИЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>124</b>
<b>Яковченко А. В., Снитко С. А., Денищенко П. П.</b> Самоцентрировка овального раската в круглом калибре .....	124
<b>Чичкан А. А., Луцкий М. Б.</b> Разработка энергосберегающих, унифицированных калибровок для прокатки швеллеров на стане 600 «ВТС» филиал №12 .....	127
<b>Рябичева Л. А., Дядичев В. В., Коробко Т. Б.</b> Влияние активных сил трения на процесс прямого выдавливания деталей с полостью ..	131
<b>Горецкий Ю. В., Денищенко П. Н., Осипенко А. А.</b> Исследование причин повышенной коррозии поверхности готового листового проката для труб класса прочности К56 в условиях толстолистового стана 3000 филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» .....	133
<b>Макаганюк А. С., Денищенко П. Н.</b> Физическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке.....	138
<b>Коробко Т. Б., Георгиаду М. В., Георгиадис Т.</b> Технология восстановления заваркой деталей из стали 42CrMo4 .....	140
<b>Токарев А. В., Митичкина Н. Г.</b> Разработка штампа для получения трубных заготовок ограниченной длины.....	142
<b>Снитко С. А., Пилипенко В. В.</b> Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане.....	144
<b>Шабельская Л. И., Митичкина Н. Г.</b> Проектирование процесса получения горловин на основе морфологического анализа ...	147
<b>Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И.</b> Разработка компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали NV-TI.....	149
<b>СЕКЦИЯ ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....</b>	<b>153</b>
<b>Корнеев, С. В., Доброногова В. Ю., Захаров О. В.</b> Моделирование напряженно-деформированного состояния механических соединений резиноканевых конвейерных лент .....	153
<b>Мулов Д. В.</b> Использование кольцевых канатных виброизоляторов в системах виброзащиты ручных машин ударного действия.....	155

СЕКЦИЯ ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ .....	158
Гутько Ю. И., Шинкарева Т. А., Бобкова С. Г. Анализ безопасности и экологичности производственных процессов в литейных цехах	158
<b>Dr. Helene Mayer</b> Corona sprache .....	160
Князьков О. В., Денисова Н. А., Князькова Е. В. Оценка износа шарнирных элементов подвесных устройств на закрывающихся шахтах ГУП ЛНР «Углереструктуризация» .....	161
Левченко Э. П. Концепция иррационального подхода к безопасности жизнедеятельности .....	163
Палейчук Н. Н., Князьков О. В., Князькова Е. В. Оценка производственного травматизма промышленных предприятий .....	166
Спорняк В. Г., Левченко Э. П., Левченко О. А., Куценко Е. В. Оценка эффективности модульного измельчителя режуще-ударного действия .....	169
СЕКЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....	172
Чебан В. Г., Черненко А. А. Усовершенствование высокопроизводительного гидродинамического очистителя .....	172
Тумин А. Н., Чебан В. Г., Стародубов А. П. Повышение качества водоснабжения городов Луганской Народной Республики .....	176
Тумин А. Н., Чебан В. Г., Благодарев А. А. Способы снижения влияния концентрационной поляризации при ультрафильтрации ....	178
Ткачев Р. Ю., Тумин А. Н., Бурмистров А. А. Исследование демпфирования колебаний гидропневматической автомобильной подвески .....	180
Рутковский Ю. А., Рутковский А. Ю. Оценка влияния резонансной области всасывающей системы на энергозатраты поршневого компрессора при использовании резонансно-акустического наддува .....	182
Ткачев Р. Ю., Тумин А. Н., Боровой Д. А. Способ управления уровнем металла в кристаллизаторе с использованием дискретных блоков управления расходом .....	184
Полилов Е. В., Калюжный В. В. Оптимизация движения машин и механизмов широкополосных станов горячей прокатки .....	187
Калюжный С. В., Мартынов С. А., Бондарь И. А. Новый принцип управления механизмом подъёма крана .....	191
Ткачев Р. Ю., Овдей В. С. Применение структурно-параметрической идентификации для диагностики технического состояния гидрообъемных передач .....	193

**СЕКЦИЯ  
ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

УДК 621.774.3

*д.т.н., проф. Еронько С. П.,  
к.т.н., доц. Ошовская Е. В.,  
Ковалева О. А.,  
к.т.н., доц. Ткачев М. Ю.*

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР*

**ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ  
РЕЗА ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ**

Процесс поперечной резки тонкостенной трубы ножом, перемещающимся перпендикулярно ее продольной оси, включает три стадии: частичное смятие поверхности полого профиля, внедрение в его тело режущей кромки ножа и относительный сдвиг разделяемых элементов. При этом пластическая деформация поверхности трубы в зоне силового воздействия ножа развивается по-разному в зависимости от формы его режущей кромки, наружного диаметра и толщины стенки, а также прочностных свойств материала разрезаемого металлического профиля.

Тонкостенная труба, представляющая собой замкнутую цилиндрическую оболочку, при полярно симметричном силовом воздействии ножа в начальный момент реза подвергается деформации, в результате которой ее верхняя выпуклая часть изгибается вдоль оси переменным моментом, вызываемым поперечной силой. В кольцевом направлении она испытывает растяжение или сжатие, а также чистый изгиб моментом, не зависящим от угловой координаты [1].

Для получения опытным путем информации о форме и размерах очага деформации, формирующегося в зоне реза тонкостенной трубы с момента касания ее поверхности клиновым ножом, разработали и изготовили стенд, включающий силовой режущий блок и измерительную систему. Силовой режущий блок, конструкция которого показана на рисунке 1, включает опорную пластину 1, несущую рамку 15, посредством резьбового соединения связанную с нижними концами вертикальных стяжек 8 и 12.

Верхние концы этих стяжек жестко соединены со специальной гайкой 10, имеющей трапецеидальную резьбу и находящуюся в зацеплении с нажимным винтом 9. Между самими стяжками размещен с возможностью относительного перемещения в вертикальном направлении суппорт 5, удерживающий клиновый нож 13, под которым на несущей рамке 15 закреплена сменная разрезная втулка 14. На суппорте 5 соосно с клиновым ножом 13 установлена мессдоза 6 с компенсирующей медной вставкой 7, имеющей в своей верхней торцевой поверхности углубление в виде полусферы. Такое же углубление имеется на нижнем торце нажимного винта 9, благодаря чему он посредством стального шарика 11 фиксирует соосное положение компенсирующей вставки 7 и обеспечивает равномерную передачу нагрузки на мессдозу 6. К стяжке 8 посредством планки 3, имеющей возможность относительного перемещения и фиксации в нужном положении, прикреплен стрелочный индикатор 2, контактирующий своим подвижным стержнем 4 с консольной накладкой суппорта 5 и позволяющий при соответствующей настройке контролировать ход клинового ножа 13 относительно сменной разрезной втулки 14, а значит, и размещаемого внутри нее образца тонкостенной трубы [2].

Контрольно-измерительная система, также входящая в состав испытательного стенда, предназначена для получения информации о силовом воздействии клинового ножа на тонкостенную трубу. Система содержит мессдозу, экранированный кабель для ее электрической связи с усилителем переменного тока, а также показывающий прибор, отображающий значения фиксируемого аналогового сигнала.

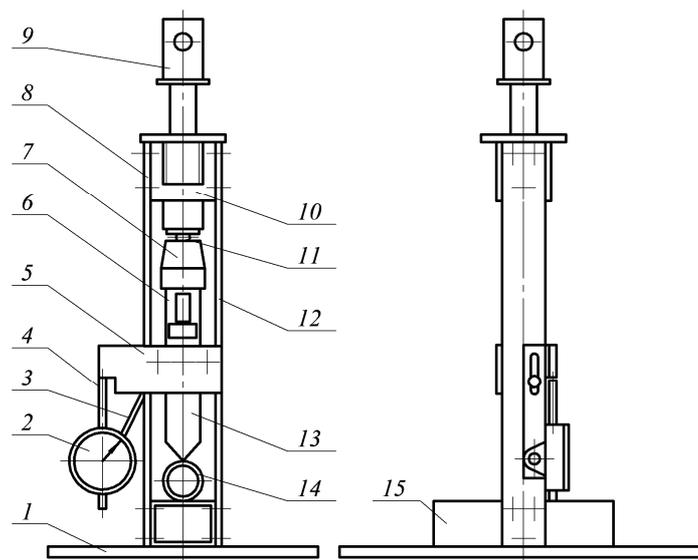


Рисунок 1 — Конструкция силового режущего блока испытательного стенда

В качестве инструментария испытательного стенда подготовлен сменный комплект разрезных втулок для труб с разным наружным диаметром (рис. 2). В теле каждой втулки выполнены два резьбовых отверстия, благодаря которым их последовательно можно с помощью винтов фиксировать на несущей рамке под клиновым ножом силового режущего блока, а также поперечно расположенная прорезь для входа клинового ножа.



Рисунок 2 — Сменный комплект разрезных втулок для фиксации труб различного диаметра на несущей рамке режущего блока

В ходе проведенных исследований на испытательном стенде для каждого контрольного образца по показаниям индикатора фиксировали прогиб верхней выпуклой поверхности трубы, при котором начинается внедрение режущей кромки клинового ножа в ее тело, а также с помощью мессдозы отмечали соответствующее значение силы, необходимой для формирования в этом случае очага деформации. Анализ полученных результатов позволил сделать заключение о том, что при одной и той же нагрузке со стороны ножа на трубу напряжения, вызываемые изгибом, превышают значения напряжения сдвига. Поэтому при порезке тонкостенной трубы клиновым ножом по одностадийной схеме, неизбежна деформация торцевых частей разрезаемого полого круглого профиля, так как внедрению ножа в тело трубы предшествует образование вогнутости ее поверхности. Для устранения смятия торцевой части трубы необходима двухстадийная ее резка, предполагающая предварительное ослабление стенки профиля в зоне силового воздействия на него клинового ножа. Уменьшение жесткости стенки трубы можно достичь путем выполнения на ее верхней выпуклой части лыски, как показано на рисунке 3.

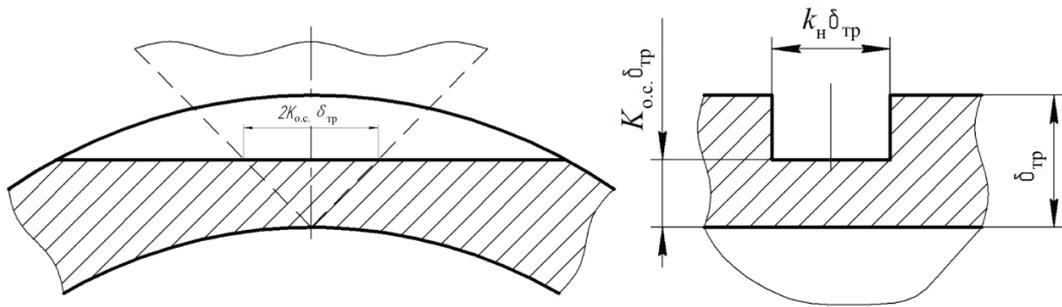


Рисунок 3 — Расчетная схема для определения минимального значения коэффициента  $K_{o.c.}$

При этом минимальную толщину стенки трубы в зоне реза следует назначать с учетом коэффициента ослабления поперечного сечения  $K_{o.c.}$  разделяемого на части полого профиля. Учитывая, что для материала трубы предельные напряжения при изгибе и сдвиге составляют  $\sigma_{из} = 0,6\sigma_B$  и  $\tau_{ср} = 0,7\sigma_B$ , минимальное значение коэффициента  $K_{o.c.}$  можно определить исходя из условия равенства силы  $P_{и}$ , изгибающей перемычку, и силы  $P_{ср}$ , срезающей ее.

Изгибающий момент, действующий на перемычку:

$$M_{и} = 0,5P_{и}K_{o.c.}\delta_{тр} = 0,6\sigma_B W,$$

откуда  $P_{и} = 1,2(\sigma_B W)/(K_{o.c.}\delta_{тр})$ .

Здесь  $W$  – момент сопротивления поперечного сечения перемычки:

$$W = k_n \delta_{тр} (K_{o.c.} \delta_{тр})^2.$$

Тогда

$$P_{и} = (1,2\sigma_B k_n \delta_{тр} K_{o.c.}^2 \delta_{тр}^2)/(K_{o.c.} \delta_{тр}) = 1,2\sigma_B k_n K_{o.c.} \delta_{тр}^2.$$

Принимаем  $k_n = 1,5$ ,  $P_{и} = 1,8\sigma_B K_{o.c.} \delta_{тр}^2$ .

Сила сдвига

$$P_{ср} = \tau_{ср} F = 0,7\sigma_B F.$$

Суммарная площадь срезаемого сечения

$$F = 2(0,5 \cdot 2K_{o.c.} \delta_{тр} K_{o.c.} \delta_{тр}) + K_{o.c.} \delta_{тр} K_n \delta_{тр} = 2K_{o.c.}^2 \delta_{тр}^2 + 1,5K_{o.c.} \delta_{тр}^2.$$

$$P_{ср} = 0,7\sigma_B (2K_{o.c.}^2 \delta_{тр}^2 + 1,5K_{o.c.} \delta_{тр}^2).$$

При равенстве  $P_{и}$  и  $P_{ср}$

$$1,8\sigma_B K_{o.c.} \delta_{тр}^2 = 0,7\sigma_B (2K_{o.c.}^2 \delta_{тр}^2 + 1,5K_{o.c.} \delta_{тр}^2).$$

После преобразования получим

$$1,4K_{o.c.}^2 - 0,75K_{o.c.} = 0.$$

Поскольку один из коэффициентов данного квадратного уравнения равен нулю, то

$$K_{o.c.} = \frac{0,75}{1,4} = 0,54.$$

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили обосновать рациональные значения параметров процесса двухстадийной резки труб при расчете летучих ножниц, предназначенных для разделения на мерные длины в потоке трубосварочного стана тонкостенных полых профилей [3], а также малогабаритных стационарных ножниц, рекомендуемых к эксплуатации в условиях заготовительных производств машиностроительных предприятий [4].

Выполненная разработка, направлена на совершенствование оборудования, обеспечивающего качественную резку тонкостенных труб за счет устранения смятия их торцевых частей, обеспечит повышение технико-экономических показателей трубного производства.

### **Библиографический список**

1. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем. Ч. 2. Сложное напряженное состояние [Текст] / Ф. Л. Шевченко. – Киев : ИСМО, 1998. – 240 с.
2. Лабораторный стенд для исследования начальной стадии процесса резания тонкостенных труб клиновым ножом [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: сб. тр. 6-й Межд. науч.-практ. конф. в 6-ти т. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк : ДонНТУ, 2020. – С. 40 – 45.
3. Еронько, С. П. Разработка и экспериментальные исследования гидравлических летучих ножниц для резки тонкостенных труб [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, О. А. Ковалева // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2019. – № 17 (60). – С. 89–97.
4. Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. № 11. – С. 502–507.

*д.т.н., проф. Еронько С. П.,  
к.т.н., доц. Ткачев М. Ю.,  
Пономарёва Е. А.,  
Цыхмистро Е. С.*

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР*

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЫЧКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Использование шиберных затворов для регулируемого слива жидкой стали из разливочного ковша, как известно, предполагает во время его подготовки к приему металла очередной плавки заполнение канала ковшового стакана так называемой стартовой смесью – мелкодисперсным материалом, который не должен спекаться при температуре 1600...1650°C, смачиваться расплавом и уплотняться под действием ферростатического давления [1]. Благодаря указанным свойствам, данная смесь при первом открытии шиберного затвора в момент совмещения отверстий его огнеупорных плит должна высыпаться из стале-выпускного канала ковша для начала беспрепятственного истечения жидкого металла. Однако на практике по ряду причин не удается достичь 100 %-ой вероятности начала разлива в штатном режиме из-за наличия над входным отверстием канала ковшового стакана перемычки, образующейся из слоев спекшейся смеси или затвердевшей стали и способной выдерживать действующую на нее силу тяжести столба расплава высотой до 5 м.

Поэтому одним из направлений исследований, связанных с повышением эффективности функционированию шиберных затворов разливочных и литейных ковшей, является поиск новых технологических решений, которые бы позволили избежать появления твердой корочки в верхнем слое стартовой смеси, находящейся в канале разливочного стакана, или минимизировать дополнительные издержки, обусловленные применением специальных устройств и приспособлений, разрушающих имеющуюся перемычку одновременно с открыванием ковшового затвора. При разработке мероприятий, призванных обеспечить беспрепятственное истечение жидкой стали после высыпания из канала затвора стартовой смеси, необходимы сведения о прочностных параметрах образующейся перемычки, которые по известным причинам, можно получить только методами математического и физического моделирования.

При разработке математической модели исходили из того, что перемычка, образующаяся над входным отверстием канала ковшового стакана, представляет собой в первом приближении осесимметричную оболочку в виде полусферы (рис. 1). Нагрузкой на нее является равномерно распределенное давление жидкой стали, нормальное к поверхности. При этом толщина оболочки  $\delta$  настолько мала, что она не может воспринимать изгибающие напряжения и практически не работает на сжатие из-за потери устойчивости. В этом случае в теле корочки могут возникать только растягивающие напряжения в кольцевом  $\sigma_t$  и меридиональном  $\sigma_m$  направлениях [2].

Рассмотрим находящийся в равновесии малый элемент оболочки, вырезанный бесконечно близкими меридиональными и кольцевыми сечениями. На данный элемент (рис. 2) действуют растягивающие силы в кольцевом направлении:

$$F_t = \sigma_t \delta R_m d\varphi,$$

в меридиональном направлении:

$$F_m = \sigma_m \delta R_t d\beta,$$

а также нормальная сила:

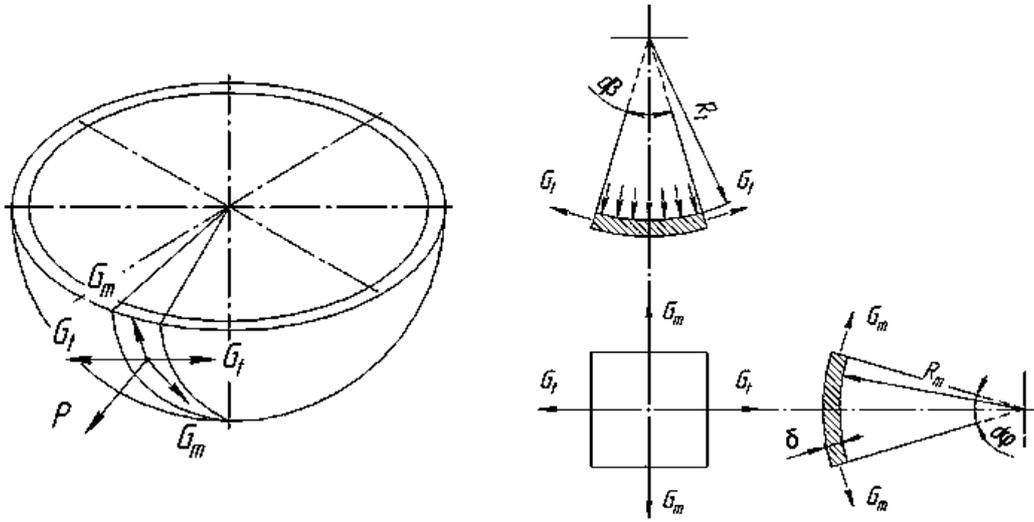


Рисунок 1 — Схема для определения напряжений в теле оболочки

$$F_n = PR_m d\varphi R_t d\beta.$$

Проецируя отмеченные силы на нормаль к выделенную элементу, получим:

$$2\sigma_t \delta R_m d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_t d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - PR_m d\varphi R_t d\beta = 0.$$

Так как оболочка имеет форму полусферы с радиусом  $R_c$ , принимаем:

$$R_m = R_t = R_c.$$

Тогда:

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_c d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = PR_c^2 d\varphi d\beta.$$

Заменяя синусы углами, получим:

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi d\beta + 2\sigma_m \delta R_c d\beta d\varphi = PR_c^2 d\varphi d\beta \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_t}{R_c} + \frac{\sigma_m}{R_c} = \frac{P}{\delta}.$$

Для сферы  $\sigma_t = \sigma_m = \sigma$ , поэтому:

$$\frac{\sigma}{R_c} + \frac{\sigma}{R_c} = \frac{P}{\delta} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{PR_c}{2\delta}.$$

Здесь  $P$  – статическое давление жидкой стали в разливочном ковше в зоне размещения его стакана

$$P = \rho_c g H_c,$$

где  $\rho_c$  – плотность жидкой стали, равная  $7000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $H_c$  – высота столба жидкого металла над ковшовым стаканом, м.

Задаваясь значениями  $\sigma$  для стали при температуре начала ее кристаллизации, а также ферростатического давления  $P$  и радиуса канала ковшового стакана  $R_c$ , по формуле (1) рассчитали минимальные толщины перемычек, при которых начало разливки не может пройти в штатном режиме (табл. 1).

Таблица 1 — Расчетные значения минимальной толщины корочки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша

Вместимость ковша, т	Высота столба металла в ковше, м	Ферростатическое давление, МПа	Радиус канала ковшового стакана, мм	Толщина перемычки на входе в канал ковшового стакана при различной прочности ее материала, мм		
				$\sigma = 20$ МПа	$\sigma = 30$ МПа	$\sigma = 40$ МПа
100	3,0	0,21	25	0,13	0,09	0,07
150	3,5	0,25	30	0,19	0,13	0,09
200	4,0	0,29	35	0,25	0,17	0,13
250	4,5	0,32	40	0,32	0,21	0,16
300	5,0	0,36	45	0,41	0,27	0,20

Экспериментальную проверку корректности результатов расчета провели с использованием лабораторного стенда, схематично показанного на рисунке 2. Он включал опорную рамку 1 с вертикально установленным на ней огнеупорным разливочным стаканом 10. На верхнюю торцевую поверхность этого стакана опирается цилиндрический кессон 4, прижимаемый к стакану крышкой 6, имеющей форму диска, и посредством четырех шпилек 2 с гайками 5, связанной с опорной рамкой 1. В полости кессона над входным отверстием канала разливочного стакана на его верхней поверхности с обеспечением герметичности можно устанавливать имитаторы перемычки 3, имеющей различную форму и толщину.

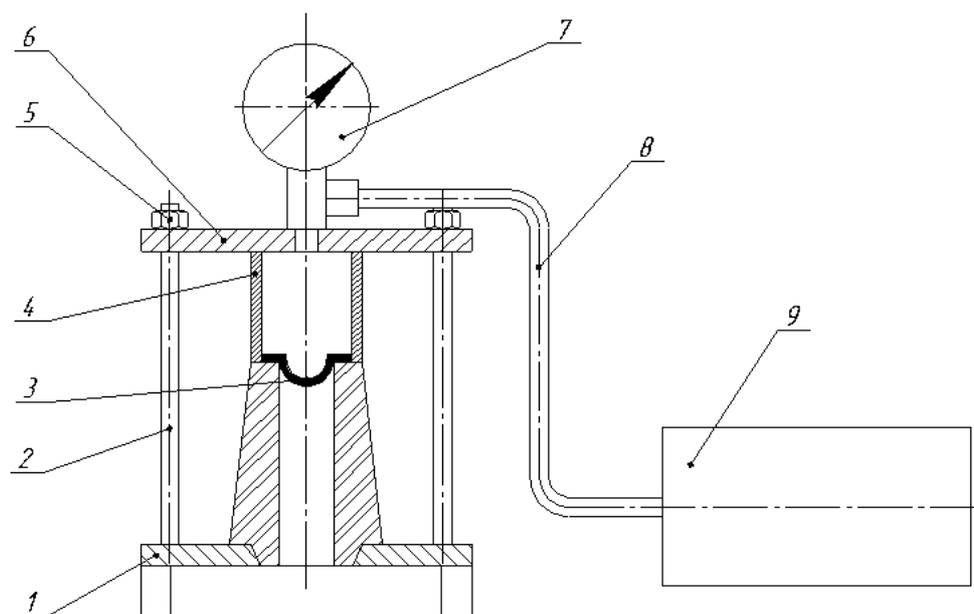


Рисунок 2 — Схема лабораторного стенда

В центральное резьбовое отверстие крышки 6 вкручен тройник для подключения манометра 7 и трубки 8, подающей в полость кессона воздух от компрессора 9 [3].

В качестве материала для изготовления имитаторов перемычки использовали свинец, который в твердом состоянии обладает такими же реологическими свойствами, как и сталь сразу же после образования кристаллической структуры, что соответствует условиям появления твердой металлической перемычки над поверхностным слоем стартовой смеси во время заполнения жидким металлом разливочного ковша.

После завершения всего запланированного комплекса лабораторных опытов при различных возможных комбинациях диаметров каналов ковшовых стаканов и геометрических

параметров имитаторов перемычек в результате обработки полученных данных построили графики зависимостей (рис. 3), позволяющих установить для конкретных условий разливки значение толщины образующейся металлической корки, при которой потребуется ее разрушение внешним силовым воздействием. Полученные расчетные и экспериментальные данные о прочностных характеристиках имитатора корки, образующейся на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша во время слива в него жидкого металла из печи или кислородного конвертера, послужат в качестве исходной информации при проектировании специальных устройств, обеспечивающих возможность начала разливки в штатном режиме при первом открывании ковшового шиберного затвора.

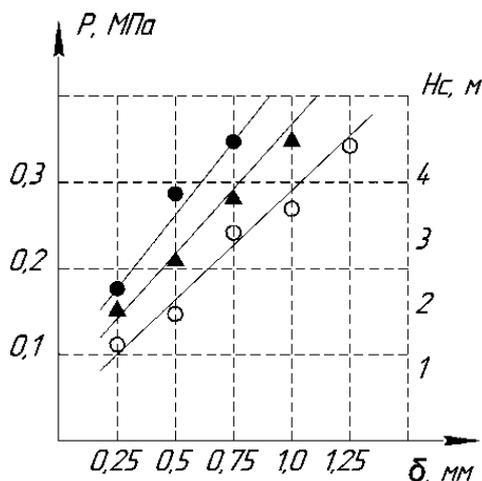


Рисунок 3 — Зависимость давления, вызывающего разрушение свинцовой перемычки, от ее толщины при различном диаметре канала ковшового стакана:  $\circ$  – 60 мм;  $\blacktriangle$  – 70 мм;  $\bullet$  – 80 мм.

### Библиографический список

1. Еронько, С. П. Разливка стали: Оборудование. Технология / С. П. Еронько, С. В. Быковских. – К.: Техніка, 2003. – 216 с.
2. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем. – К.: ИСИО, 1993. – Ч.1 : Напряженно-деформированное состояние стержней. – 280 с.
3. Стенд для прочностных испытаний имитаторов перемычек, блокирующих выпускной канал ковша в начале разливки / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: Сб. тр. 5-й Межд. научн-практ. конф. в 6 томах. Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2019. – С. 40 – 47.

## МЕРНЫЕ ШАБЛОНЫ ДЛЯ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Трафарет для расшифровки радиографических снимков или трафарет для определения несплошностей на радиографических снимках, также именуемый как мерный шаблон является вспомогательным инструментом при радиографическом (рентгенографическом) контроле опасных производственных объектов.

Радиографический контроль является одним из методов неразрушающего контроля для проверки материалов на наличие скрытых дефектов за счет использования способности рентгеновских волн глубоко проникать в различные материалы [1]. Излучение, выходящее с противоположной стороны материала, может быть измерено. В качестве устройства измерения традиционно используется рентгеновская плёнка, размещенная в держателе или кассете (рис. 1). В результате на плёнке фиксируется двумерная проекция объекта контроля с видимым скрытым изображением различной плотности в зависимости от количества излучения в каждой области объекта (рис. 2). Радиографические снимки рассматриваются в черно-белом негативе с применением негатоскопов (рис. 3).

Применение трафаретов при расшифровке снимков различных объектов контроля способствует оперативному определению недопустимых дефектов и существенно упрощает процесс оценки качества объектов. Трафареты предназначены для визуальной оценки линейных размеров трещин, шлаковых и вольфрамовых включений, пор, непроваров и других дефектов, которые были выявлены на радиографических снимках объектов контроля (сварных соединений, литья, поковок и т.п.) в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.



Рисунок 1 — Примеры установки рентгеновского аппарата для проведения контроля сварных соединений

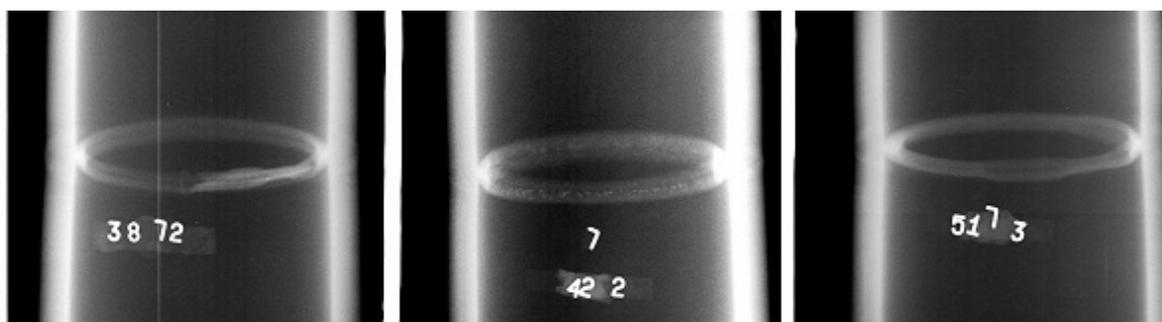


Рисунок 2 — Примеры снимков с выявленными дефектами сварных соединений

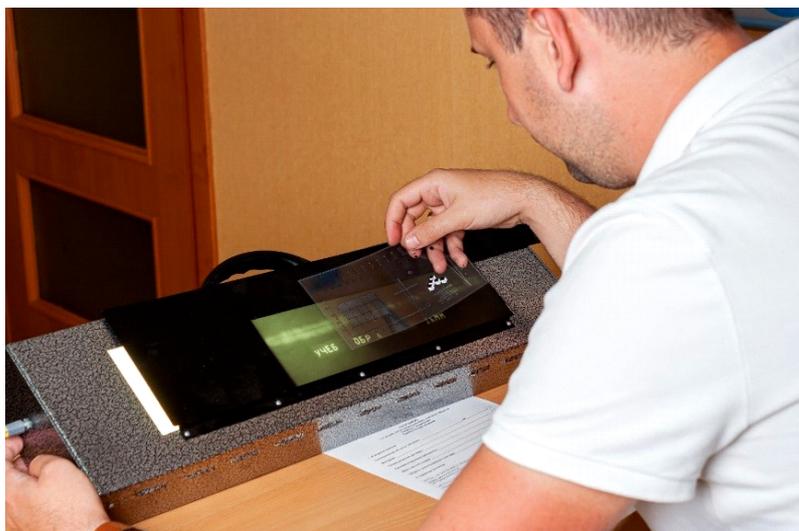


Рисунок 3 — Расшифровка радиографических снимков с помощью негатоскопа и трафарета

Трафареты выполняются в виде гибкой прозрачной пленки с нанесенными на ней миллиметровыми шкалами и изображениями окружностей и квадратов определенных размеров. На рисунке 4 приведен внешний вид универсального трафарета. Миллиметровые шкалы (поз. 6) предназначены для определения размеров крупных несплошностей; шаблоны в виде квадратов и окружностей – для визуальной оценки размеров пор (поз. 2), шлаковых и вольфрамовых включений (поз. 1 и 3), для определения площади скоплений и других включений (поз. 7); измерители различного вида (поз. 4 и 5) – для измерения размеров пор, шлаковых и вольфрамовых включений. Для точного измерения дефектов размерами менее 1,5 мм можно использовать измерительные лупы с ценой деления 0,1 мм.

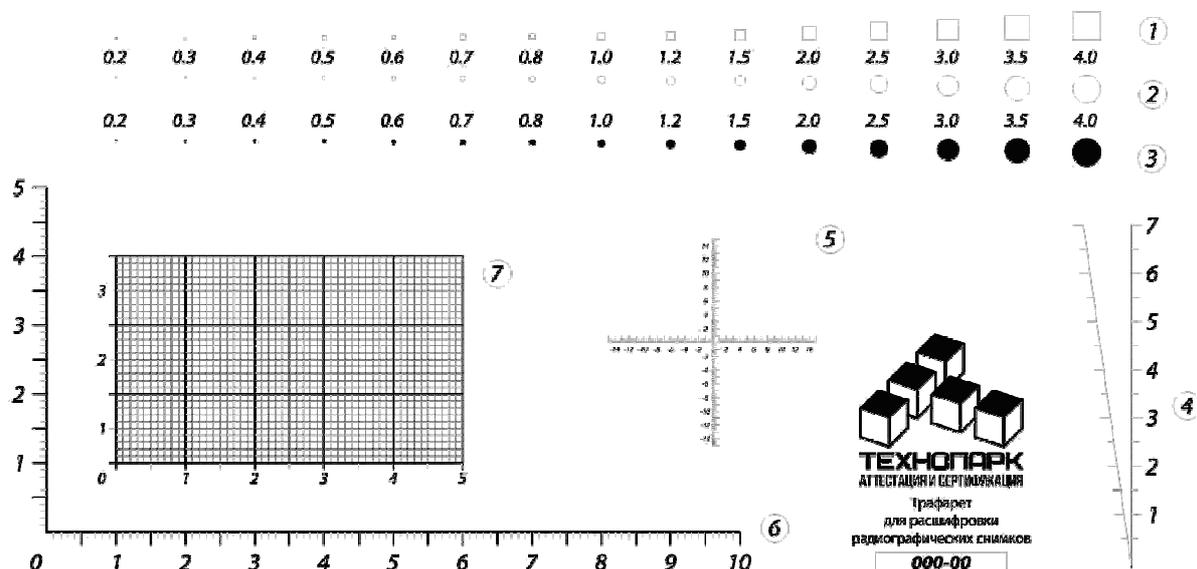


Рисунок 4 — Внешний вид трафарета для расшифровки радиографических снимков

Специалисты Технопарка «Университетские технологии» освоили технологию изготовления таких трафаретов с применением ультрафиолетовой печати и нанесением тонкого защитного слоя лака на пленку для повышения износостойкости печати и тем самым обеспеченного повышенного срока службы трафаретов. Трафарет для расшифровки радиографических снимков выпускается с паспортом и сертификатом о калибровке. Кроме универсальных трафа-

ретов под заказ могут быть разработаны и изготовлены специализированные трафареты под требования нормативных документов на конкретные опасные производственные объекты.

Первая небольшая партия универсальных трафаретов изготовлена с целью изучения практического опыта их эксплуатации в реальных производственных условиях. Ряд лабораторий неразрушающего контроля Донецкого региона получили от Технопарка «Университетские технологии» бесплатно универсальный трафарет в обмен на обратную связь с целью сбора отзывов об эффективности и надежности его эксплуатации. Первые отзывы подтвердили надежность эксплуатационных показателей предложенных трафаретов. Кроме этого, при прохождении специалистами предприятий и организаций Донецкого и Луганского регионов повышения квалификации по радиографическому методу неразрушающего контроля в Технопарке «Университетские технологии» [1], комплект раздаточного материала для специалистов включает также один экземпляр универсального трафарета для расшифровки радиографических снимков.

Разработка инструментов, контрольных образцов и учебных (тренировочных) стендов по различным методам контроля является сегодня одним из направлений развития Технопарка «Университетские технологии». Наряду с этим, значительный вклад внесен в разработку методов диагностирования оборудования машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [2]. Предложенные методы виброметрического диагностирования механизмов качания кристаллизаторов сортовых радиальных МНЛЗ [4] нашли широкое применение на отечественных металлургических предприятиях.

#### **Библиографический список**

1. Сотников, А. Л. Система обучения специалистов неразрушающего контроля // Простое.НЕТ. – 2019. – №3(20). – С. 16-18.
2. Сотников, А. Л. Задачи и методы контроля и диагностирования технологического оборудования МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – № 3 (37). – С. 33-44.
3. Сотников, А. Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. № 5. – С. 334-338.

*аспирант Мороз В. В.,  
аспирант Долгих В. П.,  
к.т.н., проф. Левченко Э. П.,  
инженер Мальков С. Л.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ЗУБА ЗВЕЗДОЧКИ РОТОРА ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

В производстве железорудного агломерата одним из основных ключевых элементов выступает его подготовка на фракции, наиболее рационально подходящие для эффективной выплавки чугуна в доменных печах. В подавляющем большинстве случаев для разрушения агломерационного спека применяются одновалковые зубчатые дробилки, обладающие высокой производительностью и простотой конструкции.

Отмечено, что в машинах данного типа наиболее подверженным изнашиванию являются зубья звездочек ротора, оказывающие непосредственное воздействие на материал, путем его продавливания через колосниковую решетку.

Особенности влияния напряжений на звездочку при дроблении агломерационного пирога изучались путем моделирования с помощью программного комплекса ANSYS Workbench при построении модели дробилки в масштабе 1:20 при условии, что ширина полосы модели агломерата превышает ширину зуба звездочки в 3 раза, что реально отражает условия действующего производства. Звездочка имеет толщину 100 мм при диаметре 1300 мм, а наклонная плита (срезающий нож) размещена под углом  $45^\circ$  к горизонту. Размеры аглопирога приняты  $250 \times 1200 \times 2500$  мм [1].

Сравнительному анализу подвергались две конструкции дробилки (рис. 1). При моделировании скорость подачи аглопирога в зону дробления задавалась величиной 2,75 м/с, а частота вращения ротора составляла  $4,7 \text{ мин}^{-1}$ . В качестве свойств материала принимались удельная масса  $1400 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности на сжатие 6,3 МПа, модуль упругости 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,21 [2]. Для придания поведению агропирога более реалистичных свойств при фрагментировании использовалась модель Друкера-Прагера [3], нашедшая широкое применение при исследовании напряженно-деформированного состояния материалов пористой структуры [4].

Графические изображения полей напряжений, возникающих на торцевой и боковой поверхностях зубьев звездочек при контактном взаимодействии с пирогом агломерата при моделировании представлены на рисунках 2–5. Из рисунков 2–5 следует, что имеются две фазы напряжений, свидетельствующих о двух зонах разрушения агломерата, а именно предварительное разламывание после сползания с наклонной плиты и последующее дробление на колосниковой решетке. Средние значения величин напряжений для торцевой поверхности зуба типовой конструкции составляет 37,6 МПа, а для новой 13,4 МПа, когда для передних поверхностей соответственно 34,5 МПа для типовой и 27 МПа для новой конструкции.

Наиболее интенсивному взаимодействию со стороны падающих и продавливаемых звездочкой кусков агломерата подвергаются области рабочих поверхностей в типовой конструкции, расположенные ближе к наклонной плите. При этом напряжения в новой конструкции являются меньшей почти на 60–70 %. На элемент конструкции, образующий перепад плоскостей в новой конструкции приходится до 20 % от общей накладываемой нагрузки (табл. 1).

На основе теории подобия руководствовались не численными значениями напряжений, которые получить в реальных условиях не представляется возможным, а отношением  $k_{нагр}$ , определяющим степень нагруженности (изнашиваемости) области контакта:

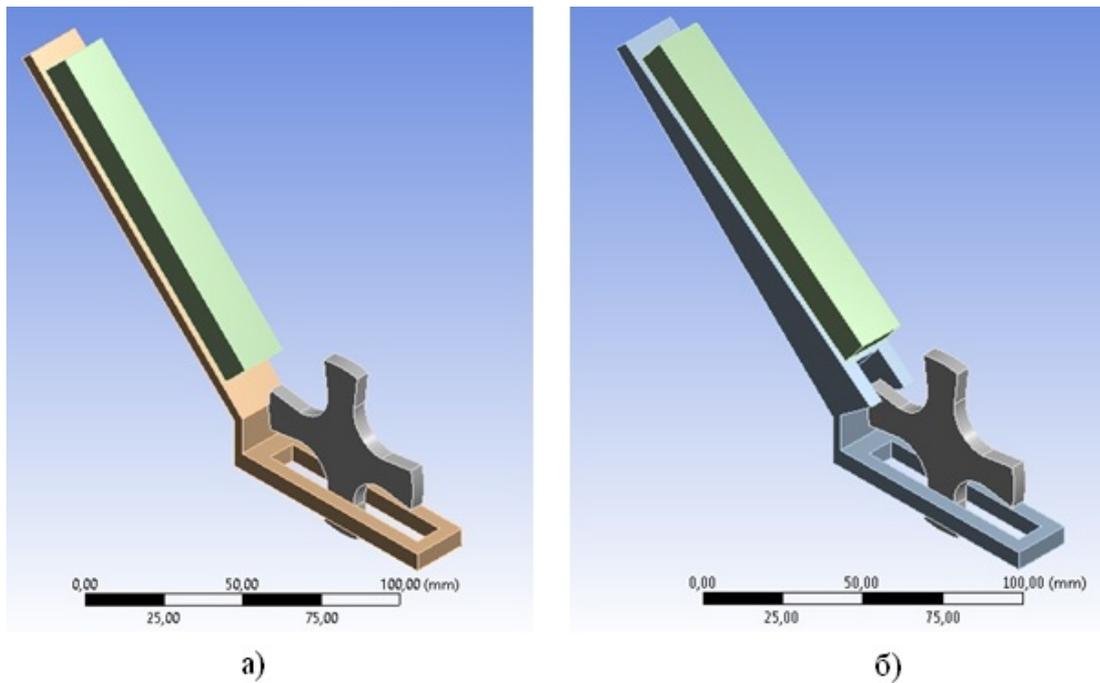


Рисунок 1 — Сравнимые модели однозубчатой зубчатой дробилки а) с плоской направляющей; б) с гребенчатой направляющей

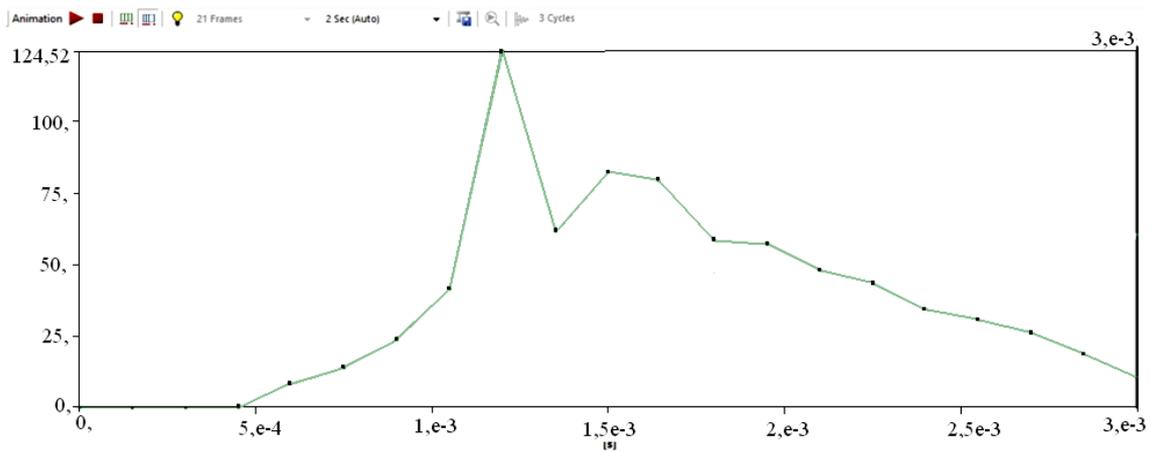


Рисунок 2 — Распределение напряжений в торцевой части зуба типовой конструкции дробилки

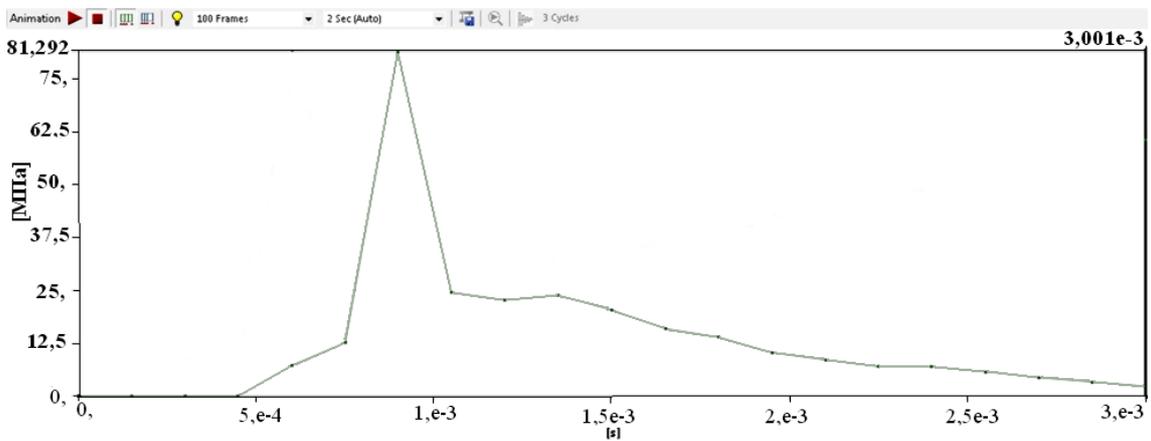


Рисунок 3 — Распределение напряжений в торцевой части зуба новой конструкции дробилки

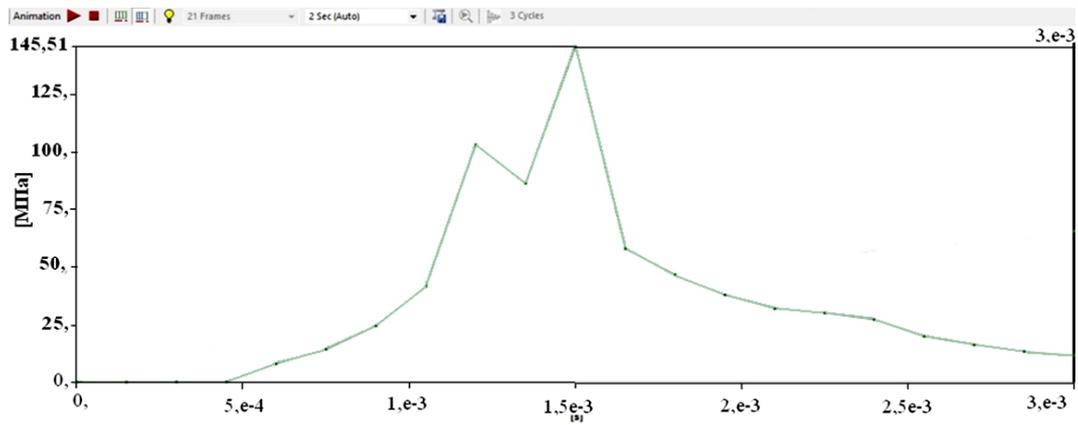


Рисунок 4 — Распределение напряжений в передней части зуба типовой конструкции дробилки

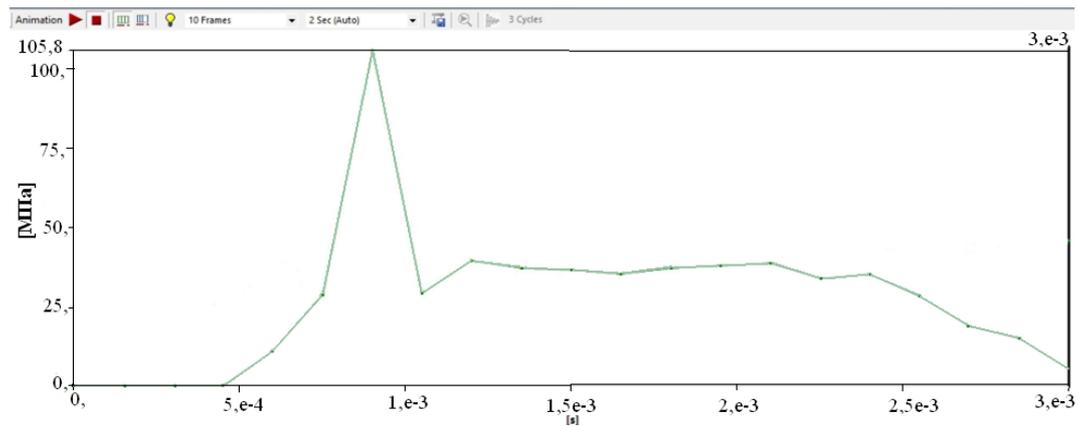


Рисунок 5 — Распределение напряжений в передней части зуба новой конструкции дробилки

$$k_{нагр} = \frac{G_{max}^{min} - G_{max}^{нов}}{G_{max}^{min}} \cdot 100\% ,$$

где  $G_{max}^{нов}$  – максимальные напряжения по Мизесу [5, 6] в новой конструкции дробилки, МПа;  
 $G_{max}^{min}$  – максимальные напряжения по Мизесу [5, 6] в типовой конструкции дробилки, МПа.

Таблица 1 — Напряжения в областях, контактирующих с пирогаом агломерата

Исследуемая область	Конструкция	
	Типовая	Новая
Торцевая поверхность зуба звездочки	32 % (124 МПа)	29 % (81 МПа)
Боковая поверхность зуба звездочки	37 % (145 МПа)	38 % (105 МПа)
Колосниковая решетка	31 % (120 МПа)	15 % (40 МПа)
Участок наклонной плиты из рельс	–	18 % (50 МПа)

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в новой конструкции одновалковой зубчатой дробилки на торцевых поверхностях зубьев возникают напряжения до 35 % меньшие, чем в типовой машине. Это позволит при средней наработке на отказ в 1 год увеличить срок службы машины на 4 месяца при увеличении ресурса передней поверхности зуба звездочки на 28 %, снизив себестоимость агломерата.

### Библиографический список

1. Мороз, В. В. Моделирование процесса разрушения аглоспека в программном ANSYS Workbench [Текст] / В. В. Мороз, В. П. Долгих, Э. П. Левченко // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленных производств: сборник тезисов докладов III Международной научно-технической конференции. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2018. – С. 28–29.
2. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О.А. Левченко и др. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – 190 с.
3. Drucker D. C. Soil mechanics and plastic analysis for limit desing [Текст] / D. C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics, vol. № 2. P. 157–165.
4. Мозжихин, А. В. Связанные задачи напряженно-деформированного состояния балок и пластин пористой структуры: диссертация...кандидата технических наук: 01.01.04 / Мозжихин Александр Владимирович; [Место защиты: Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина]. – Саратов, 2015. – 215 с.
5. Richard von Mises. Vatherial Theory of Probabiluti and Statistics [Текст] / Mises R. – New York Academic Press, 1964.
6. Работнов, Ю. Н. Соппротивление материалов [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 163 с.

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Предложена математическая модель валковой дробилки. На основании второго закона Ньютона описано движение валка при разрушении материала между бандажами при помощи дифференциального уравнения. Получена аналитическая зависимость величины перемещения валка в процессе дробления.

**Ключевые слова:** валковая дробилка, валок, перемещение, дифференциальное уравнение движения.

Валковые дробилки применяются для измельчения различного рода материалов путем раздавливания и частичного истирания между валками. Достоинствами этих дробилок являются: высокая однородность формы готового продукта, относительная простота конструкции и технического обслуживания, а также надежность и эффективность работы. Все это позволило валковым дробилкам различных конструкций найти широкое применение практически во всех отраслях промышленности. Вместе с тем, как и у любого другого оборудования, у этих дробилок существует ряд недостатков, таких как: неравномерный износ рабочей поверхности валков, налипание влажного материала на валки, возможность перекоса валка при использовании натяжного устройства, а также возникновение значительных динамических нагрузок на отдельные узлы при работе дробилки [1].

Таким образом, изучение динамики рабочих органов валковых дробильных машин, совершенствование конструкции и повышение надежности механизмов валковых дробилок являются актуальными объектами исследований. В большинстве случаев разработки в данном направлении ориентированы на изменение формы рабочей поверхности валка с целью повышения износостойкости и производительности, совершенствование нажимного устройства, определение конструктивно-технологических параметров и т. д. При этом вопросы, касающиеся динамики дробилки, в большинстве работ не рассматривались либо затрагивались поверхностно.

В отдельных исследованиях уделялось внимание проблемам динамики валковых дробилок и вибрационных нагрузок в процессе дробления. Так, в работах Пожидаева Ю. А., Федоренко К. В., Хруцкого А. А. [2, 3] валковая дробилка рассматривается как динамическая система, в которой колебания совершаются по закону движения пружинного маятника под действием внешних сил. Данный подход не описывает достаточно точно движение валка в процессе раздавливания материала между поверхностями бандажей, так как характер движения валка в данном случае является равноускоренным, а не определяется с помощью гармонического закона, а также не учитывает силу трения, возникающую между направляющими станины и подшипниковой опорой валка.

Целью данных исследований является разработка математической модели валковой дробилки в процессе дробления материала, позволяющей изучить динамику движения валков при разрушении куска материала между рабочими поверхностями бандажей (рис. 1). Для этого опишем систему «Валки-амортизатор-направляющая», представленную на рисунке 1, с помощью дифференциального закона движения (второго закона Ньютона [4]) в векторном виде:

$$\bar{F}_{ин} - \bar{F}_d + \bar{F}_{тр} + \bar{F}_{пр} + \bar{F}_{н.жс.} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{F}_{ин}$  – вектор силы инерции валка, Н;  $\bar{F}_d$  – вектор силы, возникающей при дроблении материала, Н;  $\bar{F}_{тр}$  – вектор силы трения между направляющими станины дробилки и подшипниковой опорой валка, Н;  $\bar{F}_{пр}$  – вектор силы, возникающей от деформации пружины при перемещении валка, Н;  $\bar{F}_{н.жс.}$  – вектор силы от предварительного сжатия пружины, Н.

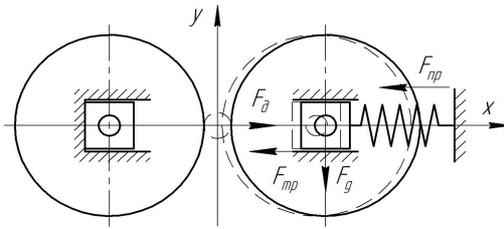


Рисунок 1 — Расчетная схема нагрузок для определения закона перемещений валка валковой дробилки

Для определения закономерности движения валка необходимо определить проекции сил в декартовой системе координат на ось  $x$  (рис. 1) в дифференциальном виде (2–5).

Сила инерции валка (согласно второму закону Ньютона):

$$F_{ин} = m\ddot{x}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса валка, кг;  $\ddot{x}$  – ускорение линейного перемещения валка,  $\text{м/с}^2$ .

Сила трения, возникающая между направляющими станины и подшипниковой опорой валка:

$$F_{mp} = mg\eta, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\eta$  – коэффициент трения скольжения стали по стали.

Сила, возникающая при сжатии пружины:

$$F_{np} = kx, \quad (4)$$

где  $k$  – жесткость пружины,  $\text{Н/м}$ ;  $x$  – деформация пружины, м.

Сила, возникающая в результате предварительного сжатия пружины:

$$F_{н.ж.} = kX, \quad (5)$$

где  $X$  – величина предварительного сжатия пружины, м.

На основании уравнений (1–5) дифференциальное уравнение движения валка относительно оси абсцисс выглядит следующим образом:

$$\ddot{x} = \frac{F_d}{m} - g\eta - \frac{kx}{m} - \frac{kX}{m}. \quad (6)$$

Стандартная процедура решения данного типа дифференциальных уравнений методом интегрирования по частям дает следующий результат:

$$x(t) = C_1 e^{-t\sqrt{\frac{k}{m}}} + C_2 e^{t\sqrt{\frac{k}{m}}} + \frac{F_d}{k} - \frac{gm\eta}{k} - X. \quad (7)$$

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяем из начальных условий движения валка:

$$t = 0 : x(t) = 0; \dot{x}(t) = 0. \quad (8)$$

Исходя из этих условий, формула (7) принимает следующий аналитический вид:

$$x(t) = \frac{2(kX - F_d + gm\eta)}{k} \cdot \sinh \left( \frac{t\sqrt{\frac{k}{m}}}{2} \right)^2, \quad (9)$$

где  $\sinh$  – гиперболический синус.

Полученная зависимость позволит в дальнейшем определить закон движения валка при разрушении материала между бандажами и параметры колебаний при моделировании динамических процессов, возникающих от сил дробления материала, а также аналитически описать условия передачи нагрузок на остальные узлы и механизмы дробильной машины.

### **Библиографический список**

1. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Пожидаев, Ю. А. Повышение эффективности эксплуатации валковых дробилок [Текст] : дис. ... к-та. техн. наук: 05.05.06 / Пожидаев Юрий Александрович; Уральский гос. горн. ун-т. – Екатеринбург, 2017. – 180 с.
3. Хруцкий, А. А. Аналитические исследования динамики двухвалковой дробилки с качающимся валком [Текст] / А. А. Хруцкий, К. В. Федоренко // Качество минерального сырья – Кривой Рог: Криворожский техн. ун-т, 2011. – С. 366–370.
4. Никеров, В. А. Физика для вузов. Механика и молекулярная физика [Текст] / В. А. Никеров. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2012. – 136 с.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Современные условия существования техногенной цивилизации на нашей планете, по сути, характеризуются критической нехваткой полезных ископаемых, в наибольшей мере эта тенденция сказывается на минеральном сырье, служащим исходными компонентами при промышленном получении черных и цветных металлов в значительных объемах. Так как железная руда, коксующиеся угли, известняк и другие компоненты, потребляемые в массовом количестве в металлургии, относятся к так называемым исчерпаемым ресурсам, то в дальнейшем аналогичные тенденции могут лишь усугубляться.

Одновременно с непрерывным увеличением потребления металлов мировой промышленностью возрастает и потребление необходимых для этого рудных компонентов, причем их добыча увеличивается двукратно за период равный 25 годам [2].

Таким образом, все большую актуальность приобретает возможность использования рудного сырья с низким количеством полезных компонентов (бедных руд), а также необходимость рециркуляции различных отходов для их повторного использования. Однако в данном случае применяемая для этого техника требует более глубокого и эффективного воздействия на материал, а, следовательно, существенного повышения затрат энергии, что приводит к завышению стоимости конечного продукта.

Известно, что в среднем на технологические операции дробления и измельчения материалов потребляется до 20 % всей мировой произведенной электроэнергии, при этом около 50 % ее затрачивается на преобразования размеров и формы сырьевых компонентов [2], однако коэффициент полезного действия при диспергировании, как правило, составляет всего лишь около 1 %. С учетом то, что годовой расход электроэнергии на приведение в действие рабочих органов дробильно-измельчительных машин достигает около 70 млрд кВт·ч, резервом экономии фактически является величина соизмеримая с 69 млрд кВт·ч. А это является основой всестороннего совершенствования процессов диспергирования материалов в экономическом плане, что раньше не обладало такой мерой актуальности.

Кроме того, дополнительным и не менее важным резервом энергооптимизации процессов дробления и измельчения выступает направление повышения стойкости рабочих органов, на которые в настоящее время затрачивается более 2,5 % всего производства стали, а также сокращение капитальных затрат в металлургии на процессы диспергирования сырья, достигающих более 40 % стоимости применяемых для этого машин [1].

Таким образом, комплексные решения, направленные на всеобъемлющее повышение эффективности процессов фракционной подготовки материалов выступают достаточно важным элементом дальнейшей научной проработки рассматриваемого вопроса, а, следовательно, возникает необходимость применения более рациональных способов приоритетного воздействия на материал, обеспечивающих близкие к оптимальным условия разрушения в каждой конкретно применяемой для этого дробильно-измельчительной машине.

С учетом современных тенденций развития дробильно-измельчительной техники и научных подходов к изучению процессов, происходящих при диспергировании можно сделать предположение, что для повышения эффективности переработки полезных ископаемых все большее значение будут приобретать методы [3], связанные с повышением концентрации разрушающей нагрузки на сырье при одновременном ее наложении, таким образом, и в таких местах, где могли бы обеспечиваться условия наилучшего раскрытия зерен при наименьших энергозатратах на разрушение (табл. 1).

Основные направления создания дробильно-измельчительных машин с улучшенными показателями работы заключаются в комбинированном воздействии на материал при одновременном дроблении и измельчении и (или) последовательно (параллельно) организованными процессами; многостадийном преобразовании материалов до требуемых фракций; увеличении концентрации полезных усилий диспергирования [4].

Таблица 1 — Методы повышения эффективности диспергирования

Виды приоритетного воздействия на материал	Основные направления повышения эффективности разрушения	
	Единичное воздействие	Комбинированное воздействие
Удар	Прямой удар	Ударно-отражательное. Ударно-встречное
Раздавливание	Разламывание	Режуще-разламывающее
Истирание	Резание	Режуще-истирающе-раздавливающее

В первую очередь данный подход может быть основан при ударном разрушении материалов на гарантировании условий центрального удара за счет повышения концентрации сжимающей нагрузки, например, путем создания прямого свободного (рис. 1, а) или стесненного (рис. 1, б) удара.

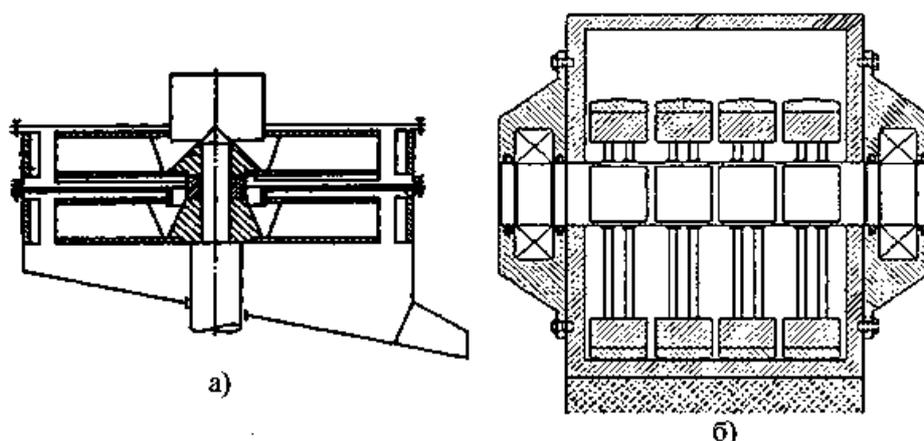


Рисунок 1 — Дробильно-измельчительные машины ударного типа: а) разгонно-ударная; б) роторно-ударная с падающими мелющими телами

Одним из самых актуальных вопросов в металлургии является приготовление сырья для доменных печей, когда требуется дробление железорудного агломерата до рациональной крупности. Наиболее распространенным оборудованием для этого являются одновалковые зубчатые дробилки, реализующие продавливание плиты агломерационного спека через колосниковую решетку зубьями ротора. Так как основным недостатком такого процесса является значительная крупность образуемых кусков в дальнейшем приводящая к значительному повышению концентрации нежелательных мелких фракций в скиповом агломерате, то рациональным является многоступенчатая обработка спека с повторной принудительной подачей материала специальными устройствами (рис. 2, а) или за счет воздействия зубьев звездочек самого ротора (рис. 2, б).

Повышение эффективности работы дробильно-измельчительных машин при переработке огнеупорных материалов с целью их повторного использования возможно путем совмещения процессов дробления и измельчения за счет рационального перераспределения движения материала в рабочей камере машины в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

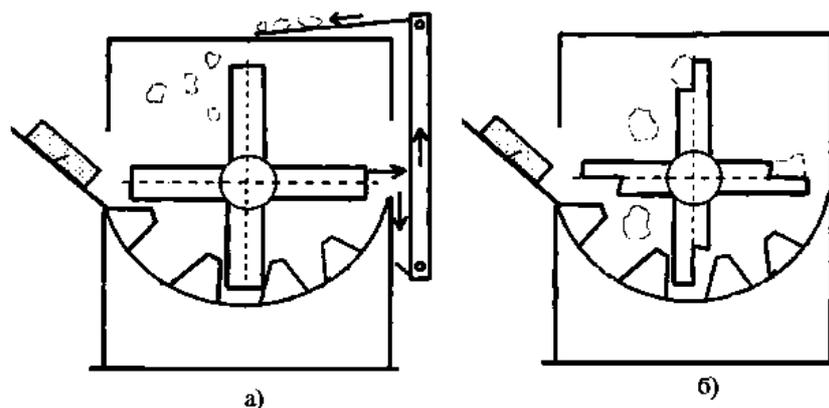


Рисунок 2 — Многоступенчатое дробление агломерационного спека в одновалковых дробилках: а) с повторной подачей материала подъемным устройством; б) с повторной подачей материала зубьями звездочек

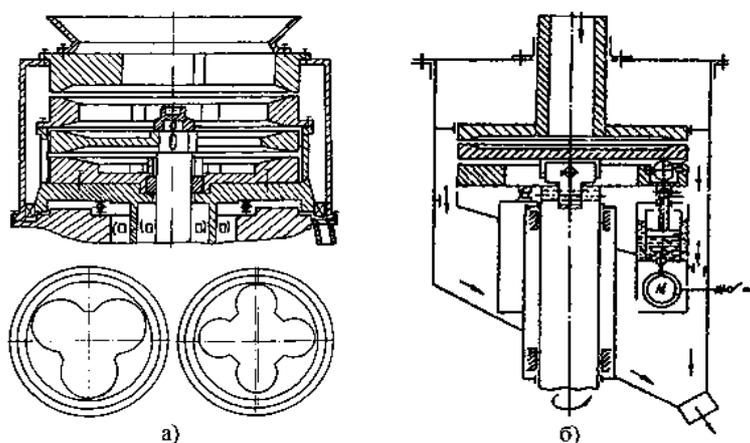


Рисунок 3 — Дисковые мельницы: а) многоступенчатая режуще-истирательная; б) одноступенчатая с качающимся диском

Таким образом, концентрация воздействия на материал при его диспергировании обеспечивает более эффективное и рациональное использование существующих дробильно-измельчительных машин, требует более глубокого научного анализа и обоснования, и рекомендуется к широкому применению в производстве.

### Библиографический список

1. Блохин, В. С. Основные параметры технологических машин. Ч.1. Машины для дезинтеграции твердых материалов [Текст] : учебное пособие / В. С. Блохин, В. И. Большаков, Н. Г. Малич // – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2006. – 404 с.
2. Малич, Н. Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов [Текст] / Н. Г. Малич, В. С. Блохин, А. О. Дегтярев // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2008. – С. 365–380.
3. Левченко Э. П. Кумуляция разрушающих усилий при диспергировании материалов в металлургии. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов [Текст] / Э. П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса. – Донецк : ДонНТУ, 2020. – С. 56–61.
4. Левченко Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-тилетней изобретательской деятельности) [Текст] : монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. – Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – 353 с.

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК С ГЛАДКИМИ ВАЛКАМИ

Рассмотрен способ расчета энергосиловых параметров процесса дробления материала в валковой дробилке. Предложены зависимости площади контакта материала с поверхностью бандажа, моментов сопротивления от сил трения, возникающих при дроблении и в подшипниковых опорах, а также мощности привода валковой дробилки при установившемся режиме работы.

**Ключевые слова:** дробление, валковая дробилка, усилие дробления, момент сопротивления, крутящий момент, мощность привода.

Четырехвалковые дробилки отвечают требованиям, предъявляемым процессам подготовки сырья в агломерационном производстве [1]. Однако процессы дробления являются весьма энергоемким и сопряжены со значительным износом рабочих органов [2], поэтому изучение самого процесса измельчения и анализ его показателей с целью повышения технико-экономических показателей дробильных машин является весьма актуальным и существенно влияет на технологический процесс агломерации шихтовых материалов в металлургии.

В работе представлены математическое моделирование и способ определения основных энергосиловых параметров процесса дробления материалов в валковой дробилке с гладкими валками аналитическим методом: усилия измельчения с учетом функции распределения материала по рабочей поверхности валков на дуге захвата, определение нормальных реакций в подшипниковых опорах валка с учетом усилий дробления, трения материала по бандажу и веса валка, а также требуемого крутящего момента и мощности привода дробилки.

Величина крутящего момента при дроблении непосредственно влияет на мощность двигателя привода, а крутящий момент, в свою очередь, зависит от момента сопротивления, включающего в себя момент от сил трения материала по поверхности валка и момент сопротивления в подшипниковых опорах.

Для определения всех параметров в первую очередь необходимо определить усилие, действующее на поверхность бандажа в процессе дробления материала в рабочей зоне валков. Так, Клушанцевым Б. В. предложена аналитическая формула суммарного усилия, возникающего при измельчении определенного объема материала между валками с радиусом рабочей поверхности  $R_g$  и действующего на их поверхность, зависящего от предела прочности дробимого материала  $\sigma_{сж}$ , длины дуги захвата материала валками  $l_d$  (определяется углом захвата материала валками  $\alpha_1$  [2, 3] –  $l_d = R_g \alpha_1$ ), а также длины (ширины рабочей поверхности) бандажа валков  $L_g$  [2]:

$$F_{др} = \sigma_{сж} \cdot l_d \cdot L_g \cdot k_{разр}, \quad (1)$$

где  $k_{разр}$  – коэффициент разрыхленности, учитывающий плотность (заполненность) потока дробленого материала, выходящего из дробилки (для прочных материалов  $k_{разр} = 0,2 \dots 0,3$ , для влажных вязких –  $k_{разр} = 0,5 \dots 0,6$  [2]).

В данной формуле площадь поверхности контактного взаимодействия массива материала с поверхностью бандажа на длине углового сектора дуги захвата является величиной постоянной. Однако в действительности она изменяется при перемещении материала в рабочей зоне валков 1 в секторе от точки  $D$  захвата куска материала 2 к точке  $E$  выгрузки его после измельчения (рис. 1). Контактная площадь определяется пропускной способностью дробилки по готовому продукту, зависящей от величины межвалкового расстояния  $b$  [2] и

рабочей ширины бандажа  $B_{раб}$  ( $B_{раб} = B_г - 2B_з$ ). При этом объем в любом угловом секторе поверхности бандажей условно остается постоянным, то есть обеспечивается закономерность сохранения количества масс и вещества в рассматриваемой замкнутой системе рабочего пространства валков.

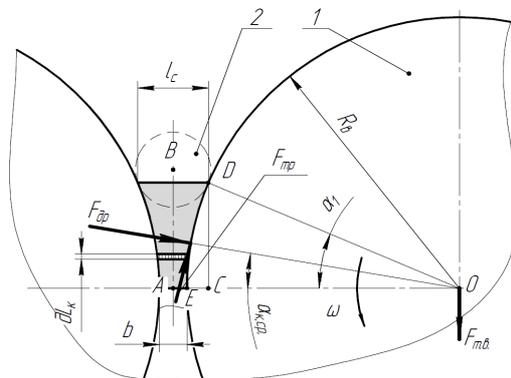


Рисунок 1 — Расчетная схема условий контактного взаимодействия материала с поверхностью бандажей в процессе измельчения в валковой дробилке

Для определения уточненного значения усилия дробления необходимо знать закономерность распределения контактных напряжений по дуге захвата. В этом случае ширина элементарной площадки контакта материала с рабочей поверхностью бандажа  $B_к$  будет определяться как отношение элементарного объема материала между валками на элементарной дуге захвата в точке  $E$  выгрузки из дробилки ( $dV_к = dl_о b B_{раб}$ ) к расстоянию между дробящими поверхностями бандажей в плоскости, перпендикулярной вектору движения материала (определяется из треугольника  $DCE$  (рис. 1) относительно текущего значения угла  $\alpha_1$  как

$$l_c = 4R_г \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + b):$$

$$B_к = \frac{b B_{раб}}{4R_г \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + b}. \quad (2)$$

Используя свойство аддитивности площадей, интегрируемых на одном и том же отрезке функции, уточненная зависимость для определения усилия дробления (основанная на формуле Клушанцева Б. В.) выглядит как:

$$F_{оп} = \sigma_{сж} k_{разр} R_г \int_0^{\alpha_1} B_к d\alpha = \frac{2\sigma_{сж} k_{разр} b B_к R_г \arctg \left( \tg \left( \frac{\alpha_1}{2} \right) \frac{\sqrt{b(4R_г + b)}}{b} \right)}{\sqrt{b(4R_г + b)}}. \quad (3)$$

Для определения мощности двигателя в первую очередь необходимо определить крутящий момент на валу, требуемый для обеспечения его вращательного движения и включающий в себя две величины: момент, необходимый для преодоления сил трения поверхности бандажа о материал  $M_{с.тр.}$ , и момент, возникающий от сил трения в подшипниковых опорах  $M_{тр.п.}$ .

Результирующая радиальная реакция в подшипниковой опоре (с учетом того, что  $F_{м.г.} = m_г g$ , а  $F_{мп} = \mu F_{оп}$ ) определяется как:

$$F_{\Sigma} = \sqrt{F_{оп}^2 (\mu^2 + 1) + g m_г (g m_г + 2 F_{оп} [\sin \alpha_{к.сп.} - \mu \cos \alpha_{к.сп.}])}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения материала валка о дробимый материал;  $\alpha_{к.ср.}$  – угол, характеризующий точку приложения равнодействующей силы от суммарного давления в процессе деформации и разрушения материала валками, определяемый с использованием стандартных численных методов:

$$\alpha_{к.ср.} = \frac{\int_0^{\alpha_1} \alpha R_{\epsilon} B_{\kappa} d\alpha}{S_{\kappa}} \quad (5)$$

Момент сопротивления в подшипниковой опоре валковой дробилки определяется по методике, предложенной в работе [4]. Для двухрядных роликовых радиальных сферических самоустанавливающихся подшипников, работающих с незначительными (по сравнению с радиальными) осевыми нагрузками при использовании пластичных смазочных материалов, формула для определения момента сопротивления выглядит следующим образом:

$$M_{мп.н.} = 2 \cdot \left( K_{s1} d_s^{\beta} + K_{s2} + F_{\Sigma}^{0,31} Y_3 d_n^{2,3} (n_{об} \nu)^{0,6} + S_1 d_n^{0,25} \mu_{sl} F_{\Sigma}^{1,33} \right) \quad (6)$$

где  $K_{s1}$  – константа, зависящая от типа подшипника;  $d_s$  – диаметр сопротивления поверхности уплотнения, мм;  $\beta$  – показатель, зависящий от типа подшипника и уплотнения;  $K_{s2}$  – константа, зависящая от типа подшипника и уплотнения;  $Y_3$  – геометрическая константа моментов трения качения;  $d_n$  – диаметр тел качения подшипника, мм;  $n_{об}$  – частота вращения подшипника, мин<sup>-1</sup>;  $\nu$  – кинематическая вязкость смазочного материала при рабочей температуре, для пластичной смазки – величина вязкости базового масла, мм<sup>2</sup>/с;  $S_1$  – геометрическая константа момента трения скольжения;  $\mu_{sl}$  – коэффициент трения скольжения в условиях образования полноценной смазочной пленки.

Мощность двигателя привода определяется по зависимости:

$$W_{об} = \frac{M_{кр} \omega}{\eta_{пр}} = \frac{\pi \cdot n_{об} (M_{с.мп.} + M_{мп.н.})}{30 \eta_{пр}}, \quad (7)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения валков;  $\eta_{пр}$  – коэффициент полезного действия привода дробилки.

Таким образом, в работе предложена математическая модель валковой дробилки с гладкими бандажами. На основании ее получен способ определения энергосиловых параметров процесса дробления материала в валковой дробильной машине. Предложены зависимости для определения усилия дробления на дуге захвата, реакций в подшипниковых опорах, момента сопротивления в подшипниках, момента от сил трения бандажа о материал, мощности привода.

### Библиографический список

1. Treatise on Process Metallurgy, Vol.3 : Industrial Processes [Текст] / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751p.
2. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
3. Власенко, Д. А. Математическое моделирование процесса захвата материала рифлеными валками в валковых дробилках [Текст] / Д. А. Власенко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. – № 18 (61). – С. 122–130.
4. Момент трения, потери мощности и пусковой момент подшипника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.skf.com/ru/products/bearings-units-housings/principles/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/friction-powerloss-startingtorque/index.html> (07.10.2020).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ПРИВОДЕ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ

Современные тенденции в проектировании металлургических агрегатов связаны с необходимостью проведения сложных, зачастую дорогостоящих исследований, достоверность которых во многом определяется адекватностью выбранной математической или физической модели объекта разработки. Накопленный опыт конструирования позволяет переходить ко все более сложным техническим системам, при соблюдении основного требования – надежности проектируемого оборудования.

В ряде случаев, когда объект изучения находится в установившемся состоянии, можно ограничиться статическими исследованиями, чего нельзя сказать про элементы рабочей линии прокатной клетки и входящее в ее состав шпиндельное соединение. Подобные узлы наряду с постоянными, испытывают еще и динамические нагрузки, изменение которых представляет определенные затруднения ввиду сложности установки тензодатчиков на подвижном шпинделе, а также оценки продолжительности и интенсивности воздействия самого переходного процесса на элементы привода рабочих валков.

Поэтому, несмотря на широкое распространение специализированных компьютерных программ, базирующихся, в том числе, на методе конечных элементов, для уточнения исходных параметров модели, корректировки эмпирических коэффициентов и достижения максимального соответствия предлагаемых теоретических зависимостей исследуемого процесса опытным данным необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Применительно к прокатному оборудованию, с учетом вышеизложенного, одним из вариантов экспериментального исследования переходных процессов в рабочей линии сортопрокатной или листопрокатной клетки является мониторинг динамических нагрузок по току электродвигателя привода рабочих валков. Данный метод не может быть использован для предохранения от перегрузок, т. к. ток привода всегда запаздывает по отношению к механической нагрузке. Однако, с учетом разброса прочностных характеристик деталей (не менее 15–20 %), точность данного метода (7–10 %) достаточна для расчета ресурса оборудования без использования дорогостоящих и сложных в эксплуатации датчиков крутящих моментов, имеющих точность того же порядка (2–3 %) [1]. Подобный подход требует учета особенностей компоновки привода (редукторный или безредукторный), режима работы стана (клетей) и параметров электродвигателя (механических и электромеханических характеристик машины постоянного тока), но упрощает получение экспериментальных данных токовых нагрузок, которые пропорциональны действующему моменту прокатки.

Таким образом, становится возможным проанализировать реальную картину распределения моментов за цикл прокатки, а также определить отношение максимальной  $M_{\max}$  (действующей в переходной период) к статической  $M_{ст}$  (действующей при установившемся процессе прокатки) нагрузке, что является важным показателем динамической системы, обуславливаемое коэффициентом динамичности  $K_{\delta}$  [2]:

$$K_{\delta} = M_{\max} / M_{ст} = I_{зах} / I_{np},$$

где  $I_{зах}$ ,  $I_{np}$  – соответственно ток двигателя в момент захвата металла валками и в период установившегося процесса прокатки.

Экспериментальные данные были получены на основании фактических измерений токовых нагрузок в обмотках двигателей рабочих клетей 730 №11Г и 12Г (редуктор в приводе отсутствует) в процессе прокатки швеллера №16. Для этого в машзале №2 крупносортового

полунепрерывного стана 600 Алчевского металлургического комбината (АМК) фиксировались показания тока ( $I_{зах}$ ,  $I_{пр}$ ), напряжения ( $U$ ) и скорости вращения ротора электродвигателя. Результаты замеров (25 шт.) токовых нагрузок представлены на рисунке 1.

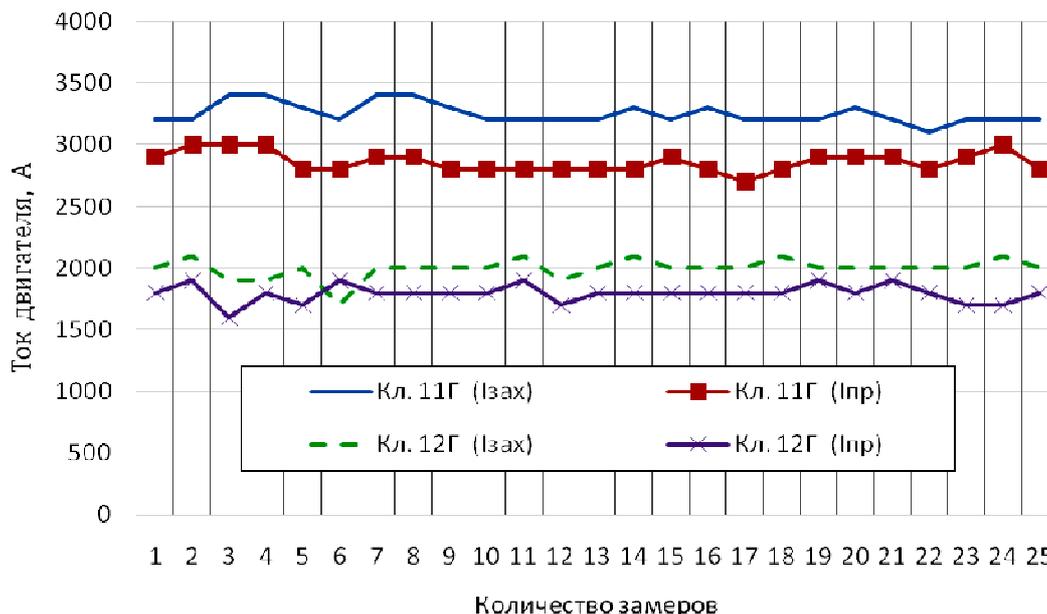


Рисунок 1 — Токовые нагрузки в момент захвата металла валками ( $I_{зах}$ ) и в период установившегося процесса ( $I_{пр}$ ) прокати швеллера №16 в горизонтальных клетях 11Г и 12Г стана 600

Усредненное значение тока в момент захвата металла валками  $I_{зах}$  составляет: 3248А – при прокатке в клети 11Г и 1996А – при прокатке в клети 12Г. Аналогичные усредненные значения тока  $I_{пр}$  составили соответственно: 2860А (клеть 11Г) и 1796А (клеть 12Г). Используя известные зависимости можно вычислить мощность на выходном валу электрической машины, которая в данном случае (при прокатке фланцевого профиля – швеллера №16) в 1,35 раза меньше номинальной мощности электродвигателя.

#### Выводы

Увеличенный примерно в 2 раза ток (момент) захвата металла при прокате в клети 11Г по сравнению с 12Г сопряжен с технологией производства и калибровкой прокатки швеллера №16 на крупносортом стане 600.

Исследование переходных процессов в приводе рабочих клетей позволяют уточнить данные о динамических нагрузках в рабочей линии и на основании экспериментальных показателей ( $K_D$ ) скорректировать представление о надежности основных механических элементов привода технологического агрегата.

#### Библиографический список

1. Крот П. В. Анализ результатов исследований в области динамики и диагностики прокатных станов. Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2006, Вып. 12, С. 298–310.
2. Определение коэффициента динамичности при исследовании динамики машин / В. И. Большаков, В. В. Буцукин// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ИЧМ НАН України, 2005. – Вып. 11. – С. 263-268.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РОЛИКОВ МНЛЗ

Условия работы роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) характеризуются большими статическими и динамическими механическими нагрузками, а также быстротечными процессами нагрева и охлаждения рабочей поверхности. Комплексное воздействие этих факторов приводит к интенсивному трещинообразованию и износу рабочих поверхностей роликов. Отказы роликов МНЛЗ приводят к нарушению непрерывности рабочего цикла, возникновению неустраняемого брака, к усложнению процесса ремонта роликов и значительному повышению трудозатрат на настройку МНЛЗ [1].

На данный момент существует значительное количество методов повышения стойкости роликов МНЛЗ, например: улучшенные конструкции системы охлаждения, применение новых материалов, способов изготовления и восстановления роликов [2]. При этом некоторые из этих способов способны значительно повысить стойкость и снизить количество известных отказов роликов, не производя существенных изменений в конструкции зоны вторичного охлаждения или использования дорогостоящих материалов и оборудования. Одним из перспективных методов является наплавка слоев градиентного строения.

В настоящее время на предприятиях применяют наплавку на поверхность ролика по винтовой линии сплошными слоями. Такой способ сопровождается расплавлением поверхностного слоя, значительным тепловложением и, как следствие, появлением значительных остаточных напряжений в поверхностном слое. В процессе эксплуатации такие наплавленные слои под воздействием высоких нагрузок подвержены растрескиванию, что приводит к выходу из строя деталей. Таким образом, общим недостатком покрытий, является значительные напряжения и недостаток контактной прочности, что ведет к их преждевременному разрушению.

Значительно повысить стойкость таких покрытий позволяет нанесение их в виде не сплошного слоя, а дискретного. Зазоры в наплавленном слое позволят повысить ресурс роликов. Благодаря этому термоусталостные трещины блокируются, не достигнув критической длины, снижаются остаточные напряжения, удается избежать возникновения дефектов в зоне перекрытия швов и изменений в основном металле вследствие повторного нагрева.

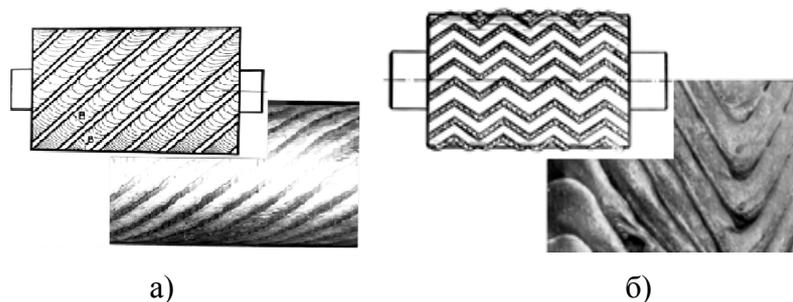


Рисунок 1 — Наплавка под углом к образующей и синусоидальная (зигзагообразная)

Нанесение швов под углом к образующей позволяет, при правильном выборе ширины шва  $B$  и угла  $\beta$ , предотвратить распространение трещины. Для швов шириной  $B = 0,5 - 2,5$  мм, оптимальный угол  $\beta$  будет в пределах  $55 - 70^\circ$ , для швов шириной 3 мм и больше, угол  $\beta$  будет  $70 - 85^\circ$  [3]. Также торможения разрушения слоистых композиций появляется при формировании наплавленного слоя из синусоидальных или зигзагообразных швов. На рисунке 1 представ-

лены схемы восстановления рабочей поверхности бочки ролика МНЛЗ наплавкой под углом к образующей (а) и синусоидальной (зигзагообразной) наплавкой (б).

При этом количество и длина трещин намного меньше, чем в случае разрывов сплошности поверхности монолитного ролика разгрузочными канавками, расположенными на расстоянии, равном ширине шва. Такой метод наплавки позволяет изменить конструкцию наплавленного слоя, устраняя зоны преимущественного зарождения трещин и снижая уровень напряженного состояния, что в сочетании с оптимальным составом металла обеспечивает повышение ресурса роликов (до 60–85%) [4].

Многослойную композицию рекомендуется формировать, чередуя участки высокой прочности с участками высокой пластичности не только от слоя к слою, но и в пределах каждого слоя.

Учитывая перечисленные выше, для формирования наплавленного слоя градиентного строения необходимо разработать, спроектировать и изготовить высоконадежный механизм с гибкой системой управления процессом формирования шва сложной формы. При этом, оптимальная форма траектории, может изменяться от прямоугольной до треугольной, в зависимости от размера детали и характера воздействующих на нее нагрузок.

### **Выводы**

При формировании каждого наплавленного слоя из синусоидальных (зигзагообразных) или швов под углом появляется дополнительная возможность торможения разрушения слоистых композиций. В этом случае используется эффект торможения трещины за счет пересечения с другими трещинами.

Использование данного метода наплавки позволит повысить стойкость роликов в 1,5–2 раза, при внесении небольших изменений в конструкцию оборудования.

### **Библиографический список**

1. Шапран, Л. А. Исследование эксплуатационных свойств роликов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ / Л. А. Шапран, Л. Х. Иванова, А. Ю. Хитько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. С. 93–95.
2. Харламов, Ю. А. Нанесение восстанавливающих и упрочняющих покрытий на рабочие поверхности деталей: уч. пособ. / Ю. А. Харламов, В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров, В. А. Шпаков. – Алчевск : ДонГТУ, 2013 – 433с.
3. Иванов, В. П. Разработка технологии наплавки ленточным электродом цилиндрических изделий под углом к образующей./ В. П. Иванов, В. П. Лаврик, Е. В. Лаврова // Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет» – Мариуполь – 2017. – № 34. С. 86–93.
4. Лещинский Л. К. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции/ Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин – Мариуполь. – ООО «Типография Новый мир», 2005. – 392 с.

*к.т.н., доц. Вишневский Д. А.,  
ассистент Бондарь Н. А.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

*д.т.н., проф. Сотников А. Л.*

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР*

## НАДЕЖНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА»

Вопросы надежности человека-оператора, как элемента системы человек-машина, рассмотрены в отечественных работах В. Д. Небылицина, который впервые рассматривает надежность человека-оператора как, «способность к сохранению требуемых качеств в условиях возможного усложнения обстановки, или, как „сохраняемость“, устойчивость оптимальных параметров индивида» [1].

В его работе выделены три фактора «обуславливающие надёжность человека-оператора», то есть причины возникновения ошибок. К первому фактору относится «качество оборудования», это ни что иное, как внешняя среда деятельности, ко второму – «обученность или тренированность», то есть внутренними условиями человека. Третий фактор «индивидуально-личностные особенности»: психологические, психофизиологические, анатомо-физиологические.

Основными характеристиками надежности человека-оператора В. Д. Небылицин выделил: долговременную выносливость, выносливость к экстремному напряжению и перенапряжению, помехоустойчивость, спонтанную отвлекаемость, реакцию на непредвиденные раздражители, переключаемость, устойчивость к действию факторов среды. Это параметры характеризующие надежность обусловленные личными факторами человека [2].

Для проведения ориентировочных расчетов надежности системы человек-машина требовалось измерение количественных показателей надежности человека-оператора. Возникли трудности при создании расчетной схемы надежности человека-оператора, а именно, техническая теория надежности не соответствует особенностям человека и его деятельности. «Во-первых, допущение о независимости возникновения отказов, опирающееся на относительную обособленность элементов технического устройства; во-вторых, положение о дискретности функциональной схемы машины и „машинного действия“; в-третьих, допущение о том, что техническое устройство (и его элементы) могут находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном» [2].

Сравнение ошибок с отказами технической теории надёжности стало основой в разработке вопросов надёжности и при изучении и организации борьбы с ошибками человека [2], так же как различение работоспособного и неработоспособного состояния человека (утомления).

Большой вклад в дальнейшее развитие теории надежности человека – оператора внес А. И. Губинский. Он ввел следующие понятия. **Отказ** это – «событие, заключающееся в частичной или полной утрате работоспособности человека, в результате которой человек перестаёт удовлетворять хотя бы одному из основных требований, обязательных для данного вида деятельности» [3] (совпадает с формулировкой для технических средств). **Окончательный отказ** – «неустраняемые или устраняемые заменой человека». **Временный отказ**, который делится на два вида, самоустраняющиеся (ошибки человека) и **устойчивый** (для устранения которых требуется предоставление специального времени и условий). **Безотказность человека** – «это свойство сохранять работоспособность в течение некоторого интервала времени до момента наступления любого из видов отказов» [3]. **Долговечность** – «это профессиональная долговечность как свойство сохранять профессиональную работоспособность до момента наступления окончательного отказа» [3].

Количественная оценка надежности человека в системах управления, рассматривая человека как элемент системы «человек-машина», остается в центре внимания. В системе «че-

ловек-машина» характерность человека как элемента системы не позволяло прямо перенести существующие методы оценки надежности технических систем в инженерную психологию. Существующие частные подходы были слабо согласованы с теорией надежности и друг с другом, что вызывало ряд трудностей для их согласования.

Рассматривая систему «человек-машина» мы подразумеваем единую систему, показатели надежности которой можно определить классическими методами теории надежности. Теория надежности изучает – «причины и закономерности возникновения отказов, методы расчетов показателей надежности, а также методы обеспечения надежности изделий при проектировании, изготовлении и эксплуатации». Из определения видно, что обеспечение надежности при эксплуатации полностью возлагается на человека. Большой процент возлагается на операторов, затем на обслуживающий и ремонтный персонал. Таким образом, надежность системы будет зависеть от надежности машины и надежности человека, который ней управляет, обслуживает и производит плановые и аварийные ремонты.

Надежность человека в системе «человек-машина» играет огромную роль. Человек – оператор, при выполнении работ может совершить ошибку, преднамеренного или случайного характера, что и есть отказ человека [4]. Этими вопросам занимается инженерная психология, которая пришла к профессиональному отбору в рамках психотехники в качестве основного инструмента в борьбе с ошибками в профессиональной деятельности. Суть этого метода состоит в том, чтобы не допускать к выполнению работ лиц, которые по своим психофизиологическим параметрам не соответствуют данной профессии. Другими словами отбор персонала происходит согласно его психотипа и стрессоустойчивости, чтобы показатель безотказности данного элемента системы был наивысшим. В случае отказа человека как элемента системы, данный элемент должен быть восстанавливаемым через время  $t$ .

Из вышесказанного следует, что при расчете показателей надежности металлургического оборудования необходимо рассматривать систему «человек-машина» как взаимосвязанную систему, в которой безотказность машины и безотказность человека представляют безотказность данной системы. В таком разрезе параметр надежности металлургического оборудования как безотказность изучен не достаточно, что приводит к необходимости его дальнейшего изучения.

### Библиографический список

1. Небылицын, В. Д. К изучению надёжности работы человека-оператора в автоматизированных системах. / В.Д. Небылицын // Вопросы психологии. – № 6. – 1961.
2. Небылицын В. Д. Надёжность работы оператора в сложной системе управления. // Инженерная психология. – М., 1964
3. Губинский А. И. и др. Принципы количественной оценки надёжности систем «человек-техника». // В кн: Надёжность комплексных систем «человек-техника». ч. 1–2. Ленинград, 1969
4. Вишневский, Д. А. Внедрение на производство решений из сферы интернет вещей, как один из способов увеличения эффективности производства / Д. А. Вишневский, Б. А. Сахаров // IV Междунар. науч.-техн. конф. «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (17 октября): сб. тез. докл., ДонГТУ. – Алчевск, 2019. – С. 14–16.

## ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГИХ (ПРУЖИННЫХ) ГАЕК В УЗЛАХ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Затяжка резьбовых соединений, созданная при сборке, в процессе работы машины в условиях эксплуатации под действием переменных нагрузок постепенно уменьшается. На интенсивность этого процесса оказывают влияние многие факторы, как-то: состояние и способ получения резьбы, жесткость стыков, микрогеометрия их поверхностей, наличие смазки, величина силы предварительной затяжки. В мобильных машинах и транспортных средствах нарушение стабильности затяжки также зависит от цикличности внешних нагрузок, частоты вынужденных колебаний, релаксации напряжений.

Самопроизвольное ослабление затяжки резьбового соединения может привести к нарушению работы сборочной единицы или машины в целом, быть причиной ухудшения ее эксплуатационных свойств, преждевременного отказа или аварии, в том числе вызванных поломками деталей из-за возросших значений динамических нагрузок. Поэтому при проектировании и сборке таких соединений большое внимание уделяют обеспечению стабильности их затяжки, а также стопорению [1, 2].

Существует несколько способов стопорения резьбовых соединений: созданием дополнительных сил трения путем осевого или радиального давления (стопорение контргайкой, винтом, самостопорящимися гайками); взаимной фиксации гайки относительно болта, одной из скрепляемых деталей или фиксации нескольких гаек (винтов) (стопорение шплинтом, пружинными и деформируемыми шайбами, проволокой); посредством местных пластических деформаций (накерниванием). Полную картину по данному вопросу раскрывает ОСТ 107.460091.014 [2]. Использование различных способов стопорения в машиностроении характеризуется следующими данными: упругой шайбой – 75...80 %, шплинтами – 10...12 %, специальными шайбами – 5...7 % и проволокой – 1...2 %.

Следует отметить, что самоотвинчивание резьбовых соединений при вибрациях, непременно сопровождающих работу машин и механизмов, является достаточно большой проблемой в технике [3]. Сами по себе резьбы обладают свойством «самоторможения», то есть растягивающая нагрузка не вызывает поворота гайки относительно шпильки (болта). Поэтому достаточно высокая затяжка болтов является надежным средством предохранения соединений от ослабления. В случае действия только осевой статической нагрузки этого средства вполне достаточно. Однако, при вибрациях, носящих случайный или систематический характер, во многих случаях, связанных с перекосом опорных поверхностей (при монтаже или в эксплуатации вследствие изгиба), могут быть кратковременные периоды, когда гайка оказывается почти свободной от осевых усилий. В результате даже незначительные тангенциальные усилия могут вызвать ее поворот. Так при динамических нагрузках, обусловленных действием вибрации, обычная гайка с упругой шайбой теряет контящие свойства через 7...8 часов работы (доля плоских пружинных стопорных шайб может достигать 39 % в комплекте крепежа узлов автомобилей).

Явление ослабления затяжки резьбовых соединений особо остро проявляется в узлах, детали которых подвержены влиянию комплекса физических и химических факторов.

Особой категорией резьбовых соединений являются соединения, которые наряду с прочими негативными факторами воспринимают также и высокие тепловые нагрузки, что также приводит к напряжениям в теле шпильки (болта) и гайки, а также вызывает их деформации, ухудшая условия нормальной работы, предусмотренные проектной документацией.

Вышеперечисленные обстоятельства определяют необходимость проверки затяжки резьбовых соединений при проведении технического обслуживания.

При этом следует отметить, что периодическое подтягивание резьбовых соединений без установленной заранее необходимости нарушает их стабильность, влечет появление остаточных деформаций в виде смятия резьбы или сопрягаемых поверхностей. Это в свою очередь может привести к последующему быстрому ослаблению резьбового соединения. После первой подтяжки ранее затянутого болта может быть потеряно до 20...25 % первоначального натяга. При повторных затяжках требуется приложить моменты, превосходящие первоначальные в 2 раза и более. Резьбовые соединения, подвергшиеся 10...15 затяжкам, держат натяг в 2...4 раза хуже, чем новые [5]. Следует также отметить, что использование прогрессивного крепежа (болты, винты и гайки, имеющие фланец, резьбовыдавливающие болты и винты, гайки самоконтрящиеся и так далее), максимально обеспечивающих стабильность предварительной затяжки в сравнении с другими видами, в настоящее время достигает лишь 1...13 % [6]. Ввиду вышесказанного представляется очевидной актуальность задачи обеспечения отсутствия повышенных и опасных значений вибрации деталей машин и механизмов, вызванных развитием самоотвинчивания резьбовых соединений, проявляющегося в виде увеличения зазоров в местах сопряжения деталей, за счет стабильности усилия их затяжки, то есть задачи повышения вероятности безотказной работы агрегата в целом.

Общеизвестны два наиболее распространенных метода сборки резьбовых соединений – сборка с приложением внешнего крутящего момента и осевых сил. Второй метод является более совершенным с точки зрения надежности и технико-экономической эффективности при эксплуатации. Однако он ограниченно применим в стесненных условиях, поскольку требует при реализации установки дополнительного оборудования соосно с резьбовым соединением. Его использование, как правило, должно быть предусмотрено на стадии опытно-конструкторских работ при создании машин и механизмов, в том числе путем увеличения длины шпилек или болтов. Но для затяжки крупногабаритных резьбовых соединений этот метод является незаменимым в части создания высоконадежного и стабильного в работе усилия затяжки. Универсальность первого метода предопределила его повсеместное распространение. Однако для контроля значения силы затяжки при сборке высокоответственных резьбовых соединениях возникает необходимость в применении специальных измерительных устройств и приспособлений. В целом этот метод менее предпочтителен, поскольку его использование влечет заведомое создание напряжений кручения в элементах резьбового соединения. Выбор того или иного метода контроля затяжки резьбовых соединений во многом обусловлен, по мнению ведущих ученых в этой области, технической возможностью применения, назначением машины, последствиями, в том числе экономическими потерями, от возможных ее простоев, аварий и так далее. Общепринято считать, что надежность высоконагруженных резьбовых соединений зависит от значения и степени обоснованности усилия предварительной затяжки, а также от точности его создания в процессе сборки или монтажа.

Таким образом, предохранение резьбовых соединений от самоотвинчивания является актуальной научной технической задачей, остающейся в полной мере неразрешенной до настоящего времени.

Идея обеспечения стойкости от развинчивания резьбовых соединений (особенно при воздействии на них вибраций) за счет принципиальных конструктивных особенностей гайки появилась в 40-х годах XX столетия [7] и развивается до настоящего времени. В большинстве развитых стран мира были предложены в этот период различные решения, целью которых являлось обеспечение самоподтягивания (самоподкручивания) резьбовых соединений, подверженных в ходе работы влиянию комплекса неблагоприятных эксплуатационных факторов.

Среди всей совокупности решений (исполнение гайки составной конструкции, состоящей из набора разрезных шайб из упругодеформируемого материала [8], или эксцентрически расположенных между собой шестигранного корпуса и разрезной резьбовой вставки [9]; использование в качестве гайки винтовых пружин [10] и так далее) наиболее удачным следует признать

пружинную гайку, выполненную в виде цилиндрической пружины из проволоки прямоугольного либо квадратного сечения с зубчатыми ободками на торцах и направлением навивки, противоположным направлению резьбы, обеспечивающей гарантированный натяг [11]. Следует отметить, что описанная конструкция успешно себя зарекомендовала на практике в узлах крепления рельсовых стыков, условия работы которых во многом совпадают с эксплуатацией тяжело нагруженных резьбовых соединений [12, 13]. Самозатягивание гайки происходит автоматически при образовании зазора между соединяемыми деталями (в том числе возникшего из-за износа соединяемых элементов, при температурных колебаниях) под действием вибрации до момента исчезновения относительных колебаний соединяемых элементов.

Таким образом, исходя из вышесказанного, можно сделать следующий вывод. Предпочтительно в тяжело нагруженных узлах механизмов и машин использовать упругие самозатягивающиеся (пружинные) гайки посредством установки их методом приложения осевых сил, гарантированно обеспечивающим высокую точность контроля усилия затяжки.

### Библиографический список

1. Лысенко, В. Г. Детали приборов / В. Г. Лысенко. – Минск: БНТУ, 2015. – 218 с.
2. ОСТ 107.460091.01424 Соединения резьбовые. Способы и виды предохранения от самоотвинчивания. Технические требования: стандарт отрасли: издание официальное: взамен ОСТ 4Г 0.019.200: дата введения 2005-07-01. – Москва: ОАО «ЦНИИРЭС», 2004. – 48 с.
3. Иосилевич, Г. Б. Затяжка и стопорение резьбовых соединений: Справочник/ Г. Б. Иосилевич, Г. Б. Строганов, Ю. В. Шарловский. – М: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Коваленко, Н. А. Техническая эксплуатация автомобилей/ Н. А. Коваленко, В. П. Лобач, Н. В. Вепринцев. – Минск : Новое знание, 2008. – 352 с.
5. Техническая эксплуатация автомобилей / Ю. П. Баранов, А. П. Болдин, В. М. Власов [и др.]. – М.: Транспорт, 1983. – 488 с.
6. Сеницын, А. К. Основы технической эксплуатации автомобилей/ А. К. Сеницын. – М.: Российский университет дружбы народов, 2011. – 282 с.
7. А.с. № 50740 СССР, МПК F16B37/02. Однониточная гайка из листового металла; № 194820: заявл. 26.05.1936: опубл. 31.03.1937 / Г. Я. Гольдфарб, А. Ф. Михельсон.
8. Patent № 3461935 USA, IPC F16B37/12; F16B39/284; F16B39/36. Resilient self-blocking nut; № 19680700869: appl. 26.10.1968: publ. 19.08.1969/ G. Monticelli; inventor G. Monticelli. – 3 p.
9. А.с. № 453500 СССР, МПК F16B37/12. Самоконтрящаяся гайка; № 1919800/25-27: заявл. 24.05.1973: опубл. 15.12.1974/ С. Л. Попов.
10. Патент № 2031261 РФ, МПК F16B37/12. Пружинная гайка; № 4881612/28: заявл. 11.11.1990: опубл. 20.03.1995/ А. А. Дмитриев; заявитель А. А. Дмитриев.
11. Патент № 2199035 РФ, МПК F16B37/12, B21F35/00, B21F3/04, B21H3/08, B21D11/06. Пружинная гайка и способ изготовления пружинных гаек; № 2001132104/28: заявл. 29.11.2001: опубл. 20.02.2003/ Г. И. Котиков, С. В. Бычин, З. З. Коршунова, А. Е. Тер-Нерсесьянц, О. С. Бойко; заявитель А. Е. Тер-Нерсесьянц.
12. Испытания самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков / В. Г. Артюх, А. А. Никитченко, В. О. Мазур [и др.]// Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 154–165.
13. Анализ работоспособности самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков / В. Г. Артюх, А. А. Никитченко, Н. В. Подгорная [и др.] // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. – Т. 23, № 2. – С. 223–231.

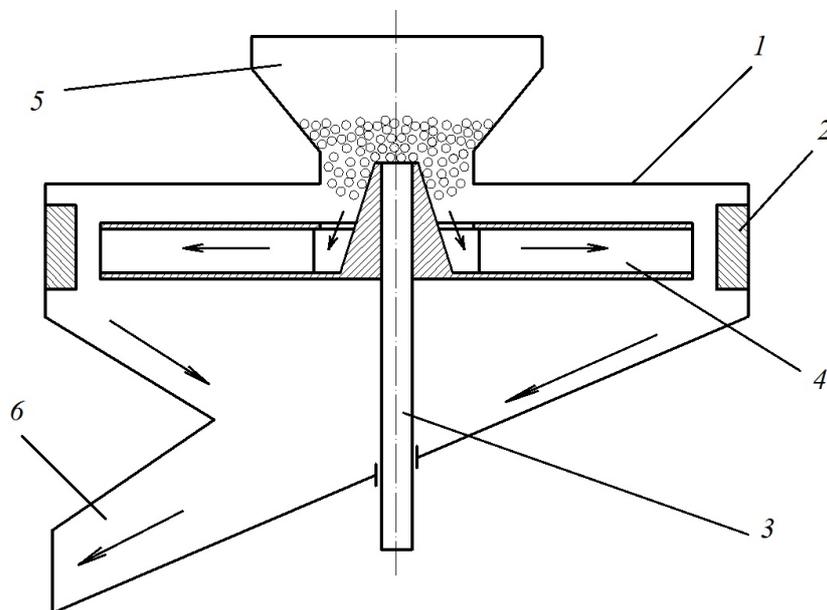
## УЛУЧШЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА ВХОДНОМ УЧАСТКЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОЙ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

В металлургической промышленности существует необходимость в дроблении и измельчении различных материалов, в частности, руд с вкраплениями железосодержащих минералов. Для дробления материалов наиболее часто применяются машины, которые используют энергию, накопленную ударником, либо энергию, запасенную в результате движения измельчаемого материала [1].

Способ дробления, с учетом физико-механических свойств исходного сырья, предполагает определенную степень измельчения материала. Для тонкого измельчения все чаще используются центробежно-ударные машины, схема которой представлена на рисунке 1.

Исследования работы центробежно-ударных мельниц [2] показали, что различные особенности движения материала, снижающие его скорость подачи на рабочие элементы, могут способствовать неполному дроблению частиц. Т. е. для эффективной работы мельницы необходимо обеспечить определенную скорость частицы перед ударом об отбойную поверхность. В то же время, при увеличении угловой скорости вращения ротора, затраты энергии возрастают по квадратичному закону.

В. А. Елисеев [2] считал необходимым исследовать вопрос возможности увеличения схода частиц материала с лопасти без увеличения числа оборотов ротора центробежно-ударной дробилки.



1 – корпус; 2 – отбойная поверхность; 3 – вал; 4 – лопатки; 5 – загрузочный патрубок; 6 – выгрузочное приспособление

Рисунок 1 — Центробежно-ударная дробилка

Такую возможность может обеспечить улучшение условий входа частиц в зону вращающихся лопаток. Увеличение скорости движения частицы, а также более корректное на-

правление ее движения возможно за счет изменения формы входного конуса (рис. 2, б) к профилю, имеющему форму брахистохроны (рис. 2, а).

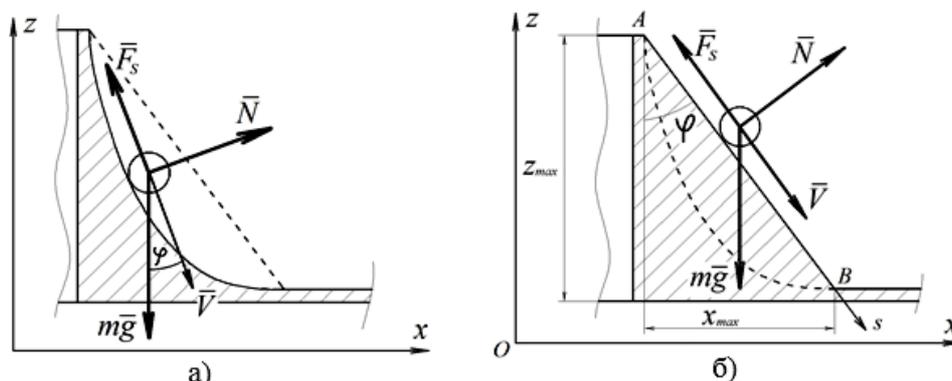


Рисунок 2 — Схема сил, действующих на материальную точку массой  $m$ : а) профиль в виде брахистохроны; б) конусный профиль

Сначала рассмотрим движение материальной точки постоянной массы, скользящей по кривой в поле силы тяжести. На точку действуют сила сухого трения  $F_S$  и составляющая реакции опоры  $N$ , перпендикулярная скорости  $V$  (рис. 2, а).

Уравнения движения материальной точки имеют вид [3], [4]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = N \cdot \cos \varphi - F_S \cdot \sin \varphi, \\ m\ddot{z} = N \cdot \sin \varphi + F_S \cdot \cos \varphi - mg, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол между вектором скорости и направлением силы тяжести.

Величина силы сухого трения определяется с помощью закона Кулона [5]  $F_S = k \cdot |N|$ , где  $k$  – постоянный коэффициент трения.

После преобразований система уравнений движения (1) будет выглядеть следующим образом [4]:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cdot \sin \varphi; \\ \dot{z} = -V \cdot \cos \varphi; \\ \dot{V} = g \cdot \cos \varphi - k \cdot V \cdot u; \\ \dot{\varphi} = \frac{\sin \varphi}{V} \cdot \frac{g \cdot [1 + k^2 + k \cdot (\psi - k) \cos 2\varphi + k \cdot (1 + k \cdot \psi) \sin 2\varphi]}{[1 - k^2 + 2k \cdot \psi + k \cdot (k - \psi) \cos 2\varphi + k \cdot (1 + k \cdot \psi) \sin 2\varphi]}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $u$  – оптимальное управление [4];  $\psi$  – параметр, зависящий от коэффициента трения  $k$  и угла  $\varphi$  [4].

Система дифференциальных уравнений (2) решается как задача Коши с начальными условиями

$$x(0) = 0, \quad z(0) = 0, \quad V(0) = 0, \quad \varphi(0) = 0. \quad (3)$$

Для расчетов примем коэффициент трения  $k = 0,1$ .

Изменение скорости точки с течением времени представлено на рисунке 3. На графике скорости материальной точки (рис. 3) экстремум наблюдается при  $t = 0,268$  с. Расчеты показывают, что для этого момента времени скорость частицы составляет  $V = 1,419$  м/с, угол наклона вектора скорости  $\varphi = 75,23^\circ$ , а координаты материальной точки  $z_{\max} = -0,148$  м,  $x_{\max} = 0,185$  м.

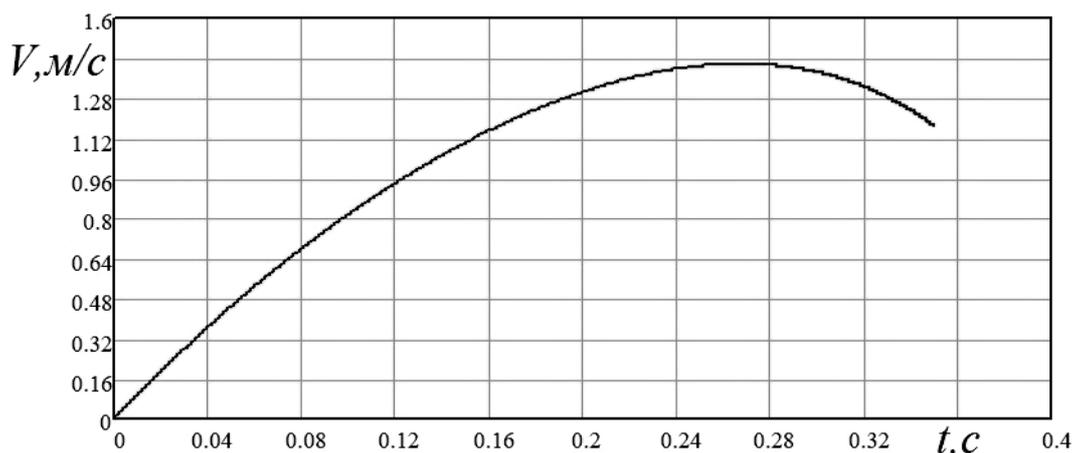


Рисунок 3 — Изменение скорости материальной точки при  $k = 0,1$

Теперь сравним полученные результаты с движением той же материальной точки по прямой наклонной поверхности (рис. 2, б).

Составим дифференциальное уравнение движения материальной точки по прямой наклонной поверхности с постоянным углом наклона  $\varphi = \arctg \frac{x_{\max}}{z_{\max}}$ , под действием силы тяжести  $mg$ , силы сухого трения  $F_S$  и реакции опоры  $N$ , в проекции на ось  $As$ , совпадающую с направлением движения по наклонной прямой.

$$m\ddot{s} = mg \cdot \cos \varphi - F_S \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

В результате двойного интегрирования уравнения (4) при начальном положении частицы в точке  $A$  и при начальной скорости частицы  $V_A = 0$ , определяем скорость материальной точки и закон ее движения.

В результате расчетов время, за которое частица достигнет точки  $B$ , составит  $t_{\max} = 0,297$  с. При достижении частицей точки  $B$  ее скорость составит  $V_B = 1,594$  м/с. Угол наклона поверхности  $\varphi = 51,35^\circ$ . Для определения эффективности предложенного профиля сравним проекции скоростей частицы в точке  $B$  на ось  $Ox$ . При профиле в виде брахистохроны  $V_x^B = 1,372$  м/с, при конусном профиле  $V_x^B = 1,245$  м/с. Разница составляет  $\Delta = 9,26\%$ .

Таким образом, в результате проведенных расчетов и сравнения двух профилей входного участка центробежно-ударной дробилки, выявлено, что применение профиля в виде брахистохроны увеличивает скорость движения частиц разрушаемого материала, на 9,26%, что должно повысить эффективность дробления. Кроме того, в результате применения профиля в виде брахистохроны вектор скорости частицы на подходе в область вращающихся лопастей на 31,74 % становится ближе к естественной траектории движения частицы в радиальном направлении.

Направлением дальнейших исследований является изучение действия других сил, которые могут повлиять на поведение измельчаемого материала.

### Библиографический список

1. Левченко, Э. П. Диспергирование материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах [Текст] : монография / Э. П. Левченко, О. А. Левченко, А. М. Зинченко, В. В. Мороз, О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко. – Алчевск: Донб. гос. техн. ун-т, 2016. – 235 с.
2. Елисеев, В. А. Исследование процесса измельчения зерна ударом: Автореферат диссертации на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01 «Технология и средства механизации

сельского хозяйства»/ Елисеев Владимир Алексеевич; Моск. технол. ин-т пищ. пром-ти. – М., 1962. – 11 с.

3. Зароднюк, А. В. Оптимизация управляемого спуска и обобщенные задачи о брахистохроне. Диссертация на соискание учёной степени кандидата ф.-м. наук. – М.: Механико-математический факультет МГУ. 2018. – 124 с.

4. Вондрухов, А. С. Брахистохрона при действии разгоняющей силы, а также сухого и вязкого трения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата ф.-м. наук. – М.: Механико-математический факультет МГУ. 2016. – 58 с.

5. Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики: учебник для студ. машиностроит. и приборостроит. спец. вузов [Текст] / Н. Н. Никитин. 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 608 с. : ил. + прил.

## ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ АБРАЗИВНОГО СТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА В РОТОРНО-УДАРНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

Применение стальной дробы для дробеструйной и дробеметной очистки различных материалов получает все большее распространение в металлургии и литейном производстве. Как известно обработка изделия стальной дробью используется как для очистки металла от ржавчины и окалина, так и для сглаживания микрорельефа поверхности, что позволяет повысить адгезионные свойства материалов, а также придания товарного вида изделиям. Главной особенностью этого метода является его универсальность. Дробью можно обрабатывать любые сложные поверхности, например такие, как зубья шестерен, витые пружины, рессоры, лопасти компрессора и т.п. После обработки дробью повышается срок службы детали и появляется возможность повышения ресурса изделия в целом [1]. При этом наиболее эффективно происходит обработка металлическим абразивом с острыми краями, получаемого путем раскалывания стальной дробы округлой формы.

От правильного расчета и проектирования измельчителя для приготовления остроугольной (колотой) дробы зависит ее качество и, соответственно, обеспечение высокой степени очистки металлических конструкций и деталей, а также полезный выход готового продукта в процентном соотношении.

Предложенный инновационный способ диспергирования дробы стесненным ударом [2, 3] включает в себя эффективное взаимодействие свободно падающих под действием сил гравитации мелющих тел с измельчаемым материалом. При том, что размещенные диаметрально относительно друг друга мелющие тела (ударники) жестко зафиксированы между собой и образуют единую поступательную кинематическую пару с вращающимся ротором. Регулируя частоту вращения ротора можно задавать различное число циклов разрушения сырья и количество циклов раскалывания, тем самым, обеспечивая крупность готового продукта необходимого качества. Кинематическая схема измельчителя показана на рисунке 1.

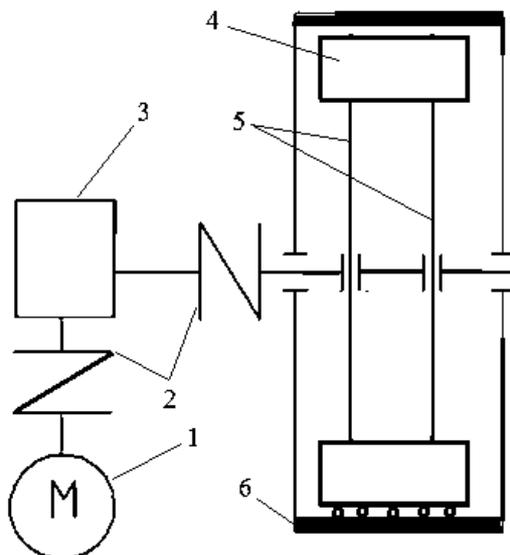
Ввиду необходимости вращения ротора с малой угловой скоростью для обеспечения свободного падения ударных элементов целесообразно использование в приводе червячного редуктора, обладающего высокой кинематической точностью, повышенным передаточным отношением и значительным крутящим моментом. Это является положительным фактором, так как масса поднимаемых грузов мелющих тел достигает больших величин (нескольких сотен килограмм). Причем для повышения производительности процесса раскалывания колотой дробы роторно-ударный измельчитель выполнен многорядного исполнения. При этом равномерное смещение мелющих тел разных рядов на одинаковый угол будет способствовать более плавному распределению нагрузки на вал электродвигателя.

Для математического моделирования процесса работы роторно-ударного измельчителя, в первую очередь, следует определить условия разрушения дробы стесненным ударом, где наиболее весомыми показателями являются масса ударника и его скорость при ударном контакте с дробью [4].

$$m'_M = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot \sigma_{дин}^5 \cdot N_{др}^{\frac{5}{3}} \cdot \Theta^4}{V^2 \cdot R_{np}^3}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{дин}$  – динамический предел прочности материала раскалываемой дробинки, МПа;  $N_{др}$  – максимальное количество дробин, при котором обеспечивается их раскалы-

вание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара мелющего тела;  $\Theta$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материалов дробы и ударника;  $V$  – скорость, при которой происходит ударное взаимодействие ударника и дробы;  $R_{np}$  – приведенный радиус кривизны поверхности контактирующих тел.



1 – электродвигатель; 2 – муфты; 3 – червячный редуктор; 4 – мелющие тела; 5 – направляющие штоки; 6 – броня корпуса

Рисунок 1 — Кинематическая схема измельчителя

Скорость поступательного движения ударного элемента подчиняется следующей зависимости от времени:

$$V = \dot{x}(t) = C_4 \cdot \omega \cdot e^{\omega t} - C_3 \cdot \omega \cdot e^{-\omega t} - \frac{g(\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + f_1 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t))}{2 \cdot \omega}, \quad (2)$$

где  $C_3, C_4$  – произвольные постоянные;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $c^{-1}$ ;  $f_1$  – коэффициент трения материалов штока ударника по направляющим ротора;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\alpha_0$  – угол, при котором начинается относительное движение штока ударника относительно ротора, рад;  $t$  – время движения, с.

Подставив постоянные  $C_3$  и  $C_4$  в выражение (2) зависимость для определения скорости движения ударника относительно подвижной оси  $x$  от времени принимает следующий вид:

$$V(t) = -\frac{g(\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + f_1 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t))}{2 \cdot \omega} + \frac{e^{\omega t} \cdot [\omega^2 \cdot (r - R) + g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1 - f_1) + \sin(\alpha_0) \cdot (1 + f_1))]}{4 \cdot \omega} - \frac{e^{-\omega t} \cdot [\omega^2 \cdot (R - r) - g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1 + f_1) - \sin(\alpha_0) \cdot (1 - f_1))]}{4 \cdot \omega}. \quad (3)$$

где  $R, r$  – рабочие радиусы вращения мелющих тел в их верхнем и нижнем положениях относительно центра вращения ротора.

На основании этого, можно выявить основные параметры ударного измельчителя, к которым относятся технологические размеры (геометрия рабочих поверхностей мелющих тел,

внутренний радиус рабочей поверхности корпуса, диаметр вала ротора), скорость вращения ротора, количество ударников, а также мощность двигателя, что позволит разработать создать опытный образец предлагаемого устройства.

### Библиографический список

1. Онащенко, Ф. Е. Модернизация оборудования для обработки дробью [Текст] / Ф. Е. Онащенко, Е. Л. Алешкевич, Г. Г. Горанский и др. // Новые материалы и технологии их обработки: IX Республиканская студенческая научно-техническая конференция. – Минск: УП «Технопарк БНТУ Метолит», 2008. – С. 130–132.
2. Павлиненко, О. И. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторной ударной мельницы для производства колотой дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ.– Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2019. – № 4 (18). – С. 3–9.
3. Патент № 2729155 Российская Федерация, МКИ6 (2020.02) В 02 С 17/20. Способ разрушения материалов стесненным ударом / Павлиненко О. И., Жильцов А. П., Чебан В. Г., Левченко Э. П., Власенко Д. А., Левченко О. А.; – № 2019127706; заявл. 02.09.19; опубл. 04.08.20; Бюл. № 22.
4. Павлиненко, О. И. Аналитические приемы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дробы стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. Вып №15 (58). – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – С. 106–112.

*к.т.н., проф. Жильцов А. П.,  
к. ф.-м. н., доц. Харитonenко А. А.,  
Кузьмин А. Ю.*

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия*

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ПОДАЧИ МАТЕРИАЛОВ НА КОЛОШНИК ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

### **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.

### **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 обоснованных 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. 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.

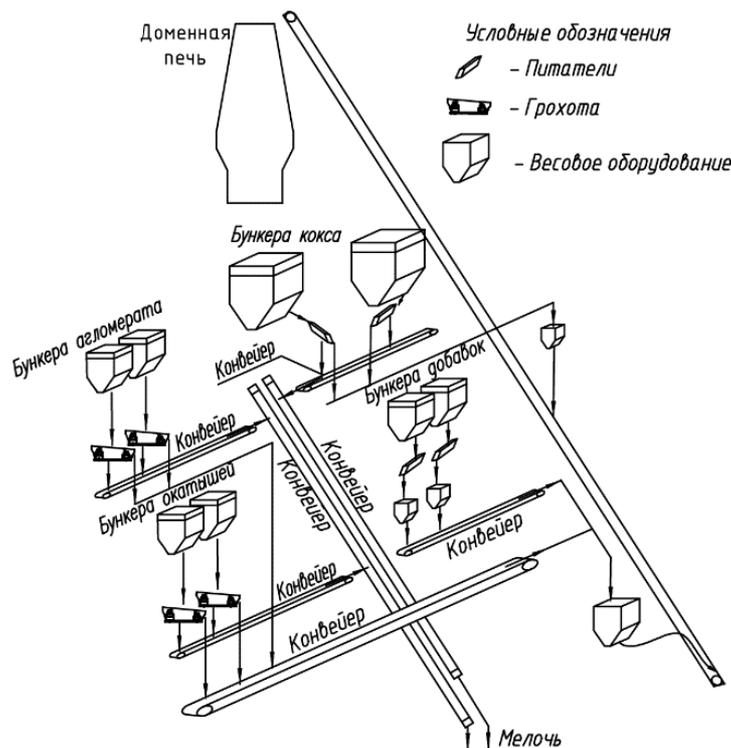


Рисунок 1 — Упрощенная схема типовой планировки расположения оборудования участка загрузки

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.



Рисунок 2 — Общая схема разработки и выбора рационального варианта

В этих условиях возможен вариант с незначительное 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. 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.

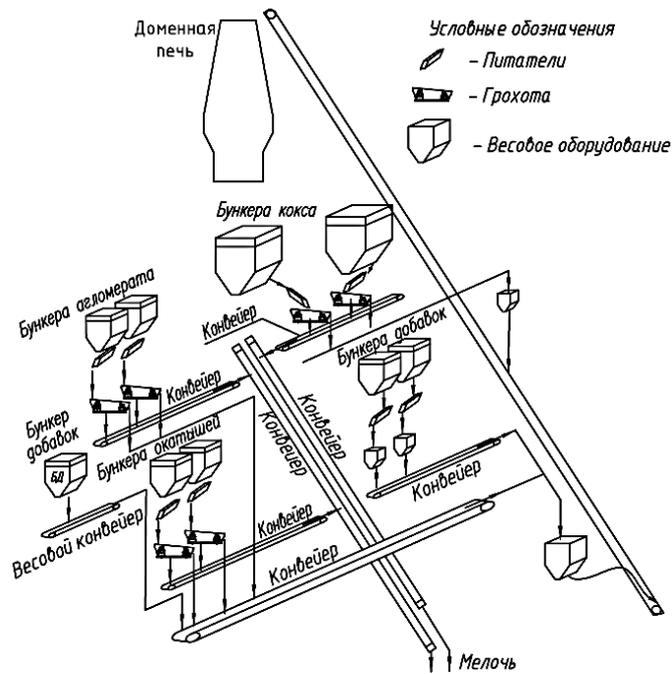


Рисунок 3 — Упрощенная схема варианта №1 планировки расположения оборудования участка загрузки

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.

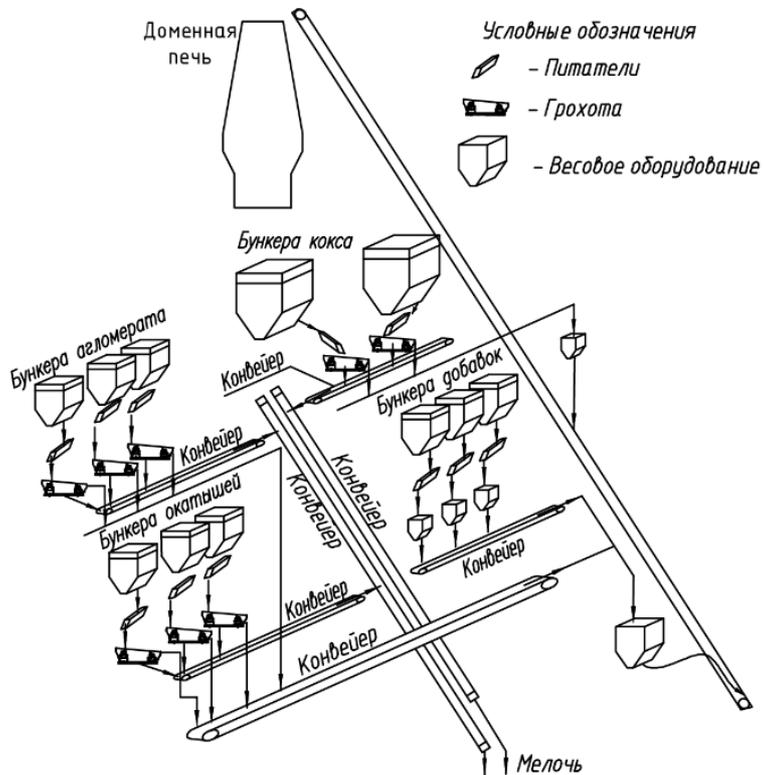


Рисунок 4 — Упрощенная схема варианта № 2 планировки расположения оборудования участка загрузки

## **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.

## **Библиографический список**

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.

*к.т.н., проф. Жильцов А. П.,  
старший преподаватель Челябинца А. Л.,  
магистр Соколов Д. С.,  
магистр Костылев Д. Е.*

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия*

## ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТОВ ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА

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 ремонтировать».

В этой связи целесообразным является переход от системы планово-предупредительного регламентированного, «среднестатистического» ремонта к системе ремонта по состоянию оборудования, базирующемуся 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 объем 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 [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].

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 выявленные дефекты и повреждения, мобильное ТО содержит автоматизированный мобильный комплекс (рис. 1), 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 1 — 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 чистой группы клетей и их приводов стана 2000 горячей прокатки пример расположения идентификационных меток показана на рисунке 2.

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.

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. Благодаря имеющимся серверам система способна предоставить работникам ремонтных служб все основные параметры оборудования, необходимые для реализации его нормальной работы.

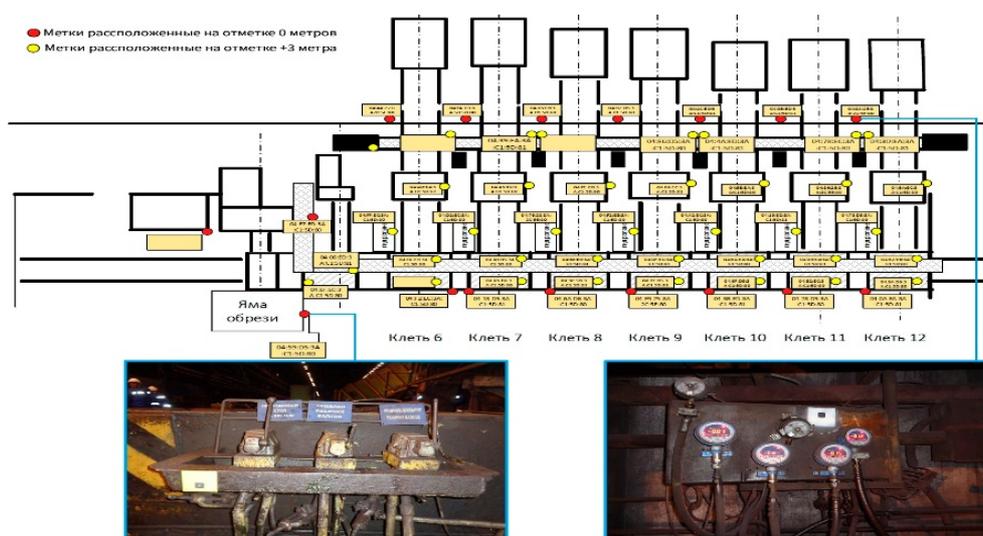


Рисунок 2 — Фрагмент расположения NFC-меток чистой группы клеток стана применительно к оборудованию 2000

В ходе проведения осмотров и сбора фактических данных с использованием диагностических приборов мобильное устройство выводит на экран допустимые 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. В результате применения мобильных систем при реализации технического обслуживания и ремонтов прокатного комплекса следует обратить внимание на следующие организационные и технические моменты:

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 быстрое действие реализуемого ТОиР.

### Библиографический список

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. – 214 с.

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОПОР ПРОХОДНОЙ РОЛИКОВОЙ ПЕЧИ СТАНА 600

Для транспортировки полос через подогревательную печь предусмотрен печной рольганг, состоящий из 85 приводных водоохлаждаемых роликов. Регулирование, скорости печного рольганга в диапазоне 0,28...1,69 м/с осуществляется за счет изменения частоты вращения электродвигателей постоянного тока типа ДП. Приводной ролик имеет цельную водоохлаждаемую бочку, выполненную из цельной трубы углеродистой стали, с отделкой шеек под опорные радиальные сферические подшипники и цилиндрический редуктор привода ролика. Охлаждение ролика выполнено по принципу противотока, вода подводится в полость ролика по внутренней трубе 88 × 5 и движется обратно в ту же сторону по кольцевой щели для сброса.

Для централизованной густой и жидкой смазки механизмов рольганга используется оборудование маслоподвала № 2 с разведением трубопроводов по точкам питания. Разводка трубопроводов водоохлаждения обеспечивает подвод воды для охлаждения бочек, а также для охлаждения горелочных плит, отбойников, торцевых экранов печи и радиационных пирометров [1, 2].

Ролики печного рольганга работают в очень сложных условиях. Опоры роликов вынесены за пределы действия высоких температур, но, тем не менее, подвержены существенному влиянию повышенных температур. Конструкция печного ролика предусматривает водяное охлаждение. В силу несовершенства системы: изношенность, факторы загрязнения теплоносителя, наличие шламов, зарастание активного сечения «накипь». Все эти факторы приводят к перегреву подшипниковых опор, выгоранию смазки ее закоксовыванию и выходу из строя. Другим отрицательным фактором является перегрев ролика и под действием нагрузки, его прогиб, а как следствие нарушение параллельности осей ролика и опоры в дальнейшем выход подшипника из строя.

Рольганг содержит 85 роликов, особенно в тяжелых температурных условиях работают опоры со стороны привода. Осмотр и проверка всех роликовых опор весьма трудоемок. Для повышения надежности контролирования и своевременного реагирования на негативные факторы можно предложить систему мониторинга состояния роликовых опор [3, 4].

Предлагаемая система включает набор датчиков, интерфейсную систему желательна беспроводную и пакет программ для приема, накопления и системы предупреждения о состоянии опоры. При этом каждая опора идентифицируется уникальным кодом. С целью снижения информационного потока предлагается передавать только информацию в случае нештатной ситуации, при выходе контролируемых параметров за рамки рабочих диапазонов. При этом должен идентифицироваться конкретный ролик и предупреждать оператора о неисправности.

На первом этапе реализации предлагаемой системы можно ограничиться контролем рабочей температуры. Для этого система должна строиться с возможностью масштабирования и дальнейшего расширения возможностей. Предложение о датчике температуры обосновывается тем, что этот показатель обладает достаточной информативностью для рассматриваемого узла. С другой стороны это самый простой, а значит дешевый датчик.

Система датчиков может управляться платформой Ардуино – это уже созданная программная платформа, и самой главной составляющей у неё является небольшая по размерам плата имеющая входы и выходы, разработанная на основе Processing/Wiring.

Данное устройство буквально совершило взрыв среди инновационных разработок. Данная плата содержит все требуемые компоненты: устройство памяти, процессор, контроллер, средства ввода/вывода. Также имеет большое количество выводов и вводов, для под-

ключения всевозможных датчиков. Присутствуют разнообразные механизмы и специальные устройства исполнители.

Преимущество платформы состоит в том, что вам не обязательно быть специалистом в области программирования или изучать специальную информацию для обращения с микроконтроллером. Простой проект можно осуществить без владения какими-либо специальными навыками. Микроконтроллеры, которые используют в Ардуино, оснащены прошитым загрузчиком, что позволяет не использовать программатор. Плату нужно подключить напрямую к компьютеру с помощью USB и можно загружать программу [5].

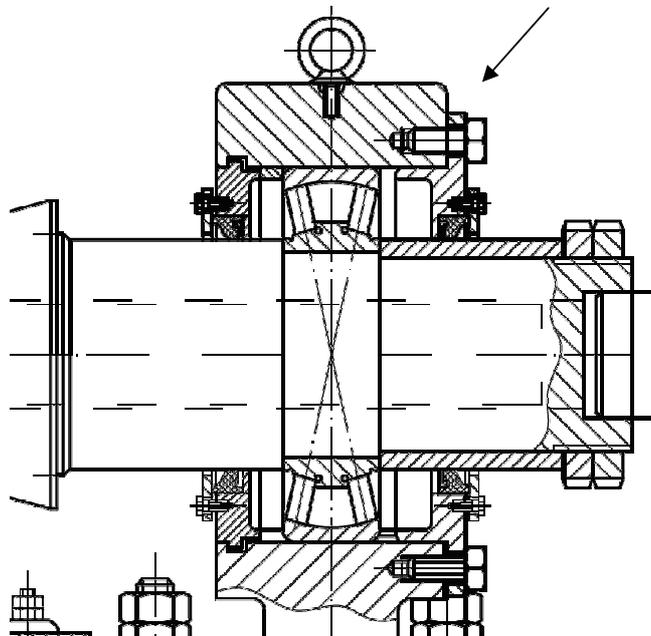


Рисунок 1 — Место установки датчиков



Рисунок 2 — Датчик температуры

На рисунке 1 показана опора ролика и место установки датчика. Датчик представлен на рисунке 2. Диапазон рабочих температур  $-55 \div +150^{\circ}\text{C}$ , материал корпуса – латунь, соединительный размер: M10×12, длина 28 мм.

Для обеспечения связи потребуется роутер, учитывая длину проходной печи  $L = 110\text{ м}$  возможно использовать один роутер радиусом действия не менее 200 м. Для накопления и фиксации, получаемой информации создается СУБД, под управлением операционной системы. Программный модуль содержит настройки для идентификации датчиков, настраивания частоты опрашивания датчиков при этом максимальная длительность обработки одного датчика не более 10 мс. Таким образом, скорость обработки показаний существенно превышают технически обоснованное время опроса, которое может составлять 20 – 30 мин.

При возникновении ситуации перегрева опоры, оператору выдается сообщение о произошедшем, содержащее: номер опоры, температуру, время, дату. Эта же информация заносится в протокол для контроля.

Опора, имеющая повышенную температуру может быть подвергнута дополнительному исследованию с помощью средств вибродиагностики. Такой подход к мониторингу выгодно отличается по капитальным затратам от варианта автоматического виброисследования так как стоимость контрольно-измерительного комплекса существенно выше.

### **Библиографический список**

1. И. В. Гурей, Журнал «Мир техники и технологий», 06/2002.
2. Целиков А.И. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. – М.: Металлургия, 1981.
3. Федорищев В.В. Визуальный и измерительный контроль состояния оборудования. – СПб.: Изд-во СЕВЗАП УЧ ЦЕНТР, 2008. – 87 с.
4. Мынцов А.А., Мынцова О.В., Кочнев М.Н. Системы диагностирования агрегатов роторного типа [Электронный ресурс] // www.promservis.ru: сайт ЗАО «ПромСервис». 1992 – 2013.
5. <https://arduino.ua/cat2-rduinokontrolleri>.

## СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.74

*старший преподаватель Медведчук С. А.,  
д.т.н., проф. Гутько Ю. И.,  
студент Слота Д. В.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВАКУУМНО-ПЛЕНОЧНОЙ ФОРМОВКИ

Рассмотрен принцип проектирования универсальной литейной технологии производства крупных отливок применительно к вакуумно-пленочной формовке [1, 2]. Использование способа вакуумно-пленочной формовки (ВПФ), в сравнении с другими способами формовки (ПГС, ХТС и др.), при изготовлении ответственных, высоконагруженных отливок, даже при использовании не совсем эффективных литейных технологий, разработанных по «старым лекалам» показало его более высокую эффективность [3, 4].

Предложен универсальный принцип построения литейной технологии для корпусных отливок, применительно к уже работающему, не совсем подходящему для такого типа отливок, оборудованию и оснастке. Наиболее подходящим видом технологического оборудования и оснастки, для производства таких корпусных отливок, является производство форм с вертикальным разъемом, либо форм, хотя бы, с возможностью их заливки под наклоном. Такой разъем форм, в отличие от горизонтального, позволяет осуществлять подвод жидкого металла в разные части формы сифоном с последующим его перераспределением в верхние части отливки по мере ее заполнения. Позволяет уйти от дефектов, присущих чаще всего при ВПФ, появляющихся в поверхностном слое нижней части отливки, либо порой, поражающих ее тело в любом другом месте.

Предлагаемая универсальная литейная технология, построенная с учетом ранее описанных рекомендаций, позволяет при горизонтальном разьеме формы осуществлять необходимый принцип заливки формы сифоном – одновременно во все фланцы, с перераспределением жидкого металла, по мере заполнения формы, снизу вверх. Расположение литейных каналов в теле стержня, многократно снижают риски размыва самой формы [5]. При построении и расчете такой литниковой системы, необходимо в обязательном порядке выдерживать суммарное соотношение сечений каналов литниковой системы. Конструкция такой литниковой системы состоит из двух независимых систем замкнутой и разомкнутой. Применение технологических ребер позволяет создать эффект наклона формы, а плавное перераспределение потока жидкого металла создает благоприятные условия направленной кристаллизации металла.

Использование такой технологии при производстве отливок типа (рама боковая), предусматривает обязательный наклон формы во время заливки формы металлом [5].

### Библиографический список

1. А. Э. Вирт, А. М. Лаврентьев, «Расчет литниковых систем стальных отливок», Камышинский технологический институт, 2012 г.
2. Б. С. Чуркин, «Конструирование и расчет литниковых систем и прибылей для отливок» Учебное пособие, ФГАОУ ВПО «Российский Государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург, 2012 г.
3. В. П. Кузнецов, ВАКУУМ – ПРОЦЕСС, КНИГА «НОУ – ХАУ», ДСП, 1982 г.
4. А. Л. Близнюк, Н. П. Макеев и др., «Рекомендации по изготовлению точных литых заготовок в вакуумируемых формах», ВОРОШИЛОВГРАДПТИМАШ, 1986.
5. Н. Д. Феклин, «Базовые основы разработки литейной технологии на отливки «боковая рама». Технология вакуумно-пленочной формовки», Союз-Литье, Информационный ресурс по литейному производству, 07.07.2018.

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,  
аспирант Хованская В. А.,  
магистр Крымов И. А.,  
магистр Волотов И. В.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ*

*к.т.н., доц., Свиноров Ю. А.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

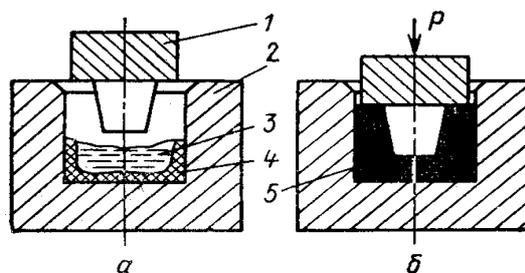
## ОТЛИВКИ ИЗ СИЛУМИНОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЛИТЬЕМ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ – МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА

Приведены сведения о структуре и механических свойствах отливок полученных литьем с кристаллизацией под давлением (пуансонное прессование). Литьем с кристаллизацией под давлением (ЛКД), используя схему пуансонного прессования [1], изготавливают втулки, отливки типа стакана, заготовки корпусных деталей и поршней.

При пуансонной схеме прессования расплав 3 (рис. 1) свободно заливают в матрицу 2, смонтированную на столе гидравлического пресса, и затем под действием выступающей части пуансона 1 выдавливают вверх до полного заполнения рабочей полости пресс-формы. Отливка 5 затвердевает под давлением прессующего пуансона. Особенностью схемы пуансонного прессования является то, что пуансон своей выступающей частью вначале соприкасается с расплавом 3 и вытесняет его выше уровня заливки. Пуансон не соприкасается с вертикальной коркой 4, образовавшейся до его внедрения в незатвердевший сплав. Таким образом, формообразование (оформление контуров) отливки 5 частично происходит при заливке расплава в матрицу и выдержке в ней до подхода пуансона, а заканчивается после внедрения последнего в расплав.

Опыты проводили на отливках типа стакана с наружным диаметром 60 мм, высотой 60 мм и толщиной стенки 5, 10, 15 и 20 мм, изготавливаемых из алюминия А7, алюминиевых сплавов АК7ч (АЛ9), АК12 (АЛ2) и АК18. Алюминий и сплавы на его основе переплавляли в графито-шамотных тиглях вместимостью 0,9 кг, не дегазировали и не рафинировали. Непосредственно из тигля расплавы заливали в матрицу пресс-формы, установленную и закрепленную на столе гидравлического пресса Д2430Б с номинальным усилием 1 МН. Были приняты следующие режимы литья и прессования: температура заливки на 60...80°C превышала температуру ликвидус (кристаллизации) сплава; температура матрицы 60...120°C; температура пуансона 20...40°C; время выдержки расплава в матрице до внедрения пуансона 3...4 с; давление прессования 150±10 МПа; время прессования (выдержки под давлением) 1,0...1,5 с на 1 мм толщины стенки. Рабочие поверхности матрицы и пуансона смазывали минеральным маслом.

Исследование микроструктуры отливок показало, что она изменяется (для одного и того же сплава) при увеличении толщины стенки и по высоте стенки одной и той же толщины [2, 3]. Так, расстояние между осями дендритов второго порядка  $d_{II}$  возрастает от 30 до 40 мкм (сплав АК7ч) и от 25 до 32 мкм (сплав АК12) при увеличении толщины стенки от 5 до 20 мм, при этом величина  $d_{II}$  незначительно (на ~5 мкм) изменяется по толщине стенки (при переходе от наружной поверхности к внутренней). В верхних зонах стенки величина  $d_{II}$ , как правило, меньше, чем в нижних; это различие достигает 10...15 мкм. Например, в отливках с толщиной стенки 5 мм в верхних зонах величина  $d_{II} = 20$  мкм, в нижних – 35 мкм (сплав АК7ч), а с толщиной стенки 20 мм – соответственно 25 и 40 мкм.



1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – расплав; 4 – затвердевшая корка; 5 – отливка

Рисунок 1 — Схема пуансонного прессования при ЛКД: *a* – перед внедрением пуансона; *б* – выдержка под давлением

В отливках из сплава АК12 это различие меньше: 25 мкм (верхние зоны) и 30 мкм (нижние зоны) при толщине стенки 5 мм; 25 мкм (верхние зоны) и 35 мкм (нижние зоны) при толщине стенки 20 мм. Твердость отливок находится в пределах: 70...100 НВ (сплав АК7ч), 70...120 НВ (сплав АК12) и 105...140 НВ (сплав АК18).

Прочностные и пластические характеристики отливок с толщиной стенки 10 мм определяли на нестандартных образцах, вырезанных из вертикальных стенок и сохранивших с двух сторон литейную поверхность; их размеры следующие: длина 55...60 мм, толщина 9...10 мм. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Механические свойства отливок с толщиной стенки 10 мм (литое состояние)

Сплав	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
АК7ч	55,2	183,4	8,6
АК12	50,6	206,7	4,5
АК18	67,0	165,1	1,4

Проанализирована удаленность места разрушения разрывных образцов от нижнего торца отливки. Известно [1], что при пуансонном прессовании возможно образование спаев, распространяющихся от наружной поверхности в глубь стенки отливки по уровню заливки расплава в матрицу пресс-формы. В проведенных опытах для отливок с толщиной стенки 10 мм этот уровень соответствовал  $38 \pm 3$  мм от дна матрицы (и, следовательно, от нижнего торца отливки), а толщина дна была  $10 \pm 3$  мм. Разрыв образцов происходил на следующем расстоянии от нижнего торца отливки: 23 мм (сплав АК7ч), 13 мм (сплав АК12) и 21 мм (сплав АК18). Видно, что разрыв происходил не по уровню заливки расплава в матрицу, что косвенно свидетельствует об отсутствии в них спаев, указанных выше.

Таким образом:

1) установлены закономерности затвердевания отливок из силуминов при пуансонном прессовании. Показано, что с увеличением толщины стенки от 5 до 20 мм возрастает время затвердевания отливок, что приводит к незначительному укрупнению структуры в целом и отдельных ее составляющих;

2) даже при отсутствии дегазирующей и рафинирующей обработки расплава механические свойства отливок, прессованных при затвердевании, выше требований ГОСТ 1583-93.

### Библиографический список

1. Батышев К. А. Литые с кристаллизацией под давлением. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 167 с.
2. Батышев К. А., Семенов К. Г., Свинооров Ю. А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Издательство «Первый том», 2020 г. – 150 с.
3. Литейное производство: учеб. / В. Д. Белов [и др.]; под общ. ред. В. Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: изд. Дом МИСиС, 2015. – 487с.

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,  
старший преподаватель Демьянов Е. Д.,  
к.т.н., доц. Семенов К. Г.,  
аспирант Хованская В.А.,*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва, РФ*

*д.т.н., проф. Гутько Ю. И.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

## ПОЛУЧЕНИЕ ЦИНКОВЫХ СПЛАВОВ ИЗ НИЗКОСОРТНОГО ЛОМА

Приведены сведения о результатах исследования по использованию легкоплавких флюсов для получения вторичных цинковых сплавов из низкосортной шихты.

Поступающие на переработку лом и отходы предлагается условно классифицировать по физическому состоянию, качеству поверхности и степени загрязнения на следующие группы:

1. разобранный карбюраторный лом, состоящий из деталей с чистой, не окисленной поверхностью;
2. разобранный карбюраторный лом, состоящий из деталей с поверхностью загрязненной маслом, песком и с проявлениями начальной стадии коррозии;
3. узлы в сборе с чистой поверхностью, содержащие вставки и детали из алюминиевых, железных и медных сплавов;
4. узлы в сборе с поверхностью загрязненной маслом, песком и с проявлением начальной стадии коррозии, содержащие вставки и детали из алюминиевых, железных и медных сплавов;
5. узлы в сборе с окисленной поверхностью, содержащие вставки и детали из алюминиевых, железных и медных сплавов;
6. узлы в сборе с загрязненной и сильно окисленной поверхностью, содержащие вставки и детали из алюминиевых, железных и медных сплавов;
7. детали с хромированным покрытием (решетки радиаторов, накладные декоративные элементы, дверные ручки и др.).

Сортировка исходного сырья заключается в визуальной оценке материала, в соответствии с предложенной классификацией, отборе однотипных деталей в отдельные короба, т. е. разделению поступившего лома по степени загрязнения. При этом, проводится очистка деталей от грунта, особенно от песка, чтобы избежать накопления в сплаве примесей кремния более допустимых пределов. Узлы и агрегаты, по возможности разбирают и освобождают цинковый лом от деталей из железных, медных и алюминиевых сплавов [1].

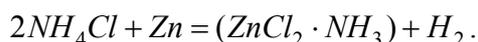
При подготовке шихты из нее необходимо удалять все паяные изделия: электроконтакты, клеммы, латунные поплавки с полудой и пайкой и т.п., только в этом случае сплав можно защитить от попадания в него олова.

В процессе расплавления шихты, включающей лом соответствующий 3 – 6 группам классификации, с поверхности расплава удаляются алюминиевые детали, вытесняемые из-за значительно меньшей плотности, а железные и медные вычерпываются шумовками. Одновременно расплав подвергают рафинированию [2].

Для рафинирования металла от неметаллических и оксидных включений, шпинели ( $ZnAl_2O_4$ ) и глинозема ( $Al_2O_3$ ) применяли легкоплавкие флюсы на основе хлористого цинка, хлористого аммония и тетрабората натрия.

Введение в расплав легкоплавких флюсов осуществлялось путем замешивания солевой смеси в расплав с погружением под зеркало расплава. Взаимодействие хлористого аммония с оксидом цинка, находящимся в густых окисленных шлаках, происходит с разрушением пенообразного состояния шлаков и образованием на поверхности расплава дополнительного

количества легкоплавкого флюса ( $ZnCl_2 \cdot NH_3$ ). Такой же флюс образуется также при взаимодействии хлористого аммония с цинком:



Суммарный расход флюсов, для достижения свойств сплава на стандартном уровне, составляет до 2 % от массы металлозавалки, при использовании в шихте карбюраторного лома соответствующего первой группе. Установили, что по мере снижения качества шихты (2 – 7 группы) эффективность действия легкоплавких флюсов существенно снижается. Это связано с тем, что в рафинировании металлического расплава активно участвует только часть легкоплавкого солевого флюса. Остальная масса флюса, видоизменяя свое агрегатное состояние, испаряется, ошлаковывается или реагирует с футеровкой печи, ухудшая технологические и экологические условия плавки.

Опытным путем было установлено, что только 30 – 40 % солей от общей массы флюса в зависимости от температуры металлического расплава, времени контакта с металлом и качества исходных шихтовых материалов участвует в физико-химических процессах плавки. Остальная масса солей спекается, коагулирует (окомковывается), образует отдельные твердые массивы (куски), покрытые сверху шлаком, окислами и, отчасти, тонкими пленками металла. При дроблении этих кусков шлака обнаруживается, что внутри они содержат конгломерат спекшихся солей, ноздреватый, серого цвета. Солевая фракция шлаков легко растворяется в воде, в то время как окислы, шпинели и другие составляющие шлаков в воде не растворяются.

Для снижения теплопроводности флюсового покрова, использовали комбинированный флюс, состоящий из механической смеси легкоплавких солей и огнеупорных, нетеплопроводных наполнителей [3]. В результате экспериментов с количественным составом комбинированного флюса, размерами частиц наполнителя достигли снижения теплопроводности образующегося покрова до 0,3 – 0,5 Вт/(м·К).

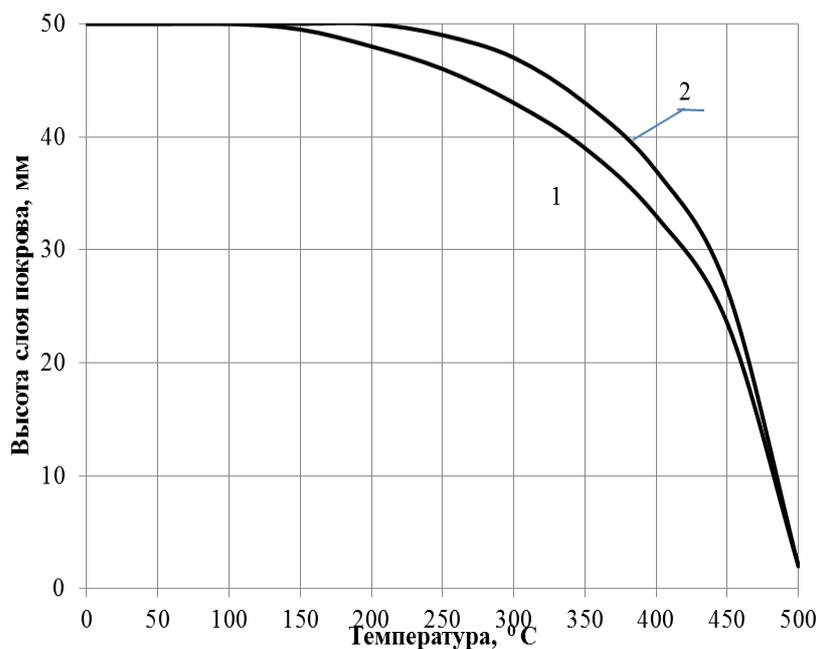
В самом деле, прямые измерения температуры в слое комбинированного флюса при плавке сплава ЦАМ 4-1 в печи САТ 0,25 на ванне расплава массой 450 кг и прогретой до температуры 490 – 500°C, показали, что температурное поле по всему объему флюса, в зависимости от времени выдержки, имеет вид представленный на рисунке 1.

Поверхность, образовавшегося покрова, нагревается от 100 – 120°C максимально до 200 – 220°C, при этом на границе расплава и флюса температура сохраняется на уровне 490 – 500°C, т. е. после прогрева флюса наступает стационарный режим, при котором обеспечивается значительный перепад температур по высоте слоя флюса, теплопередача от металла в атмосферу печи снижается.

Комбинированный флюс сплошным слоем покрывает зеркало металла, полностью предотвращая потери тепла излучением, образуя своеобразный «свод», плавка идет как в «закрытой» печи, тем самым обеспечивается ускорение процесса расплавления шихты, что позволяет эффективно производить порционную загрузку цинкового лома. Создается благоприятный тепловой режим для достаточно глубокого рафинирования расплава, солевая композиция флюса расходуется только на очистку расплава от неметаллических включений и газов.

Кроме того, при замешивании комбинированного флюса в расплав снижается интенсивность дымообразования, а при выстаивании металла интенсивность дымообразования резко сокращается, вплоть до практически полного прекращения.

Оценка механических, технологических и эксплуатационных свойств чушковых цинковых сплавов, полученных из вторичного сырья, подвергнутого тщательной сортировке, с обработкой комбинированным флюсом при плавке, показала, их пригодность для производства фасонных отливок ответственного назначения при литье в кокиль и под давлением.



1 – после выдержки в течении 15 мин; 2 – после выдержки в течение 45 мин

Рисунок 1 — Распределение температуры в массе комбинированного флюса при плавке цинкового сплава

Таким образом, установлено, что внедрение предлагаемой технологии приводит к повышению выхода годного по металлу; экономии электроэнергии при плавке на 8 – 10 %, значительному улучшению товарного вида чушек; чистой экономии металла на одну тонну выплавленного сплава составляет 40 – 45 кг. При этом, улучшается экологическая ситуация на рабочих местах плавильщиков и в промышленной зоне предприятий за счет уменьшения вредных выбросов летучих веществ.

### Библиографический список

1. Колосков С. В., Колосков В. Ф., Филиппов С. Ф. Анализ технологического опыта металлургического производства качественных цинковых сплавов из низкосортного вторичного сырья // Литейщик России, 2004, №3, С. 34–36.
2. Колосков С. В., Демьянов Е. Д., Зуйков С. В., Юсипов Р. Ф. Технологические особенности получения сплава ЦАМ4-1 при переплаве низкосортного вторичного сырья // Металлургия машиностроения, 2018, №3, С. 12–15.
3. Литейное производство: учеб. / В. Д. Белов [и др.]; под общ. ред. В. Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: изд. Дом МИСиС, 2015. – 487с.

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,  
старший преподаватель Демьянов Е. Д.,  
аспирант Хованская В. А.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва, РФ*

*д.т.н., проф. Гутько Ю. И.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

## ПОЛУЧЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ИХ НИЗКОСОРТНОГО СЫРЬЯ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

Приведены сведения по использованию экологически чистых комплексных флюсов для обработки цветных металлов. В качестве шихтовых материалов использовался вторичный алюминиевый сплав АК12 и шлаковые съёмы с плавильной печи. Для рафинирования расплавов на основе алюминия, защиты металла от окисления, минимизации потерь алюминия со шлаком, в расплав вводится 0,1...0,5 % флюсов от массы расплава. При переплаве низкосортного сырья (стружечных и шлаковых отходов алюминиевых сплавов, алюминиевой тары, металлолома), расход составляет от 1,0...3,0 % до 3,0...10,0 % от массы металлозавалки в зависимости от дисперсности и загрязнённости шихты.

В результате исследований, сформулированы принципы подбора составов комплексных флюсов для обработки цветных сплавов:

~50% гранулы огнеупорного, теплоизоляционного материала;

~50% рафинирующая составляющая из смеси легкоплавких солей, состав которой в основном определяется обрабатываемым сплавом.

При замешивании флюса в расплав огнеупорная составляющая создает на поверхности расплава покровно – защитный теплоизолирующий слой, препятствующий взаимодействию расплава и легкоплавких солей с печной атмосферой, сокращающий выбросы вредных веществ в атмосферу и обеспечивающий протекание реакций при требуемой температуре.

Кроме того, комбинированный флюс, обладает повышенной экологической чистотой: содержит минимальное количество солей 30 % от массы стандартных солевых флюсов, которые расходуются на рафинирование сплава, а остаточная летучая фракция в основной массе задерживается в охлаждённых верхних слоях покрова; предохраняет рабочую зону печи от вредных испарений легирующих компонентов; общая загрязнённость воздушной среды вредными летучими веществами при плавке цветных сплавов находится ниже ПДК [1].

Эффективность такого подхода к разработке комплексных флюсов была подтверждена при выплавке вторичного сплава ЦАМ4-1 из низкосортного вторичного сырья [2, 3].

Его применение позволило сократить расход электроэнергии при плавке на 8...10 %, сэкономить на 1 тонну выплавленного сплава 40...45 кг металла.

В настоящее время выполняются работы по отработке технологии обработки комплексными флюсами расплавов при переплаве низкосортного алюминиевого сырья.

В качестве шихтовых материалов использовался вторичный сплав АК12 и шлаковые съёмы с печи, собранные при плавке этого сплава в цехе, при проведении лабораторных работ. Изучали влияние дисперсности и загрязнённости шихты на эффективность рафинирования комплексным флюсом.

Шлаковые съёмы отсортировали в четыре группы:

– тяжелые куски, неоднородные конгломераты плотных блестящих составляющих с видимыми включениями чистого сплава (всплески, капли и т. п.);

– легкие, однородные пенистые куски, матового цвета без видимых включений чистого сплава (всплески, капли и т. п.) и засоров (кусочки стержневой и формовочной смеси, асбестовые обломки от теплоизоляции);

– в основном легкие, однородные пенистые куски и небольшое количество более тяжелых кусков, все без видимых включений чистого сплава и засоров;  
 – более тяжелые куски, неоднородные конгломераты пенистых матовых и более плотных блестящих составляющих без видимых включений чистого сплава и наличия различных засоров (кусочки стержневой и формовочной смеси, асбестовые обломки от теплоизоляции).

Плавку вели в печи сопротивления с шамотно – графитовым тиглем (марка АА30Т). Вначале наводили болото из вторичного сплава АК12, перегревали расплав до 720...740°C и подавали отсортированные шлаковые съёмы с печи на зеркало расплава постепенно погружая их в расплав. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты экспериментов

№	Тип съёмов	Кол-во флюса, %	Всего болота, кг/%	Всего съёмов, кг	Выход вторичного сплава, кг	Выход вторичного сплава, %
1	1	0,38/0,43*	4,4/56**	3,50	2,900	85
2	2	0,50/0,65	4,1/62	2,55	1,915	74
3	3	0,50/0,50	3,5/50	3,50	2,550	73
4	4	0,50/0,40	3,0/37	5,20	3,610	70

\* – от металлозавалки/расход солей на съёмы;

\*\* – масса болота/% болота от металлозавалки.

При полном расплавлении и достижении температуры 730°C, в расплав вводили навеску комплексного флюса, постепенно замешивая его в расплав. Под образовавшимся покровом расплав выдерживали 10 мин. Снимали покровный слой и сливали расплав в изложницы.

#### **Выводы**

Обработка расплава комплексным флюсом, позволяет извлечь из шлаковых съёмов 70 – 85 % вторичного сплава, в зависимости от содержания шлаков в съёмах и степени их загрязнения, при этом расход комплексного флюса на металлозавалку не превышает 0,50 %.

Если исходить из расхода рафинирующих солей в составе флюса, на массу загружаемых шлаковых съёмов он составляет 0,40...0,65 %, что позволяет говорить о достаточности болота на уровне 30...35 % от металлозавалки.

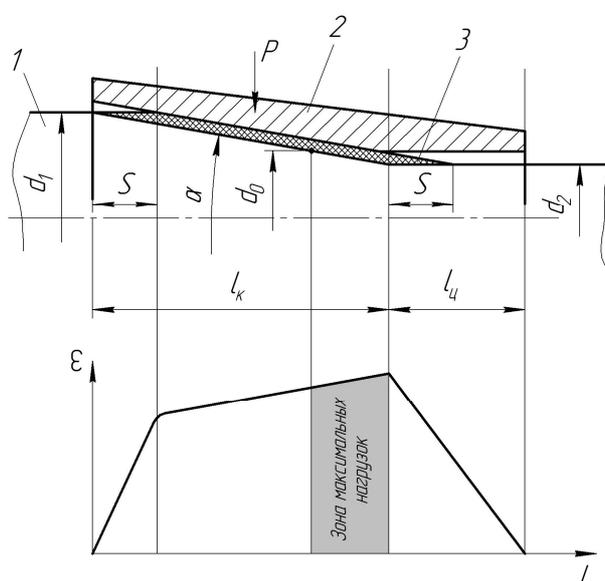
#### **Библиографический список**

1. Филиппов С. Ф., Колосков С. В. Применение комбинированных флюсов повышенной экологичности для плавки цветных сплавов / *Металлургия машиностроения*, 2018, № 4, С. 10–12.
2. Колосков С. В., Демьянов Е. Д., Зуйков С. С., Юсипов Р. Ф. Технологические особенности получения сплава ЦАМ4-1 при переплаве низкосортного сырья / *Металлургия машиностроения*, 2018, № 3, С. 16–20.
3. *Литейное производство: учеб.* / В.Д. Белов [и др.]; под общ. ред. В.Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: изд. Дом МИСиС, 2015. – 487с.

## ПРИМЕНЕНИЕ БОЙКОВ С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ ЗАХОДНОГО КОНУСА ДЛЯ РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ

Радиальное обжатие характеризуется перемещением небольших объемов металла заготовки относительно рабочей поверхности бойков на сравнительно малых участках. Основная работа формообразования происходит в заходном конусе (рабочей части) бойка [1].

Деформационные явления имеют неравномерное распределение по длине заходного участка. В очаге деформации металл течет в обе стороны от нейтральной поверхности  $d_0$  – границы раздела течения металла в сторону сужения и расширения конуса. При этом максимальные нагрузки наблюдаются в конечной точке заходного конуса бойка – на участке сопряжения конического и цилиндрического участков (рис. 1).



1 – заготовка; 2 – боек; 3 – смещаемый металл;  $d_1$  – начальный диаметр заготовки;  $d_2$  – конечный диаметр;  $\alpha$  – угол заходного конуса бойка;  $S$  – шаг подачи;  $d_0$  – диаметр нейтральной поверхности;  $l_k$  – длина заходного конуса;  $l_c$  – длина калибрующего участка;  $L$  – общая длина очага формообразования

Рисунок 1 – Изменение степени деформации  $\epsilon$  на длине очага формоизменения  $L$  [1]

Одним из недостатков базовой конструкции обжимных бойков (рис. 2, а), в которых рабочая часть выполнена в виде конического участка, является возрастание неравномерности деформаций обрабатываемого материала по мере приближения к калибрующему участку, что приводит к повышенной нагрузке и износу конечного участка рабочей части [1, 3].

Предложенный в авторском свидетельстве [2] профиль заходной части бойка, который разбит на несколько усеченных конусов (рис. 2, б), позволяет в процессе обжатия более равномерно распределить объемы деформируемого металла на всей длине рабочего участка. Однако недостатком данной конструкции является дискретное изменение углов конусности, что приводит к возникновению концентраторов напряжений, которыми являются места сопряжений конусов с разными углами. Для устранения этого недостатка в авторском свиде-

тельстве [3] приведена конструкция бойков с переменным углом заходного конуса, профиль которого выполнен в виде части тора и образован вращением дуги окружности вокруг оси рабочей полости (рис. 2, в).

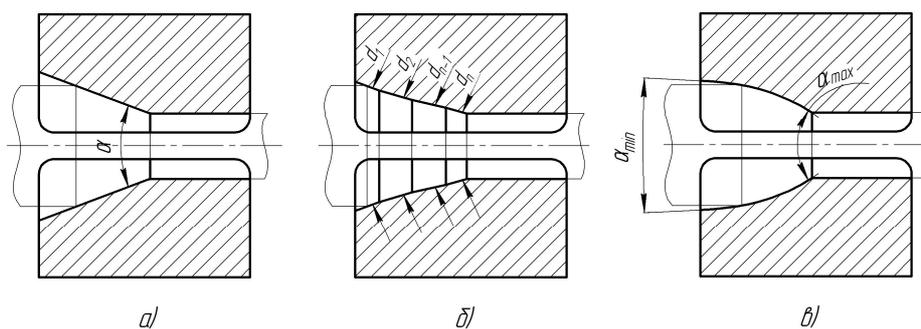


Рисунок 2 – Радиально-обжимные бойки: а) базовое исполнение с постоянным углом заходного конуса  $\alpha$  ; б) с плавно увеличивающимися углами конусности [2]; в) с переменным углом заходного конуса [3]

При обжатии бойками с переменным углом заходного конуса в зону с максимальным углом  $\alpha_{\max}$ , где неравномерность деформации максимальная, заготовка поступает уже предварительно деформированной и имеет радиусную форму предыдущего участка. Это приводит к более равномерному распределению деформаций в объеме металла на участке заходного конуса, что повышает качество получаемой поковки. В таких бойках исключено дискретное изменение углов заходного конуса, следовательно, отсутствуют концентраторы напряжений.

Из представленного конструктивного решения можно сделать вывод, что применение бойков с переменным углом заходного конуса дает следующие преимущества [1, 3]:

1. Повышение качества поковок за счет получения большей равномерности деформаций в объеме металла.
2. Повышение стойкости обжимного бойка путем устранения концентраторов напряжений.
3. Уменьшение необходимого усилия обжатия.

Однако при проектировании бойков с переменным углом заходного конуса не уделяется достаточного внимания математическому расчету профиля рабочей части бойка, а также методике определения усилия обжатия [1], что делает результат расчета справедливым только при определенном значении угла заходного конуса  $\alpha$  в конкретной точке очага формообразования.

### Библиографический список

1. Радюченко Ю. С. Ротационное обжатие / Ю. С. Радюченко. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с., ил.
2. А. с. 233412 СССР, МПК В 23К 3/02. Бойки для ротационного обжатия / Ю. С. Радюченко, Н. Т. Деордиев (СССР). – 1089888/25-27; заявл. 08.07.66; опубл. 18.12.1968, Бюл. 2. – 2 с., ил.
3. А. с. 1590187 СССР, МПК В 21 J 13/02. Инструмент для радиальнойковки цилиндрических заготовок / И. Г. Трофимов, В. Л. Боев, А. М. Меркулов и др. (СССР). – 4392069/25-27; заявл. 15.03.88; опубл. 07.09.90, Бюл. № 33. – 2 с., ил.

*к.т.н., доц. Свиноров Ю. А.,*

*д.т.н., проф. Гутько Ю. И.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,*

*к.т.н., доц. Семенов К. Г.*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВЯЗУЮЩИХ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЛИГНИНА В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Практика работы промышленных предприятий показывает, что технические решения, базирующиеся на концепции ресурсосбережения [1], позволят получать более дешёвые, экологически чистые, а значит и конкурентно способные, качественные отливки [1, 2]. Коснемся области использования связующих материалов, как главной составляющей современного технологического процесса изготовления литья [3]. На промышленных предприятиях, где они применяются как компонент технологии, а это: литейное производство, металлургия, производство древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит, фанеры, в строительной индустрии и автопроме. Перспективным направлением в разработке новых связующих материалов является использование технических лигнинов, их основного представителя на рынке связующих – технических лигносульфонатов (ЛСТ). ЛСТ являются продуктом переработки крупнотоннажного отхода целлюлозно-бумажной промышленности России. Они положительно отличаются от неорганических материалов повышенной технологичностью на завершающих этапах производства литья (податливость литейных стержней и элементов формы, обладающих облегченной выбиваемостью и регенерируемостью).

Изучая разработанные способы повышения связующей способности лигносульфонатных связующих, целью исследования являлось рассмотрение практических аспектов их применения в технологических процессах литья, как инструмента повышения ресурсоэффективности литейной технологии.

Наиболее значимыми способами повышения связующей способности ЛСТ, с точки зрения успешного использования в технологических процессах литья, есть их модифицирование неионогенными ПАВ и механоактивация.

Оценивая уровень полученных результатов и набор существующих технологий применения связующих материалов, а так же учитывая специфику лигносульфонатных материалов, состоящую в том, что это связующее на водной основе, требующее теплового воздействия для отверждения, целесообразно проанализировать всю «систему координат: возможности ЛСТ – технологии смесеприготовления» (табл. 1).

Наиболее рационально начать внедрение с технологий, где ЛСТ применяются традиционно (технологии производства стержней и форм отверждаемых конвективной сушкой) для производства чугунного литья.

Методы механоактивации или высокоэнергетической механической обработки ЛСТ целесообразно применять для улучшения показателей качества формовочных смесей. Механоактивация приводит к увеличению связующей способности ЛСТ с 0,4 до 0,9 МПа, т. е. в два раза, что открывает возможность использовать этот эффект для совершенствования составов формовочных смесей, как для производства чугунного так и для производства стального литья (табл. 2.). Разработаны экспериментальные составы облицовочных формовочных смесей, для формовки по-сухому ориентированные на производство мелкого фасонного чугунного литья (рис. 1).

Таблица 1 — Оценка возможностей практического применения ЛСТ, с повышенными прочностными свойствами в технологических процессах литья

Технологии смесеприготовления и отверждения литейных стержней и форм	Чугунное литьё	Стальное литьё	Примечания
Технологии отверждения конвективной сушкой	1. Разработан и внедрен в производство состав стержневой смеси для производства мелкого чугунного фасонного литья (метод модифицирования) 2. Разработан экспериментальный состав формовочной смеси со сниженным содержанием связующего КО и ускоренным циклом отверждения (метод механоактивации)	1. Разработан и опробован состав стержневой смеси для производства мелкого стального литья (метод модифицирования). 2. Разработан экспериментальный состав формовочной смеси со сниженным содержанием связующего КО и ускоренным циклом отверждения (метод механоактивации)	Экологический эффект, снижение вредных выбросов в окружающую среду, снижение себестоимости литья, за счет уменьшения использования связующего КО
Технологии отверждения в нагреваемой оснастке	Разработан состав стержневой смеси для производства стержней раструба (массой не более 10кг) в изготовлении чугунных водонапорных и канализационных труб (метод модифицирования)	Исследований не проводилось	Экологический эффект, снижение вредных выбросов в окружающую среду, снижение себестоимости литья, за счет уменьшения использования карбомидо-формальдегидных смол (КФ-О, КФ-МТ)
Технологии отверждения с продувкой горячим газом	Разработан состав стержневой смеси для производства стержней раструба (любой массы) в изготовлении чугунных водонапорных и канализационных труб (метод модифицирования)	Исследований не проводилось	Снижение себестоимости литья улучшении экологического состояния за счет применения модифицированных ЛСТ без использования смоляных связующих. Технологические трудности
Технологии ХТС	Проведены поисковые эксперименты для составов формовочных смесей (метод модифицирования)	Проведены поисковые эксперименты для составов формовочных смесей (метод модифицирования)	Трудность реализации в необходимости эффективных отвердителей
Технологии ЖСС	Исследований не проводилось	Исследований не проводилось	



Рисунок 1 — Пример реализации литейной технологии с применением лигнинных связующих

Таблица 2 — Сравнительная оценка облицовочных формовочных смесей для формовки по-сухому на основе ЛСТ обработанных методами высокоэнергетической механической обработки

Компоненты состава:	Составы и показатели качества			
	Экспериментальные составы			Базовый состав смеси, соответствующие показатели качества
	1	2	3	
Кварцевый песок марки 1К02Б, Верхнеднепровский, %	30	35	40	42
Горелая земля после регенерации, %	53	48	43	38
Формовочная глина, %	3	3	3	6 – 8
ЛСТ, %	4	4	4	4 – 8
Древесные опилки, %	10	10	10	10
Показатели качества				
Влажность, %	6,9	6,8	6,9	6,0 – 7,0
Газопроницаемость, ед.	100	100	100	101
Прочность в сыром состоянии МПа	0,25	0,27	0,31	0,27 – 0,33
Прочность в сухом состоянии, МПа	0,42	0,44	0,48	0,33 – 0,45
Продолжительность сушки, мин (при температуре 200 <sup>0</sup> С)	30	30	30	45

### Выводы

В результате проведенных исследований установили, что:

– создание малотоксичных связующих на основе ЛСТ со свойствами высокоэффективных связующих является эффективным инструментом для решения комплекса вопросов связанных с повышением ресурсоэффективности процессов литья;

– применение метода механоактивации ЛСТ приводит к рационализации состава формовочной смеси: возможно снижение объемов применения «свежего» формовочного песка за счет увеличения доли регенерата и сокращение использования формовочной глины в два раза. При этом продолжительность сушки может быть сокращена на 20 – 25 %, однако для более точных суждений по этому поводу необходимы дополнительные промышленные испытания;

– дана оценка возможностей практического применения ЛСТ, с повышенными прочностными свойствами в технологических процессах литья.

### Библиографический список

1. Батышев А. И., Батышев К. А. Образование в стальных отливках горячих трещин в зависимости от условий затвердевания. Часть III / Литейное производство №10, 2017г., с. 23–27.
2. M. Holtzer, M. Górny, R. Daňko, Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron castings. London, Springer (Eds.), 2015.– 348p.
3. Жуковский С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник. – М.: Машиностроение, 2010.–256 с.

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

В деталях гидравлики, топливной аппаратуры, коленчатых валах, форсунках, фильтрах и других деталях подобного служебного назначения весьма распространены глубокие отверстия малого диаметра. Глубокими принято считать отверстия с соотношением

$$\frac{L}{d} \geq 10,$$

где  $L$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр отверстия.

Как правило, они предназначены для подвода смазки к местам трения, топлива в камеры сгорания, рабочей жидкости к узлам гидроаппаратуры и т.п. Например, отверстия для подвода смазки к коренным и шатунным шейкам коленчатого вала двигателя Д37М при диаметре 8 мм имеют длину от 135 до 221 мм. (рис. 1).

Наиболее распространённым и хорошо изученным методом получения глубоких отверстий в настоящее время является обработка резанием – сверление. Однако, несмотря на непрерывное совершенствование оборудования и режущего инструмента, сверление глубоких отверстий, по-прежнему, сопряжено с технологическими проблемами, обусловленными сложностью подвода смазочно-охлаждающих технологических сред в зону резания и удаления стружки, низкой жёсткостью технологической системы и, как следствие, низкой производительностью и высокой вероятностью поломок инструмента.

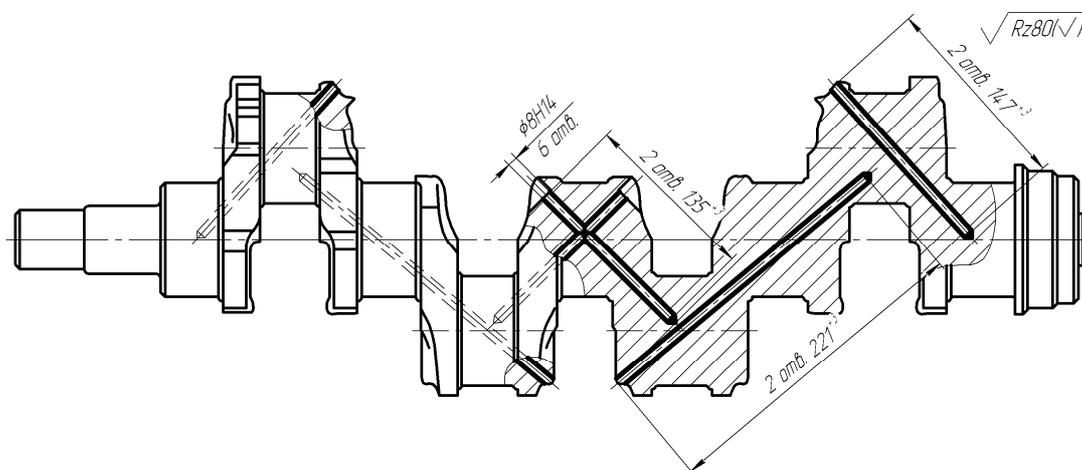


Рисунок 1 — Глубокие отверстия в коленчатом вале двигателя Д37М

Кроме того, обрабатываемые заготовки часто изготовлены из коррозионностойких, жаропрочных или вязких легированных сталей, что дополнительно затрудняет обработку резанием, а в ряде случаев делает её практически невозможной [1].

Таким образом, повышение эффективности обработки глубоких отверстий малого диаметра является актуальной научно-технической проблемой.

Целью данной работы является определение перспективных для дальнейшего исследования методов обработки глубоких отверстий малого диаметра. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Систематизировать известные методы обработки отверстий и установить их технологические показатели;
2. Выбрать критерии сравнения методов получения отверстий и разработать систему их количественного оценивания;
3. Провести сравнительный анализ пригодности выбранных методов обработки отверстий для получения глубоких отверстий малого диаметра и выбрать наиболее перспективные из них для дальнейшего исследования.

На современных машиностроительных предприятиях для получения отверстий в деталях машин применяются следующие технологические методы:

- обработка резанием (ОР) – сверление;
- электроэрозионная обработка (ЭЭО) – электроимпульсное прошивание;
- электрохимическая обработка (ЭХО) – размерное электрохимическое прошивание;
- светолучевая обработка (СЛО) – лазерное прошивание;
- ультразвуковая обработка (УЗО) – размерная ультразвуковая обработка свободным абразивом;
- электронно-лучевая обработка (ЭЛО) – размерная обработка электронным лучом;
- химическое травление (ХТ).

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества, недостатки и ограничения по применению [2].

Изучение доступной авторам конструкторской и технологической документации машиностроительных предприятий региона позволило систематизировать технические требования, предъявляемые к глубоким отверстиям для подвода рабочих жидкостей (РЖ) и сформулировать критерии оценки пригодности вышеперечисленных технологических методов для обработки глубоких отверстий. Для удобства анализа критерии оценки разделены на три группы.

Первую группу составляют критерии, характеризующие точность и качество обработки. К ним относятся:

- точность диаметральных размеров. Так как диаметр отверстий для подвода РЖ в большинстве случаев является свободным размером, то наиболее пригодными по этому критерию являются методы, обеспечивающие точность обработки в пределах 14 квалитета;
- качество поверхности отверстия,  $Ra$ , мкм;
- наличие поверхностного слоя с изменёнными свойствами (наклёпанного, обезуглероженного и т. д.). Данный дефект может снижать усталостную прочность детали;
- вероятность образования дефектов на кромках отверстия. Сколы, заусенцы, острые кромки в местах сопряжений и пересечений отверстий могут нарушать течение жидкости вплоть до изменения характера потока.

Во вторую группу включены требования к свойствам обрабатываемого материала:

- рекомендуемая твёрдость,  $HRC$ ;
- наличие определённых физических или химических свойств, например, электропроводности. Отсутствие или недостаточный уровень таких свойств делает применение технологического метода невозможным.

К третьей группе отнесены технологические показатели обработки:

- производительность,  $\text{мм}^3 / \text{мин}$ ;
- себестоимость. Учитывая нестабильную экономическую ситуацию, целесообразно применять относительную оценку себестоимости, приняв в качестве базы себестоимость обработки резанием (сверления).

Система количественного оценивания критериев выбора технологического метода обработки глубоких отверстий приведена в таблице 1.

На основании имеющихся данных о возможностях методов обработки [3], разработана матрица сравнительной оценки их пригодности для обработки глубоких отверстий малого диаметра (табл. 2).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время для получения отверстий в сплошном материале возможно применение ограниченного количества технологических методов обработки, различающихся по виду энергии, используемой для разрушения материала.

2. Предложен способ количественной оценки эффективности применения различных технологических методов обработки отверстий в конкретных конструкторско-технологических условиях.

Таблица 1 — Уровни критериев выбора технологического метода обработки глубоких отверстий

Критерии выбора технологического метода	Балльная оценка					
	0	1	2	3	4	5
1 Точность и качество обработки						
1.1 Точность диаметральных размеров, IT	< 6	6 – 7	8 – 9	10 – 11	12 – 13	14
	–	> 17	17	16	15	
1.2 Качество поверхности отверстия, Ra, мкм	< 0,63	0,8–1,25	1,6–2,5	3,2–5,0	6,3–10	12,5
	> 100	100–80	50–80	32–50	16–25	
1.3 Наличие поверхностного слоя с изменёнными свойствами	–	–	–	–	есть	нет
1.4 Вероятность образования дефектов на кромках отверстия	высокая	выше средней	средняя	ниже средней	низкая	отсутствует
2 Требования к свойствам обрабатываемого материала						
2.1 Рекомендуемая твёрдость, HRC	< 10	10 – 30	30 – 40	40 – 50	> 50	Без ограничений
2.2 Наличие определённых физических или химических свойств	Обязательно	–	–	–	–	Не требуется
3 Технологические показатели						
3.1 Производительность, мм <sup>3</sup> / мин	< 400	400 – 600	600 – 800	800 – 1000	1000 – 1200	> 1200
3.2 Удельная себестоимость (для условий серийного производства)	> 1,50	1,0–1,50	1,0	1,0–0,75	0,75–0,50	< 0,50

Таблица 2 – Сравнительный анализ методов обработки глубоких отверстий малого диаметра

Метод обработки	Критерии выбора (табл. 1)								Σ
	1,1	1,2	1,3	1,4	2,1	2,2	3,1	3,2	
ОР	4	4	4	3	1	5	2	2	25
ЭЭО	3	4	4	4	3	0	3	3	24
ЭХО	3	1	4	5	5	0	2	4	24
СЛО	3	1	4	4	4	5	4	0	25
УЗО	4	3	5	4	5*	0	3	3	25
ЭЛО	2	2	4	4	4	5	4	0	25
ХТ	2	0	5	5	5	0	3	1	21

Примечание: имеются ограничения по минимальной твёрдости обрабатываемого материала

3. Сравнительный анализ технологических методов обработки отверстий показал их примерно одинаковую эффективность применительно к условиям обработки глубоких отверстий для подвода РЖ. Следовательно, наиболее перспективным путём повышения эффективности обработки глубоких отверстий для подвода РЖ является применение комбинаций рассмотренных методов, позволяющих получить синергетический эффект. Вопрос разработки таких комбинаций требует дальнейших исследований.

### **Библиографический список**

1. Туркин И. А. Повышение производительности сверления глубоких отверстий на основе синергетического подхода к анализу и управлению : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07: защищена 29.03.16/ Туркин Илья Андреевич; Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону, 2016. – 190 с. : ил.
2. Моргунов, Ю. А. Научноёмкие технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии/ Ю. А. Моргунов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин, С. Б. Саушкин. – М.: Форум, 2018. – 928 с.: ил.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 756 с.: ил.

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,  
к.т.н., доц. Семенов К. Г.,  
магистр Ворончихин А. Д.  
к.т.н., доц. Свинооров Ю. А.,  
д.т.н., проф. Гутько Ю. И.*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ МЕДИ С ЖЕЛЕЗОМ

Технология литья с кристаллизацией под давлением ЛКД различает традиционные и нетрадиционные способы ЛКД. При традиционном ЛКД расплав заливают в матрицу пресс-формы, смонтированную на столе гидравлического пресса, и затем воздействуют на расплав прессующим пуансоном до окончания затвердевания формирующейся отливки. Варианты традиционных способов ЛКД наиболее распространены в России [1, 2].

При нетрадиционных схемах ЛКД расплав заливают в специальный металлоприемник, расположенный под пресс-формой, которая является закрытой, или сбоку от нее (аналогично камере прессования на машинах литья под давлением). Из металлоприемника расплав поршнем вытесняют в рабочую полость пресс-формы. В России для этого варианта процесса ЛКД применяют машины литья под давлением, а за рубежом – специальные литейные установки, созданные фирмами UBE (Япония) и Buhler (Швейцария).

Низколегированные сплавы меди, как правило, относятся к классу деформируемых сплавов. Вместе с тем, разработана группа низколегированных сплавов меди, которые обладают достаточно высокими литейно-технологическими свойствами и могут широко использоваться для получения фасонных отливок в ряде областей современного машиностроения, где необходимы высокие электропроводность в сочетании с хорошими прочностными свойствами, значительно превосходящими свойства чистой электротехнической меди. Для инновационных машиностроительных технологий перспективными следует считать сплавы на основе системы медь-железо с легирующими добавками, обеспечивающими возможность получения достаточно высокой теплопроводности, в сочетании с высокими прочностными свойствами [1, 2].

Отработку режимов прессования низколегированных сплавов меди с железом проводили путем оценки влияния давления на кинетику охлаждения и прессования отливок.

Милливольтметр фиксировал температуру в тепловом центре затвердевающей заготовки (термопары вводили через толкатель), усилие прессования (тензометрическая мессдоза устанавливается между пуансоном и ползуном пресса) и перемещение прессующего пуансона (по показаниям реохордного и фотодиодного датчиков). Температура пресс-формы измерялась термопарой, оголенный спай которой устанавливали в 2 мм от рабочей полости матрицы. Опытные заготовки изготавливали при следующих технологических параметрах: температура заливки  $T_з = 1160...1300^\circ\text{C}$ , температура расплава в момент приложения давления  $T_p = 1140...1250^\circ\text{C}$ , начальная температура пресс-формы  $T_{нф} = 30...300^\circ\text{C}$ , номинальное давление прессования  $p_n = 0...250$  МПа, выдержка расплава в матрице до приложения давления  $\tau_d = 3...6$  с и под давлением  $\tau_n = 50$  с (слиток) и 20 с (стакан). Отливки разрезали в вертикальной плоскости для изучения структуры и физико-механических свойств.

Характер изменения температуры, давления и перемещения пуансона во время прессования слитков при различных исходных параметрах оставался одинаковым. В большинстве опытов давление к расплаву прилагали через 3 – 4 с после заливки, когда толщина корки соответствовала 2,5 – 3,0 мм, в центре еще не была снята теплота перегрева. Последняя отво-

дилась через 0,3 – 0,5 с после начала прессования, т. е. при усиллии 10 – 40 кН или давлении 2,5 – 40,0 МПа [3, 4].

Минимальное давление  $P_{\text{мин}}$  необходимо, чтобы устранить зазор между затвердевающей отливкой и матрицей. Значительные колебания  $P_{\text{мин}} = 10,0 – 25,4$  МПа вызваны изменениями параметров литья. Все факторы, способствующие росту корки (снижение  $T_{\text{нф}}$ , увеличение  $\tau_{\text{д}}$ ), приводят к увеличению  $P_{\text{мин}}$ , так как прочность корки возрастает.

Сокращение затвердевания (в 4 – 5 раз) наблюдается при повышении давления до  $P_{\text{г}} = 100,0$  МПа, а затем до  $P_{\text{г}} = 250,0$  МПа, продолжительность затвердевания слитка уменьшается незначительно. С повышением  $T_{\text{з}}$  и  $T_{\text{р}}$  увеличивается время затвердевания слитка, как и с увеличением начальной  $T_{\text{нф}}$ .

Анализ кривых относительного перемещения прессующего пуансона  $h/H$ , где  $H$  – высота слитка, показывает, что наибольшее перемещение пуансона характерно для первых 1 – 2 с после приложения давления. При различном давлении прессования и постоянных других параметрах ( $T_{\text{р}} = 1250^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{нф}} = 150^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{\text{д}} = 3$  с) к моменту отвода теплоты перегрева  $h/H = 0,0262$ ; при последующем повышении давления до  $P_{\text{г}}$  оно увеличивается до 0,050 при  $P_{\text{г}} = 50,0$  МПа и до 0,054 при  $P_{\text{г}} = 150,0$  МПа, хотя в последнем случае затвердевание слитка закончилось при 110,0 МПа. Как видно, повышение давления прессования во время затвердевания способствует большему перемещению пуансона, а, следовательно, и уплотнению слитка.

Таким образом, для получения качественных отливок желательно повышение давления прессования и начальной температуры пресс-формы, снижение температуры заливки и температуры расплава в момент приложения давления.

Наибольшее перемещение прессующего пуансона наблюдается в течение 1 – 1,5 с после начала прессования. Повышение  $P_{\text{г}}$ , снижение  $T_{\text{з}}$  и  $T_{\text{р}}$ , а также повышение  $T_{\text{нф}}$  благоприятны с той точки зрения, что приводят к большей величине относительного перемещения пуансона во время затвердевания отливок и, следовательно, лучшему их пропрессовыванию [1, 2].

Общие закономерности формирования структуры слитков из низколегированной меди, изготовляемых при поршневом прессовании, справедливы и для отливок типа стакана, получаемых при пуансонном прессовании. Принудительное выдавливание расплава выступающей частью прессующего пуансона во время формообразования (до приложения давления) отливки существенно влияние на структуру. Протяженность зон столбчатых кристаллов в отливках типа стакана уменьшается при переходе от нижнего торца к верхнему, так как верхняя часть отливки формируется выдавливаемым металлом, имеющим температуру, значительно меньшую  $T_{\text{нф}}$ .

С увеличением давления наряду с уменьшением протяженности зоны столбчатых кристаллов измельчается зерно по высоте стенки отливки, но наименьший средний размер зерна относится к верхним зонам, несколько больший – к средним и наибольший – к нижним, что также связано с перемещением расплава пуансоном во время формообразования отливки. Наибольшее измельчение структуры, а также различие в величине зерен по высоте отливки происходит при повышении давления до 100,0 – 150,0 МПа. При давлении, свыше 150,0 МПа размеры зерен во всех зонах по высоте стенки отливки становятся практически одинаковыми.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что литьем с кристаллизацией под давлением можно получать качественные отливки из низколегированной меди. Для рассмотренных типов отливок режимы литья и прессования могут быть приняты следующими:

$T_z = 1160 \dots 1180^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 1160 \dots 1200^\circ\text{C}$  ;  
 $P_g = 100,0 - 160,0$  МПа (пуансонное прессование);  
 $150,0 - 200,0$  МПа (поршневое прессование);  
 $\tau_d = 3 - 4$  с, а  $\tau_{\Pi} = 1$  с на 1 мм толщины стенки;  
 $X_{кр} = 0,5 - 0,6$  мм.

### Библиографический список

1. Батышев А. И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – 2-ое изд. – М.: Металлургия, 1990. – 144 с.
2. Батышев А. И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – М.: Металлургия, 1977. – 151 с.
3. Батышев К. А., Семенов К. Г., Свинороев Ю. А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Издательство «Первый том», 2020 г. – 150 с.: ил.
4. Семенов К. Г. Технологические особенности производства отливок из медных сплавов для машиностроения. Ч II. Технология медных сплавов / Металлургия машиностроения. 2017. № 4. С. 34 – 39.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЯ

В современном машиностроении при сборке различных узлов и механизмов широкое применение получили резьбовые соединения, от эксплуатационных характеристик которых, зависит работоспособность всей сборочной единицы. Поэтому в ряде случаев к ответственным резьбовым соединениям предъявляются повышенные требования. Известно, что нарезание резьбы в материалах с высокими физико-механическими свойствами является трудоемкой операцией, которая влечет за собой ряд сложностей, связанных с низкой стойкостью инструмента и недостаточным качеством обработки. Установлено, что одной из причин снижения качества получения резьбовых соединений является образование нароста на передней поверхности режущего инструмента и в зоне резания за счет возникающей силы адгезии. Нарост изменяет геометрическую форму режущего клина; условия контактирования стружки с рабочими поверхностями зуба метчика и тем самым влияет на качество обработанной поверхности; интенсивность износа рабочих элементов инструмента; точность обработки; силу резания и потребляемую мощность в процессе формообразования.

Из анализа литературных источников следует, что в настоящее время для борьбы с вредным влиянием нароста используется ряд методов, к которым можно отнести: снижение скорости резания; применение инструментальных материалов или покрытий, не склонных к наростообразованию; изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя заготовки и геометрии режущего инструмента; принудительное введение смазочно-охлаждающей жидкости определенных характеристик в зону резания.

Одним из прогрессивных методов снижения наростообразования при нарезании резьбы является введение в зону резания вынужденных ультразвуковых колебаний [1]. В результате проведенного анализа установлено, что наложение ультразвуковых колебаний на инструмент позволяет достичь повышения производительности процесса и улучшения качества изготавливаемых изделий [2].

Определяющим фактором при нарезании внутренней резьбы метчиком является крутящий момент, который можно рассматривать как интегральный показатель сил, действующих в процессе резания. По степени изменения крутящего момента в процессе работы можно судить о работоспособности инструмента. Такой подход наиболее эффективен при нарезании резьбы малого диаметра, так как в этом случае отказы режущего инструмента происходят преимущественно из-за его поломок. Известно, что снижение крутящего момента способствует повышению работоспособности метчиков. Установлено, что нарезание резьбы с наложением ультразвуковых колебаний приводит к снижению крутящего момента в 1,3 – 1,8 раза, что способствует повышению работоспособности инструмента в 3 раза [3]. Этот процесс можно объяснить рядом факторов: снижением сопротивления пластической деформации за счет активации дислокаций и их увеличением в ультразвуковом поле; уменьшением коэффициента трения; активацией технологической среды.

Известно, что наложение ультразвуковых колебаний может осуществляться в тангенциальном, осевом и радиальном направлениях. Анализируя исследования [4], выявлено, что наименьшее отклонение угла профиля резьбы и минимальное отклонение накопленного шага достигается при наложении тангенциальных ультразвуковых колебаний. При этом высота микронеровностей снижается на 20 – 30 % при амплитуде колебаний  $A=5$  мкм.

Таким образом, установлено, что при наложении ультразвуковых колебаний процесс наростообразования проявляется в значительно меньшей степени.

### Библиографический список

1. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / А. И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
2. Кумабэ, Д. Вибрационное резание [текст] / Д. Кумабэ – М. Машиностроение, 1985 – 424 с.
3. Головкин В. В. Нарезание внутренних резьб малого диаметра с наложением на метчик ультразвуковых колебаний / В. В. Головкин, М. В. Дружинина, В. Н. Трусов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №5 (36) – С. 78-83.
4. Головкин В. В. Повышение эффективности обработки и качества поверхностного слоя при нарезании резьбы в заготовках из труднообрабатываемых материалов с наложением ультразвуковых колебаний: диссертация доктора наук Самарского гос. техн. универ., Самара, 2015.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СВЕРЛЕНИЯ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВКАХ**

На современном этапе в машиностроении широко применяются изделия из тонколистовых заготовок (кожухи, кузова, крышки и др.), которые предусматривают резьбовое соединение с различными комплектующими деталей. Известно, что традиционные технологии не позволяют получить качественные отверстия под резьбу в тонкостенных заготовках, так как не обеспечивается длина свинчивания. На практике данная проблема решается за счет установки фитингов. Однако существующие способы усложняют конструкцию резьбовых соединений и увеличивают трудоемкость. Одним из эффективных методов получения отверстий в тонкостенных изделиях является метод пластического сверления. Первые работы в этом направлении относятся к 1923 году, когда французский исследователь Жан-Клод де Валиэр попытался создать инструмент, позволяющий получить отверстие в металле за счет температуры трения. Систематические исследования в области пластического сверления приходятся на 70-е годы прошлого столетия. В настоящее время наблюдается экспансия этой идеи в различных направлениях машиностроения. Из анализа литературных источников установлено, что, несмотря на относительно небольшое количество исследований в мире по совершенствованию данной технологии, многие аспекты довольно хорошо освещены, в частности изучены формы получаемых отверстий, проведены металловедческие исследования состояния материала в зоне обработки. Однако ряд аспектов находится на начальной стадии изучения. Например, отсутствуют практические разработки, устанавливающие взаимосвязь производительности пластического сверления с технологическими режимами, геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами материалов заготовки и инструмента, а также зависимость между геометрическими параметрами полученного отверстия с длиной свинчивания и прочностью резьбового соединения. Известно, что пластическое сверление реализуется за счет фрикционного разогрева и пластификации материала заготовки под действием комбинации осевой силы и вращения инструмента. В зависимости от характера образования отверстия определены этапы его протекания (рис. 1).

На первом этапе – подготовительном осуществляется соприкосновение инструмента с обрабатываемой заготовкой, после чего на нее оказывается давление, вызванное вращением бура. На втором этапе происходит процесс сверления, при котором под давлением при вращении бура нагревается материал до температуры плавления, в результате чего инструмент проходит сквозь металл. Третий этап характеризуется окончательным формированием отверстия в заготовке.

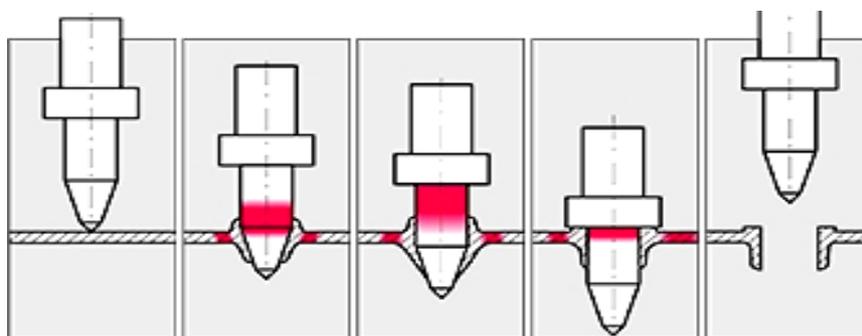


Рисунок 1 — Схема процесса пластического сверления

Немаловажной характеристикой процесса пластического сверления тонкостенных заготовок является производительность, которая напрямую зависит от скорости и температуры нагрева металла в зоне обработки. Установлено, что распределение температуры в объеме заготовки при формообразовании отверстия характеризуется температурой на поверхности трения и температурой в зоне обработки. Для повышения производительности металл должен обладать достаточно большой пластичностью, следовательно, температура на поверхности трения должна быть максимальной, но не вызывающей перегрева, пережога и превышать температуру теплостойкости материала инструмента. Исходя из вышеизложенного установлено, что при обработке малоуглеродистых и нержавеющей сталей, а также сплавов на основе меди оптимальная температура на поверхности трения соответствует  $680-780^{\circ}\text{C}$ , а при обработке алюминиевых сплавов –  $400-470^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что процесс получения отверстий методом пластического сверления является безстружечным. Это способствует образованию поверхностей более высокой точности и низкой шероховатости по сравнению с традиционными методами. Анализ литературных источников показал, что пластическое сверление позволяет получить отверстия с шероховатостью  $Ra = 0,4..0,8$  мкм, что в 3-5 раз меньше, чем при сверлении. Точность получаемых отверстий соответствует – 8 качеству.

Одним из основных преимуществ данного метода является использование универсального оборудования, не требующего дополнительного технологического оснащения.

Таким образом, высокая производительность, качество получаемого отверстия, универсальность процесса, отсутствие стружки позволяет эффективно применять данную технологию как при массовом, так и при единичном производстве.

### **Библиографический список**

1. Гузев, В. И. Методика проведения экспериментов при изготовлении отверстий с отбортовкой, для нарезания резьбы в тонколистовом металле / В. И. Гузев, П. В. Шаламов, С. Е. Радийчук // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2008. – С. 199–201.
2. Золотов О. В. Определение тепловых потоков при обработке тонколистовой заготовки методом пластического сверления / О. В. Золотов, Е. Ю. Татаркин // Обработка металлов. – 2006. – № 3. – С. 10–11.
3. Татаркин, Е. Ю. Диффузионные процессы в обработке тонколистового материала методом пластического сверления / Е. Ю. Татаркин, В. В. Хоменко // Ползуновский вестник. №1/2002. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та им/ И. И.Ползунова, 2002. – С. 155–158.

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В основе синтеза технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий лежит принцип обеспечения рациональных параметров на всех его этапах.

Вследствие того, что технологический процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий является сложным многовариантным иерархическим образованием, его проектирование необходимо начинать с разработки укрупненной универсальной структуры технологического процесса, сформированной из технологических модулей операций. Далее необходимо проработать каждый технологический модуль операций и выполнить синтез его структуры, состоящий из множества технологических операций. Затем необходимо выполнить исследования и установить основные закономерности объединения операций. Здесь могут быть определены следующие связи:

- по параметрам шероховатости тонкостенных цилиндрических изделий;
- по параметрам точности тонкостенных цилиндрических изделий;
- по параметрам свойств тонкостенных цилиндрических изделий.

Решение этих вопросов обеспечивает повышение качества и эффективности технологического процесса изготовления тонкостенных цилиндрических изделий. Это может быть выполнено на основе использования принципа минимизации, принципа концентрации, за счет соответствующей структуры комбинированной обработки технологического процесса и обеспечения рациональных параметров операций.

На рисунке 1 представлена структурная схема общего подхода проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Этот общий подход имеет следующую последовательность проектирования, формирующуюся по четырем уровням [1, 2]:



Рисунок 1 — Структурная схема общего подхода проектирования технологического процесса комбинированной технологии обработки тонкостенных цилиндрических изделий

– 1-й уровень — синтез укрупненной общей универсальной структуры технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе технологических модулей операций;

– 2-й уровень — синтез структуры операций технологического процесса каждого технологического модуля операций на базе морфологической матрицы;

– 3-й уровень — установление закономерностей объединения операций в технологическом процессе комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– 4-й уровень — повышение качества и эффективности технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Данная последовательность и является методикой проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Она базируется на следующих принципах проектирования [1, 3]:

– принцип модульности проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– принцип иерархии процесса проектирования комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– принцип концентрации операций технологического процесса;

– принцип итерации процесса проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

### **Библиографический список**

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

2. Михайлов, А. Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А. Н. Михайлов// Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2007. – Вып. 2. – С. 44–53.

3. Хубка, В. Теория технических систем : Пер. с нем., 2-е изд. – М.: Мир, 1987. – 208 с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ

После механической обработки детали в местах сопряжения ее поверхностей, как правило, образуются острые кромки и заусенцы. Их величина зависит от состояния режущей кромки и вязкости материала детали. Наличие острых кромок и заусенцев снижает эксплуатационные характеристики детали (ее долговечность), может явиться причиной травматизма персонала.

Отдельного внимания заслуживают заусенцы в местах пересечения отверстий или внутренних поверхностей. Их наличие ухудшает условия течения рабочих жидкостей или газов, вплоть до изменения характера потока. В результате чего деталь не может выполнять служебное назначение.

Зачастую при разработке процесса изготовления детали внимание уделяют только основным технологическим операциям, в результате экономическая эффективность технологического процесса. В результате этого фактическая трудоемкость изготовления изделия существенно превышает расчетную, поскольку затраты времени на снятие заусенцев не были учтены. Удаление заусенцев сводится в отдельную завершающую операцию технологического процесса, выполняемую вручную.

Операции по удалению заусенцев используются практически на всех производственных предприятиях не зависимо от сложности детали. В настоящее время по-прежнему большая часть заусенцев и острых кромок на предприятиях снимается вручную на слесарных операциях. Так при изготовлении крышки поршневого ротационного насоса, предназначенного для подачи рабочей жидкости под высоким давлением в гидравлических наземных устройствах (рис. 1), заусенцы на внутренних ребрах удаляются вручную. Трудоемкость данной операции составляет 1,2 ... 18 мин.

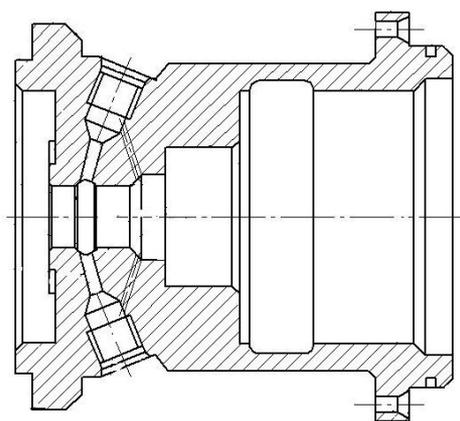


Рисунок 1 — Эскиз детали «Крышка»

Снятие заусенцев механической обработкой требует применения специального инструмента (режущего, абразивного, щеточного, ручного). Это часто бывает экономически невыгодно или технически невозможно из-за технологических трудностей доступа к зоне обработки, в частности, в случае пересекающихся отверстий.

Так как чистота внутренних поверхностей деталей (штуцеров, дросселей, клапанов, крышек и др.) во многом определяет функциональные свойства систем гидравлики и надежность работы изделия в целом, то проблема удаления заусенцев является актуальной.

В связи с этим представляют интерес различные альтернативные, относительно новые и достаточно эффективные методы удаления заусенцев.

В настоящее время известны такие современные технологии удаления заусенцев, как:

- ультразвуковая обработка, основанная на действии упругих механических колебаний в жидкой среде в ультразвуковом поле;
- электрогидроимпульсная обработка, основанная на эффекте возбуждения гидравлического удара в емкости с рабочей жидкостью импульсным электрическим разрядом между электродом и обрабатываемой деталью;
- термоэнергетический метод (ТЭМ), использующий принцип сжигания заусенцев при воспламенении смеси газов;
- термическое удаление заусенцев (ТУЗ) – это производственный процесс, использующий тепловую энергию;
- электрохимическое удаление заусенцев (ЭХУЗ) – это локальный процесс, использующий электрическую энергию для удаления заусенцев в конкретном месте на детали (происходит растворение заусенцев в электролите под действием электрического поля);
- вибрационное галтовочное полирование (снятие заусенцев происходит в барабане, наполненном галтовочной смесью и деталями, при вибрации которого происходит абразивное действие между смесью и заготовками);
- термоимпульсный метод, в котором доминирующими являются теплофизические процессы и заусенцы удаляются оплавлением с последующим сбросом продуктов сгорания из рабочей камеры, предотвращая конденсацию оксидов.

Каждый из методов имеет свои особенности, преимущества, недостатки и предпочтительные области применения. Их выбор определяется качеством обработки, экономической эффективностью и производственной целесообразностью применения по сравнению с традиционной обработкой.

В условиях мелкосерийного производства для удаления заусенцев целесообразно применять универсальные методы и оборудование, позволяющие вести обработку с минимальными затратами на подготовку производства, широкой номенклатуры деталей из различных материалов. При этом должны обрабатываться как внешние, так и внутренние поверхности деталей независимо от сложности конфигурации поверхностей, размеров отверстий и т. д.

По итогам обзора отечественных и зарубежных источников, а также рекламных проспектов ведущих машиностроительных компаний и фирм был выполнен сравнительный анализ относительной стоимости удаления заусенцев с одной детали «Крышка» некоторыми способами (табл. 1) [1, 2, 3, 4].

Таблица 1 — Относительная стоимость удаления заусенцев с одной детали «Крышка»

Базовый вариант	Предлагаемые варианты						
Ручная доводка	Вибрационное галтовочное полирование	ТЭМ	ТУЗ	ЭХУЗ	Ультразвуковая обработка	Электрогидроимпульсная обработка	Термоимпульсная обработка
1,0	0,088	0,0165	0,023	0,043	0,009	0,067	0,007

Таблица иллюстрирует, что термоимпульсная обработка заусенцев обеспечивает наименьшую относительную стоимость их удаления с одной детали «Крышка» и является наиболее перспективным методом.

### Библиографический список

1. Лосев, А. В. Особенности использования отделочно-зачистных технологий в производстве авиационной техники [Текст] / А. В. Лосев, И. В. Бычков, С. А. Красовский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ» – 2017. – №76. – С.69–78.
2. Саушкин, С. Б. Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки [Текст] / С. Б. Саушкин, Ю. А. Моргунов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – №1(11). – С. 188–193.
3. Лосев, А. В. Технологическая система для удаления ликвидов с поверхностей деталей [Текст] / А. В. Лосев, А. А. Коростелева, О. А. Лосева // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2011. – Вып. 4 (68). – С. 126–138.
4. Gillespie, L. Deburring and edge finishing handbook [Текст] / L. Gillespie – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.

*к.т.н., доц. Свинороев Ю. А.,*

*д.т.н., проф. Гутько Ю. И.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,*

*к.т.н., доц. Семенов К. Г.*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ*

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

Выбор составов стержневых и формовочных смесей в литейном производстве, осуществляется по справочной литературе с последующей производственной адаптацией. Процедура осуществляется, как правило, без учета экологических аспектов их применения, хотя именно эти компоненты технологического процесса ответственны за продуцирование токсинов относящихся к первому и второму классам опасности. Такое положение дел приводит к тому, что вновь разработанный технологический процесс приходится корректировать на стадии его внедрения или в процессе промышленного использования, когда выясняется степень экологической угрозы его применения.

Первыми в рейтинге загрязнителей окружающей среды в машиностроительном производстве стоят формовочные и стержневые отделения литейных цехов. Причина состоит в том, что именно на этих технологических участках применяются материалы представляющие угрозу, как окружающей среде, так и здоровью человека [1]. Это, прежде всего, органические связующие материалы и разнообразные катализаторы и добавки применяющиеся попутно.

В процессе их применения на этапах транспортировки, смесеприготовления, сушки, заливки, отверждения отливки, выбивки – образуются очень опасные токсичные и канцерогенные вещества первого и второго классов опасности [2], а применение масляных связующих, например марки КО, ведет к резкому повышению концентрации бензапирена, как в рабочей зоне, так и в районе расположения данного предприятия. Подобное характерно и для синтетических смол, причем по показателю условной токсичности они превосходят все остальные виды связующих материалов. При этом, именно для них, выделения вредных выбросов наблюдаются на всех технологических переделах: приготовление, сушка, заливка, выбивка.

В структуре выбросов от применения органических литейных связующих находится вся номенклатура наиболее опасных и токсичных веществ: акролеин, бензапирен, хром шестивалентный, метанол, формальдегид, фурфурол, фенол, фуритоловый спирт, оксиды серы, аммиак, ацетон, метанол и др.

При этом, примерно 80 – 85 % всего литья в России и в мире приходится на технологии литья в разовые песчаные формы, т. е. именно на те технологии которые представляют наибольшую угрозу.

Такой технологический уклад, при наращивании производства литья, неизбежно приведет серьезным экологическим проблемам, поскольку перечисленные связующие материалы являются потенциальными носителями токсичных выбросов в окружающую среду. В первую очередь этой угрозе подвергаются жители крупных городов, что не допустимо.

Очевидно, в условиях литейного производства проявляется неблагоприятный кумулятивный эффект комплексного фактора, при котором вредное воздействие каждого отдельного ингредиента (пыли, газов, температуры, вибрации, шума) резко увеличивается.

Закрытая статистика [3], по городу Луганску свидетельствует, что 67 % хронических заболеваний от их общего числа и 89 % онкологических заболеваний приходится на жителей Артемовского района, т. е. района непосредственно прилегающего к Луганскому литейно-механическому заводу, Тепловозостроительному заводу, т. е. на тот район, где сосредоточены основные литейные мощности и где применяются указанные связующие.

Приведенные факты предопределяет острую необходимость разработки и применения связующих материалов нового поколения отличающихся экологичностью. Причем, острая потребность в таких материалах актуальна именно сейчас, поскольку именно сейчас возможно, в силу сложившихся обстоятельств, наращивание производства литья, что в условиях общемирового экономического кризиса даст дополнительные рабочие места, повысит эффективность экономики республики.

В противном случае, эти заказы будут с успехом размещены в Турции или Китае. Поэтому, неотъемлемым элементом успеха в решении указанной проблемы, является разработка и применение новых экологически чистых и качественных литейных связующих и прогрессивных способов их обработки.

Решение может быть достигнуто за счет наращивания потенциала очистных сооружений разного типа, однако этот путь является затратным и не рациональным.

По совокупности причин, наиболее эффективным способом решения стоящих перед литейным производством экологических проблем является снижение объёма применения связующих вообще, и в частности снижение использования потенциально опасных связующих материалов типа фенольных смол и масляных материалов. Это возможно только за счет применения не опасных, экологически чистых связующих материалов. В этой связи целесообразно рассмотреть с экологической точки зрения представленную разработку, показатели газотворности и токсичности предлагаемых смесей.

Как правило, при проектировании технологического процесса производства отливки реализуется схема процесса, приведенная на рисунке 1, она решает чисто технологические задачи, что приводит к упомянутым негативным последствиям.



Рисунок 1 — Укрупненный алгоритм разработки процесса проектирования технологии изготовления отливки

Предлагается, для предотвращения подобных ситуаций на стадии создания технологии внести в алгоритм процесса проектирования дополнительный программный модуль, обеспечивающий экологическую экспертизу принимаемых проектных решений.

Известно, что наиболее экологически опасными элементами технологических процессов литья, являются связующие материалы, генерирующие на этапах осуществления технологического процесса высокотоксичные вещества, таких как бензапирен, формальдегид, фенол, акролеин и др. По этой причине целесообразно создать и применять шкалу предпочтений связующих материалов (рис. 2), в зависимости от степени их экологической опасности. В качестве критерия, характеризующего такую опасность удобно взять показатель условной токсичности. Условием возможного применения связующего материала в проектируемом технологическом процессе является обеспечение требуемого качества получения отливки.

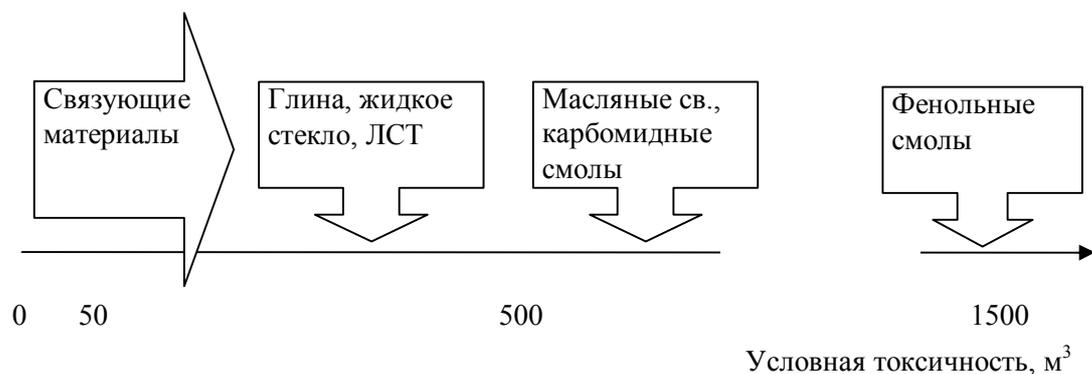


Рисунок 2 — Схема шкалы экологических предпочтений связующих материалов

Опытно-промышленные испытания показывают, что использование предложенного состава смеси со сниженным содержанием связующего, а главное, сокращением применения токсичных компонентов связующего комплекса, произошло существенное снижение объемов валовых выбросов.

Выбросы по всем показателям сократились до уровней ПДК.

Зафиксировано снижение вредных выбросов по всем контролируемым ингредиентам: формальдегиду, акролеину, окиси углерода, сернистому ангидриду, но главное снижение бензапирена, выброс которого превышал ПДК рабочей зоны в 4,5 раза, сократился до уровня ПДК.

#### Выводы

Применение в алгоритмах проектирования литейной технологии программного модуля экологической оценки принимаемых проектных решений позволит снизить или предотвратить возникающие, в следствие этого, негативные экологические последствия в литейном производстве.

По результатам испытаний, зафиксировано снижение вредных выбросов по всем контролируемым ингредиентам: формальдегиду, акролеину, окиси углерода, сернистому ангидриду, но главное снижение бензапирена, выброс которого превышал ПДК рабочей зоны в 4,5 раза, сократился до уровня ПДК.

#### Библиографический список

1. Экология литейного производства: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Н. Болдина, С. С. Жуковского, А. Н. Поддубного, А. И. Яковлева, В. Л. Крохотина: – Брянск : Изд-во БГТУ, 2001.– 315 с.
2. Инженерная экология литейного производства: Учебное пособие / [А. Н. Болдин, А. И. Яковлев, С. Д. Тепляков]; под общ. ред. А. Н. Болдина. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
3. Черних В. І. Шкідливий вплив підприємств Луганщини на здоров'я людей / В. І. Черних, В. В. Кіященко // Проблеми горного дела и экологии горного производства: материалы 7-й международной научно-практической конференции, 18 – 19 мая 2012 г. – Донецк, Антрацит: издательство «Світ книги», 2012. – С. 91–93.

*к.т.н., ген. Директор Георгиевский М. Г.*

*ОАО «Гидромаш», г. Москва, РФ*

*д.т.н., проф. Батышев К. А.,*

*к.т.н., доц. Семенов К. Г.*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ*

*к.т.н., доц. Свинооров Ю.А.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

*научный сотрудник Зеркалов Г. Л.*

*Стенфордский университет, г. Пало-Альто, США*

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ ШЕСТЕРЕННЫХ ГИДРОМАШИН

Шестеренные гидромашинны – насосы одно- и многосекционные, гидромоторы и делители потока – являются наиболее массовой продукцией машиностроения и потому очень привлекательны инвестиционные вложения в их производство. С другой стороны, сложившиеся стереотипы их конструкций и процессов изготовления, кажущиеся незыблемостью и невозможность совершенствования с целью повышения надежности и снижения себестоимости, а также доминирующее положение на рынках СНГ и дальнего зарубежья их традиционных производителей сдерживают эти инвестиции.

В данной работе рассмотрены способы снижения нагрузок на подшипники в 2 раза, повышения рабочего давления и производительности шестеренных насосов до производительности центробежных агрегатов типа ЦНС с возможностью перекачивания несмазывающих жидкостей без разрушения зубьев шестерен из-за отсутствия масляного клина между эвольвентами зубьев.

Первая задача – повышение надежности подшипников и рабочего давления насосов любой производительности (до 25 МПа и выше) – решена уменьшением вдвое сил, действующих на рабочий ротор (пару шестерен) со стороны зоны высокого давления, т. е. со стороны выхода жидкости из насоса, и применением самоустанавливающихся подшипников по углу изгиба цапф шестерен, обеспечивающих постоянство площади трения при любой нагрузке. С помощью конструкции торцевого компенсатора, уплотняющего торцы венцов шестерен, со стороны зоны низкого давления, т. е. со стороны входа жидкости в насос, создаются силы противоположного знака, частично нейтрализующие силы со стороны зоны высокого давления.

Шестеренный насос (рис. 1, а) состоит из передней крышки 7, корпуса 3 и установленных в нем компенсаторов 4 с рабочей и нерабочей поверхностями, уплотнений 6, шестерен ведущей 5 и ведомой 8, подшипников скольжения 2 и задней крышки 1. На рабочей поверхности компенсаторов со стороны зоны низкого давления в поперечном разрезе показаны кольцевые каналы 9 (рис. 1, б) соединенные с областью зоны жидкости высокого давления и подведенные под уплотнение компенсатора, зоны высокого 10 и низкого 11 давления ( $h$  – радиус входного отверстия). На рисунке 1, в приведены эпюры сил со знаком «+», действующих на пару шестерен со стороны зоны высокого давления, со знаком «-» – со стороны зоны низкого давления.

Насос с компенсатором новой конструкции работает следующим образом. Рабочая жидкость, поступившая в зону низкого давления 11 (на вход насоса), заполняет впадины между зубьями вращающихся шестерен 5 и 8 и переносится в зону высокого давления 10. При выдавливании жидкости из впадин между зубьями на выходе насоса создается высокое гидравлическое давление, которое, действуя на уплотнения 6 компенсаторов, обеспечивает их прижим к торцам шестерен. Шестерни под воздействием давления нагнетания смещаются в зону низкого давления, т. е. к входному отверстию насоса, а зубья шестерен «вгрызаются» во внутреннюю поверхность корпуса насоса, обеспечивая герметизацию зоны высокого давления от зоны низкого давления.

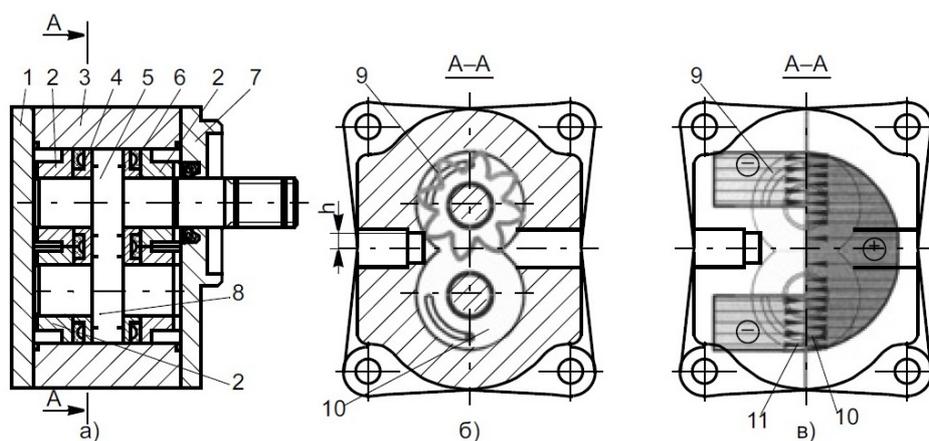


Рисунок 1 — Шестеренный насос: а), б) продольный и поперечный разрезы; в) эпюры сил

На стороне зоны высокого давления в результате смещения шестерен образуется зазор между венцами шестерен и внутренней поверхностью корпуса, по которому давление нагнетания на выходе распространяется по высоте пары шестерен; при этом величина гидравлического давления снижается с уменьшением проходного сечения зазора, образуя убывающую силу, действующую на пару шестерен со стороны зоны высокого давления.

Поступающая в кольцевые каналы или отверстия жидкость под высоким давлением создает во впадинах между зубьями шестерен, находящихся в зоне этого канала, давление, равное давлению нагнетания. При этом образуется противодействующая на шестерни сила со знаком «-», нейтрализуя частично силы со знаком «+».

Для того чтобы жидкость под высоким давлением из впадин между зубьями не попала во входное отверстие и не снизились коэффициент подачи и давление нагнетания, необходимо обеспечить ее надежную герметизацию. Достигается это при условии, когда между каналом на компенсаторе и входным отверстием будет находиться одновременно два зуба шестерни. Исходя из этого условия длину канала, а следовательно, и силы со знаком «-» можно увеличить, уменьшив радиус отверстия и удлинив канал. В результате действующая на шестерни и подшипники сила реакции от давления нагнетания сокращается при данном расположении каналов (рис. 1, в) в 2 раза.

Эффективность предложенного технического решения будет неполной, если подшипники оставить при высоком давлении нагнетания неподвижными. Изгиб цапф шестерен приведет к сокращению площади их трения в подшипниках скольжения до двухточечной: на входе цапфы в подшипник и на выходе из него. В результате из-за многократно возросшей силы трения произойдет выдавливание масляного клина и задир подшипников. Чтобы этого не произошло, конструкция подшипников выполнена самоустанавливающейся по положению угла изгиба цапф для насосов различной компоновки с помощью сферических упоров.

Насос в разрезе с вариантами исполнения сферы на подшипнике и упорной втулке приведен на рисунке 2, а, с исполнением сферы на цилиндре меньшего диаметра подшипника и крышке насоса – на рисунке 2, б, с исполнением сферы на цилиндре меньшего диаметра подшипника и дне корпуса насоса – на рисунке 2, в.

Насос состоит из корпуса 4, передней крышки 7, шестерен ведущей 3 и ведомой 8, подшипников 2, помещенных в упорную втулку 9, компенсаторов 5 с манжетами 6. На рисунке 2, а, сфера контакта подшипника и упорной втулки имеет радиус  $R_1$  на рисунке 2, б, сфера контакта подшипника и дна корпуса насоса –  $R_2$ ; на рисунке 2, в – сфера контакта подшипника, передней и задней крышек –  $R_3$ .

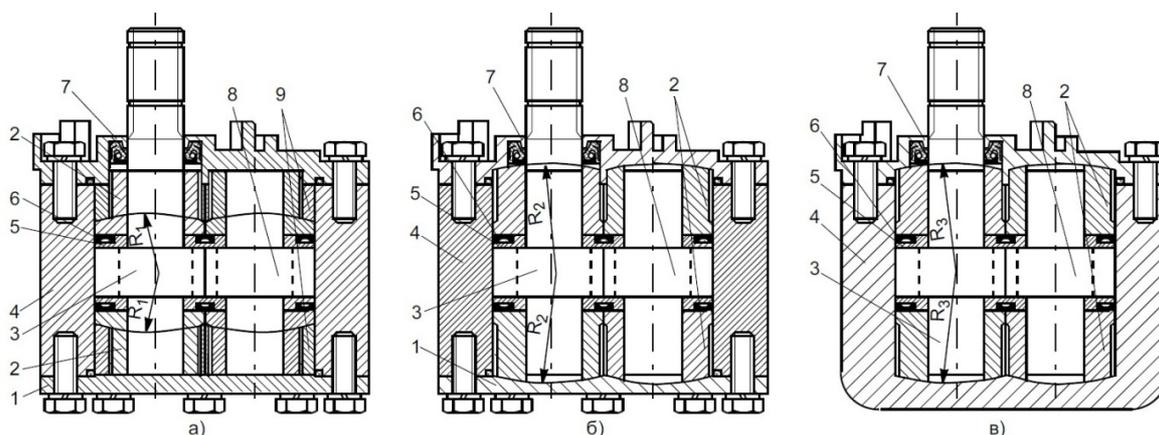


Рисунок 2 – Шестеренные насосы различной компоновки с самоустанавливающимися подшипниками

Насос с подшипниками новой конструкции работает следующим образом. При вращении шестерен 3 и 8 нагнетаемая под высоким давлением жидкость воздействует на площадь пары венцов этих шестерен распределенной нагрузкой, вызывая прогиб шестерен как балок с шарнирно-подвижными опорами, которыми в данном случае стали подшипники 2 с упорной сферой радиусом  $R_1$ ,  $R_2$  или  $R_3$ . Подшипники поворачиваются при изгибе шестерен и одновременно с цапфами по сфере их контакта с упорной втулкой и крышками, сохраняя площадь трения цапфы с подшипником при любой нагрузке.

Вторая задача – повышение производительности и возможности перекачивания шестеренным насосом несмазывающих жидкостей – решается созданием многосекционного насоса нетрадиционной компоновки, т. е. не последовательным соединением, а параллельным. Выбор материалов для деталей насосов и обеспечение их работоспособности в несмазывающей среде является одной из главных задач при создании агрегата. Особые требования предъявляются к секционному торцевому уплотнению, контактирующему с торцами венцов пар шестерен. Одним из вариантов применяемых материалов является медистый силумин с добавками свинца, разработанный специалистами МГОУ-МГТУ им. Н. Э. Баумана и ОАО «Гидромаш», а наиболее приемлемым способом изготовления заготовок для деталей торцевого уплотнения (втулок и компенсаторов) с заданными антифрикционными свойствами – технологический процесс литья с кристаллизацией под давлением [1, 2].

Отливки изготовляли способом литья с кристаллизацией под давлением 160 и 240 МПа. Видно, что с увеличением количества добавки свинца в расплаве прочностные характеристики сплава в отливках незначительно снижаются, пластические – повышаются, а коэффициент трения остается практически постоянным. Однако вводить добавку свинца в количестве свыше 4 % в сплав АК7М6 нежелательно, так как повышается склонность последнего к обратной ликвации, в результате чего усвоение свинца резко снижается [3]. Например, при добавке свинца в расплав в количестве 4 % его усвоение составляет около 45 %, а при добавке 10 % – 22,5 %.

Насосы НШ 1200×3Г серийно выпускают в ОАО «Гидромаш».

### Библиографический список

1. Батышев К. А. Литье с кристаллизацией под давлением. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 167 с.
2. Батышев К. А., Семенов К. Г., Свинороев Ю. А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Издательство «Первый том», 2020 г. – 150 с.
3. Батышев К. А., Семенов К. Г., Свинороев Ю. А., Георгиевский М. Г. Затвердевание алюминиевых отливок при поршневом прессовании / Электротехнология, 2019, № 7, С. 11–17.

**СЕКЦИЯ  
МЕТАЛЛУРГИИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ**

УДК 669.046.516

*к.т.н., проф. Куберский С. В.,  
старший преподаватель Федотов О. В.,  
ассистент Стоцкая О. В.,  
магистр Завгородний С. Р.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

**РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ С  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ РАСПЛАВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В  
КАЧЕСТВЕ ИМИТАТОРОВ МАЛОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ**

В работе предложено описание физической модели промежуточного ковша МНЛЗ с электромагнитным перемешиванием для использования в качестве имитаторов маловязких жидкостей, выполненного в масштабе 1:10 по аналогии с промежуточным ковшом, применяемым на филиале №12 ЗАО «Внешторгсервис».

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, промежуточный ковш, электромагнитное перемешивание, активная зона, миксерная зона, электролит.

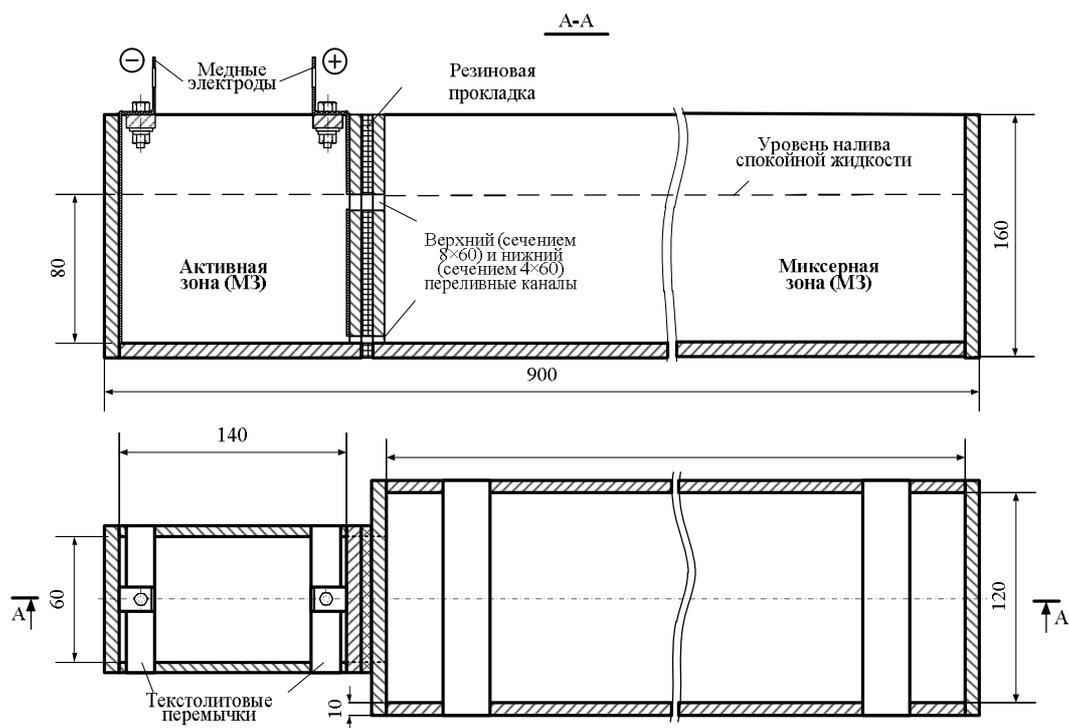
В настоящее время высокие требования, предъявляемые потребителями к качеству металлопродукции, в высшей степени способствуют развитию технологии выплавки и непрерывной разливки стали. Наиболее современной технологией внепечной обработки расплава в ПК, позволяющей решать технологические задачи, связанные с улучшением качества непрерывнолитого металла, является технология электромагнитного перемешивания [1].

Схемы внепечной обработки стали в ПК с использованием различного рода электромагнитных воздействий на расплав позволяют решить ряд технологических задач, связанных с гомогенизацией расплава, возможностью его подогрева и удаления неметаллических включений.

Ранее схема электромагнитного воздействия на расплав была описана в работах [2, 3]. Основными параметрами внешнего управления электромагнитным перемешиванием в ПК, разделенном на активную и миксерную зоны, являются перекрещивающиеся сила постоянного электрического тока, подаваемого на электроды и проходящего через расплав, и сила магнитной индукции в магнитопроводе электромагнитного перемешивателя (ЭМП).

В предыдущих исследованиях [3] на физической модели со сплавом Вуда, имитирующим расплав жидкой стали, были поставлены задачи установления характера образующихся циркуляционных потоков в ПК и поведения имитаторов неметаллических включений. Но из-за отсутствия прозрачности, высокой плотности и высокого поверхностного натяжения расплава, а также трудности с подбором имитаторов неметаллических включений часть поставленных задач не была решена. Поэтому было принято решение об изготовлении физической модели ПК для работы с маловязкими и прозрачными имитаторами жидкого расплава с добавлением красителей (например, 23 %-раствор NaCl в дистиллированной воде, пищевые красители). В качестве имитаторов неметаллических включений в этом случае планировалось использовать разные виды масел (отработка, силиконовое масло, касторовое масло с растворенной в нем канифолью и т. д.).

Для решения задач, вызвавших затруднения при использовании сплава Вуда, была изготовлена модель ПК с отъемной камерой для электромагнитного перемешивания в масштабе 1:10 за прототип взят ПК, использующийся на МНЛЗ филиала №12 ЗАО «Внешторгсервис» массой металла 60 т и размерами рабочего пространства 7000×1200×800. Эскиз и общий вид физической модели представлены на рисунке 1.



а)



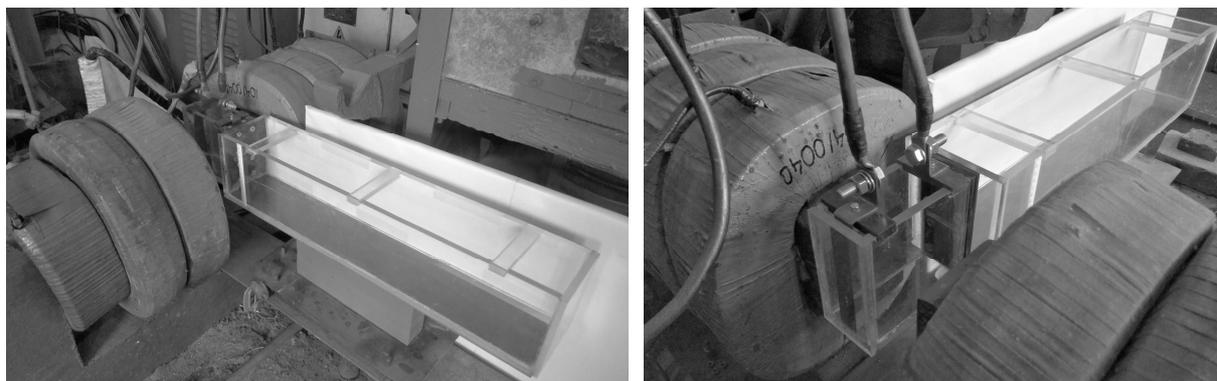
б)

Рисунок 1 – Эскиз (а) и общий вид (б) физической модели ПК для электромагнитной обработки

Модель изготовлена из листового органического стекла (акрила) толщиной 10 мм путем склейки образующих поверхностей дихлорэтаном. К активной зоне через болтовое соединение с текстолитовыми перемычками подведены два медных электрода (рис. 2, б). На наружной поверхности модели имеется линейка для определения уровня рабочей жидкости в миксерной зоне. Модель установлена на тележке для плавной подачи в зазор магнитопровода (рис. 2, а). Физическая модель и средства ее передвижения полностью выполнены из немагнитных материалов.

Размеры миксерной зоны на модели составили  $700 \times 120 \times 80$  мм. Активная зона представляет собой отъемную дополнительную камеру с размерами  $140 \times 60 \times 80$  мм, помещенную между обмотками электромагнита. Зоны соединены между собой винтами через резиновую прокладку толщиной 6 мм и имеют переливные каналы, нижний сечением  $4 \times 60$  мм и верхний сечением  $8 \times 60$  мм.

В качестве силовых установок, обеспечивающих работу ЭМП, планируется использовать сварочный источник питания ТИР-630, подающий постоянный электрический ток на электроды в активную зону и станцию управления ТЕ8-32, способную генерировать максимальный ток на катушках магнитопровода 240 А.



а)

б)

Рисунок 2 – Установка ЭМП в собранном виде (а) и подвод постоянного тока к активной зоне (б)

На предложенной физической модели планируется провести ряд экспериментов, которые позволят определить места образования застойных зон в ПК, характер и направление движения конвективных потоков при электромагнитной обработке имитатора расплава. Использование различных имитаторов неметаллических включений позволит визуализировать характер и скорость движения шлаковой субстанции и определить влияние на процессы параметров электромагнитных воздействий с целью ассимиляции неметаллических частиц шлаковым поясом.

### Библиографический список

1. Смирнов, А. Н. Современный прогресс и перспективы развития процессов непрерывной разливки [Текст] / А. Н. Смирнов // Сталь. – 2005. – №12. – С. 29–32.
2. Куберский, С. В. Разработка физической модели промежуточного ковша МНЛЗ с электромагнитным перемешиванием расплава / С. В. Куберский, О. В. Федотов, О. В. Стоцкая // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докладов IV Междунар. науч.-технич. конф. (г. Алчевск, 17 октября 2019 г.), ДонГТУ. – Алчевск, 2019. – С. 130–133.
3. Федотов, О. В. Исследование параметров электромагнитного перемешивания на физической модели промежуточного ковша МНЛЗ [Текст] / О. В. Федотов, С. В. Куберский, С. Р. Завгородний // Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали: Сб. тезисов докл. науч. – прак. конф./ Под общ. ред. С. В. Куберского. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. – С. 16–19.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА МНЛЗ

В последние несколько десятилетий непрерывная разливка стали является наиболее прогрессивным технологическим процессом в сталеплавильном производстве [1,2]. В настоящее время доля стали разливаемой непрерывным способом превышает 95 % от всего объема производства в черной металлургии. В связи с этим технологические приемы, оборудование и материалы, применяемые при непрерывной разливке стали постоянно совершенствуются, тем самым повышается эффективность производства.

МНЛЗ, которые были введены в работу в прошлые периоды, подвергаются модернизации, целью которой прежде всего является повышения производительности с одновременным сохранением или повышением качества разливаемого слитка. Для решения задач, которые стоят в рамках модернизации применяется различное диагностическое оборудование, а также математические модели [3 – 7]. Диагностическое оборудование применяется для оценки текущего состояния узлов и механизмов МНЛЗ, а также для определения потенциала при увеличении производительности в части возросших нагрузок. В процессе эксплуатации МНЛЗ непрерывный мониторинг технического состояния оборудования позволяет спрогнозировать срок, при достижении которого необходимо производить его замену или профилактику, для обеспечения безаварийной работы.

Все основные узлы и элементы современных МНЛЗ оснащаются датчиками и системами контроля. Начиная с промежуточного ковша до участка тянуще-правильного агрегата, в автоматическом режиме происходит управление всеми основными технологическими процессами разливки. В промежуточном ковше, стабильность температуры стали, контроль за которой осуществляется посредством встроенной термопары для непрерывного измерения, достигается путем регулировки расхода аргона (обеспечивается снижение температуры) и плазменного подогрева. Стабильное поддержание температурно-скоростного режима разливки, в свою очередь является основным требованием для получения качественной макроструктуры заготовки. Кристаллизатор оснащается оборудованием, которое отслеживает тепловое состояние гильзы кристаллизатора, для предупреждения прорывов корочки слитка под кристаллизатором. Контроль за изменением температуры поверхности слитка на участке от кристаллизатора до тянуще-правильного агрегата требуется для регулировки расхода водовоздушной смеси в зоне вторичного охлаждения [8 – 10].

Перспективной является технология ввода макрохолодильников в кристаллизатор [11]. За счет ввода стальной проволоки или дроби создается множество центров кристаллизации в гильзе кристаллизатора, тем самым значительно повышается скорость затвердевания непрерывнолитого слитка, что в условиях повышения скорости разливки предотвращает образование усадочных дефектов в структуре слитка. Посредством ввода в кристаллизатор макрохолодильников из цветных металлов достигается микролегирование стали. При этом равномерное распределение легирующих элементов в объеме слитка достигается за счет применения электромагнитного перемешивания в нескольких уровнях продвижения слитка (непосредственно под кристаллизатором и в зоне вторичного охлаждения) [12, 13].

Широкое распространение получила технология мягкого обжата, причем данный технологический прием применяется на всех современных как слябовых машинах, так и на крупносортовых МНЛЗ [14 – 16]. Эффект от мягкого обжата достигается за счет обеспече-

ния требуемого качества макроструктуры слитка при одновременном повышении скорости разливки.

Комплексная реализация указанных выше мероприятий обеспечивает достижение максимальной эффективности для решения поставленных задач.

### Библиографический список

1. Состояние непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ в Украине и Молдове / Сотников А. Л. и др. // Сталь. – 2013. – №12. – С. 8–13.
2. Флик, А. Тенденции в непрерывной разливке стали: вчера, сегодня, завтра / А. Флик, К. Штойбер // Черные металлы. – 2012. – №5. – С. 37–46.
3. Шахов, С. И. Модернизация сортовых и блюмовых УНРС с целью расширения размерного и марочного сортамента отливаемых заготовок, улучшения их качества и увеличения производительности / С. И. Шахов, А. С. Смоляков, Г. И. Николаев // Черные металлы. – 2015. – №3. – С. 25–29.
4. Фольрат, К. Повышение роли моделирования процесса разливки в условиях производства // Черные металлы. – 2013. – №10. – С. 85–93.
5. Тимошпольский, В. И. Совершенствование технологии непрерывной разливки сортовых заготовок, расчетный анализ процессов затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок. Сообщение 1 / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Сталь. – 2019. – №11. – С. 14–18.
6. Тимошпольский, В. И. Совершенствование технологии непрерывной разливки сортовых заготовок, расчетный анализ процессов затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок. Сообщение 2 / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Сталь. – 2019. – №12. – С. 12–17.
7. Соловьева, О. И. Разработка интеллектуальной системы диагностики состояния кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / О. И. Соловьева, А. В. Кожевников // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 1 (62). – С. 20–25.
8. Измерение температуры поверхности сляба в первом сегменте УНРС / Шеперкёттер М. и др. // Черные металлы. – 2015. – №3. – С. 48–53.
9. Новый радиометрический датчик измерения уровня жидкого металла в кристаллизаторе / Фабрициоли М. и др. // Черные металлы. – 2015. – №6. – С. 54–62.
10. Инновационные методы контроля процесса затвердевания непрерывнолитых заготовок / Ламп Т. и др. // Черные металлы. – 2012. – №7. – С. 44–49.
11. Опытнo-промышленная реализация технологии и оборудование для подачи холодильников-инокуляторов в кристаллизатор УНРС в условиях ПАО «Северсталь» / Туманов Д. В. и др. // Металлург. – 2016. – №7. – С. 44–47.
12. Усовершенствование встроенного электромагнитного перемешивания в кристаллизаторах блюмовых МНЛЗ / Шахов С. И. и др. // Металлург. – 2020. – №5. – С. 33–37.
13. Разработка системы электромагнитного перемешивания жидкой стали в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ / Сивак Б. А. и др. // Металлург – 2019. – №9. – С. 33–36.
14. Использование режима мягкого обжата при производстве длинномерного проката / Р. Томе и др. // Черные металлы. – 2012. – №9. – С. 54–61.
15. Оптимизированное обжатие заготовки с жидкой сердцевиной на CSP-агрегате компании Masteel / Ч. Юген и др. // Черные металлы. – 2011. – №4. – С. 37–40.
16. Разработка режимов мягкого обжата при разливке слябовых заготовок на установке непрерывной разливки слябов № 4 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» / П. В. Эккерт и др. // Черные металлы. – 2015. – №5. – С. 26–27.

## К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДУВКИ АРГОНОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ И ЗАЩИТЫ ОТ ВТОРИЧНОГО ОКИСЛЕНИЯ СТАЛИ

Современные темпы роста объема металлопродукции, получаемой из непрерывнолитых заготовок, и расширение марочного сортамента разливаемых сталей требуют адаптации оборудования и технологии непрерывной разливки к условиям повышения качества слябов при максимально возможном повышении производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Эти задачи с успехом решаются благодаря совершенствованию режимов внепечной обработки стали в сталеразливочных ковшах, в том числе, посредством адаптации режимов продувки аргоном для конкретных условий производства.

Как известно, аргон является элементом нулевой группы Периодической системы, входит в число инертных газов. Порядковый номер 18, атомная масса 39,944. Широкое практическое применение аргон в металлургии получил во второй половине XX в., когда было налажено его получение в больших объемах (попутно с получением кислорода из воздуха) и с требуемой чистотой (содержание азота 0,0003-0,0005 % и кислорода 0,0001 %).

В настоящее время в технологии выплавки стали продувка металла аргоном является необходимой и обязательной операцией внепечной обработки стали, особенно в условиях крупносерийного производства конверторных цехов. Продувка металла аргоном в ковше решает следующие задачи [1]:

- умеренное охлаждение металла (не более чем на  $10-15^{\circ}\text{C}$ );
- ускоренное плавление раскислителей и легирующих элементов, вводимых в ковш;
- выравнивание химического состава и температуры металла;
- очищение металла от неметаллических включений, образующихся вовремя раскисления и легирования, вследствие их выноса на поверхности пузырей (флотации);
- углеродное раскисление металла и его обезуглероживание;
- дегазация металла;
- увеличение интенсивности процесса взаимодействия металла со шлаком, обеспечивающим его десульфурацию.

Кроме того, аргон используется как газ-носитель при вдувании в металл порошков высокоактивных металлов и сплавов, которые применяются для раскисления и легирования стали.

Удельный расход аргона на продувку металла в ковше бывает максимальным при дегазации и глубоком обезуглероживании металла и составляет  $5-10\text{ м}^3/\text{т}$ , что может вызывать охлаждение металла на  $10-20^{\circ}\text{C}$ . В данном случае время продувки составляет до 30 мин, во время которой металл охлаждается со скоростью  $0,5-1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  (зависит от объема ковша) из-за потери тепла в окружающую среду. Как следствие, общее охлаждение металла может составлять до  $50^{\circ}\text{C}$ . Удельный расход аргона для решения других технологических задач составляет  $0,5-1\text{ м}^3/\text{т}$ . Это вызывает охлаждение металла на  $1-2^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность продувки в таком случае около 10 – 15 мин, как следствие общее охлаждение не превышает  $20^{\circ}\text{C}$  [2].

Рафинирующее действие аргона используется не полностью из-за недостаточности кинетических условий взаимодействия пузырей аргона с жидким металлом для того, чтобы полностью реализовать термодинамические возможности перехода в пузыри аргона молекул  $\text{CO}$  (при обезуглероживании) и  $\text{H}_2$  (при дегазации). Это происходит из-за недостаточной

поверхности раздела фаз газ-металл и малым временем их взаимодействия. И то, и другое наблюдается ввиду очень больших размеров пузырей. Как следствие, при продувке металла аргоном в сталеразливочном ковше очень важно обеспечить максимальное уменьшение размеров пузырей. Благодаря этому происходит увеличение их общей поверхности, т. е. поверхности взаимодействия газ-металл, и увеличение времени нахождения пузырей в металле, так как скорость всплывания мелких пузырей значительно меньше, нежели крупных.

На практике обычно наблюдается так называемый «струйный режим» продувки, когда избыточно вводимое количество аргона, превышающее пределы газовой нагрузки ковша, формирует в объеме расплава по всей полезной высоте каналы, приводящие к увеличению диаметра раскрытия зеркала («глаза») и существенно уменьшает объем металла, вовлекаемого в активное перешивание и гомогенизацию [3]. Поэтому задача организации пузырьков – струйного режима продувки стали в ковше является важной задачей на пути улучшения технологии внепечной обработки и разлива стали.

Практической целью проведенных исследований являлось моделирование продувки стали аргоном в сталеразливочном ковше на стенде МНЛЗ для условий максимально идентичных технологическому процессу разлива на УНРС-4,6 КЦ-1 ПАО «НЛМК» с использованием 160-ти тонного сталеразливочного ковша. Исследования проводились на базе лаборатории компьютерного моделирования кафедры металлургических технологий ФГБОУ ВО «ЛГТУ». Построение рабочих чертежей элементов ковша с созданием 3D-моделей, проводилось в лицензионной CAD-системе «Компас 3D V14» [4-6]. Окончательная сборка модели сталеразливочного ковша с пробками и объемом производилась в системе моделирования инженерных процессов «ANSYS». В качестве аппаратного обеспечения моделирования использовалась инженерная станция на базе «Intel Core i7», 3.6 ГГц, 64 Гб DDR4, GeForce TITAN, HDD 1 Тб.

На рисунке 1 представлен расход аргона как линейная функция уровня расплава по верхнему уровню налива с учетом толщины шлака 200 – 250 мм при моделировании движения металла и газа в сталеразливочном ковше, что имитирует его опорожнение в процессе непрерывной разлива стали на УНРС-4,6 КЦ-1 ПАО «НЛМК». Далее представлены фотографии распределения скорости потоков расплава в процессе продувки стали аргоном на 3D-модели 160-ти тонном сталеразливочном ковше (рис. 2-10).

Для каждого уровня расплава (полный ковш, три четвертых по высоте, половина и четверть от общего объема расплава) выбирались четыре типичных вида – горизонтальные сечения по всему диаметру ковша, профильное сечение по продувочным пробкам, профильное сечение в «мертвой зоне» между продувочными пробками, и изометрическая прозрачная модель с отмеченными «застойными зонами», в которых скорость движения масс расплава варьировалась в диапазоне от 0 до 0,04 м/с.

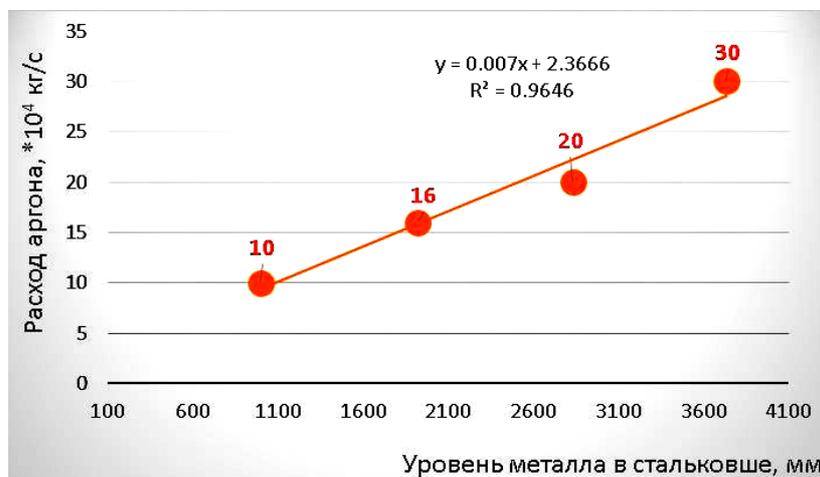


Рисунок 1 — Зависимость расхода аргона от уровня металла в ковше на модели

На рисунках 2-6 представлены фотографии результатов расчета движения металла и газа при уровне расплава 100 %.

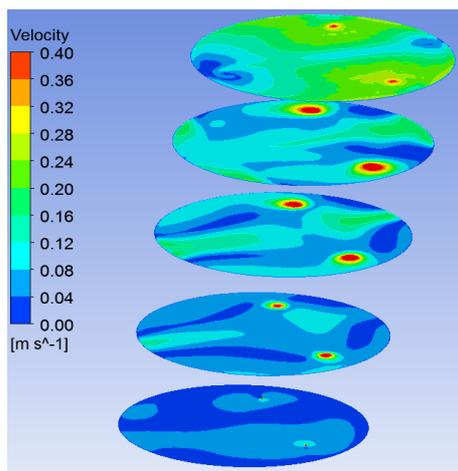


Рисунок 2 – Распределение скорости потоков в горизонтальных сечениях ковша при уровне расплава 100 %

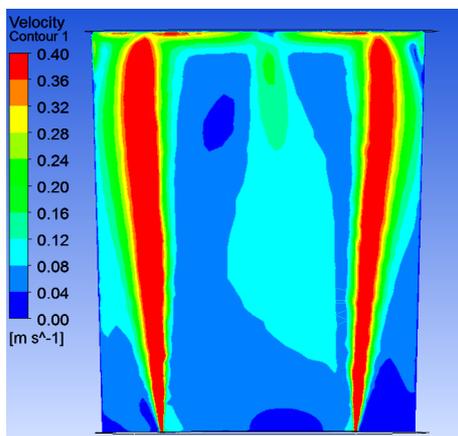


Рисунок 4 – Распределение скорости потоков в профильном сечении ковша по пробкам при уровне расплава 100 %

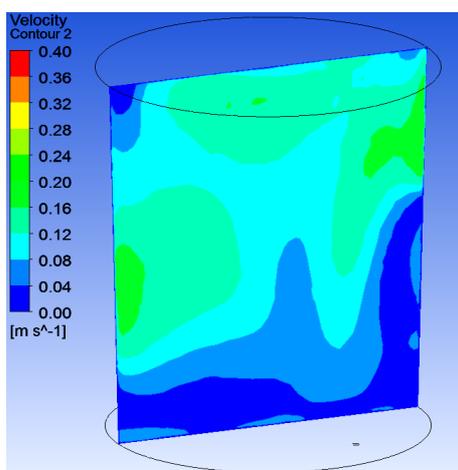


Рисунок 5 – Распределение скорости потоков в профильном сечении ковша между пробками при уровне расплава 100 %

На рисунке 7 представлены фотографии результатов расчета «застойных зон» при уровне расплава 75 % и 50 % от номинального.

И, наконец, на рисунках 8-10 представлены фотографии результатов расчета движения металла и газа при уровне расплава 25 %.

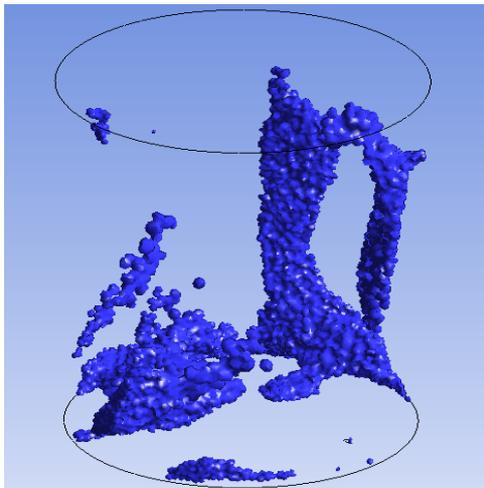


Рисунок 6 – Изометрическая проекция «застойных зон» при уровне расплава 100 %

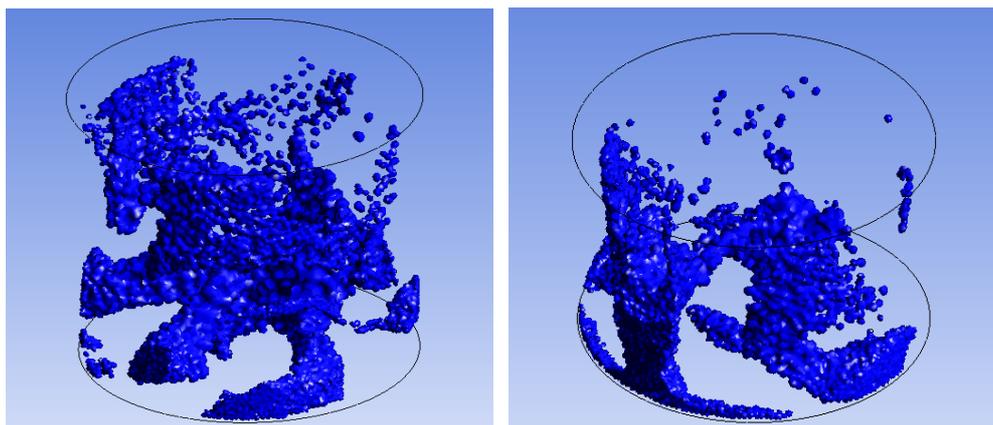


Рисунок 7 – Изометрическая проекция «застойных зон» при уровне расплава: слева – 75 %, справа – 25 %

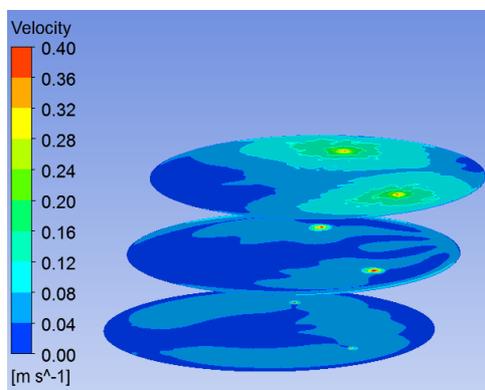


Рисунок 8 – Распределение скорости потоков в горизонтальных сечениях ковша при уровне расплава 25 %

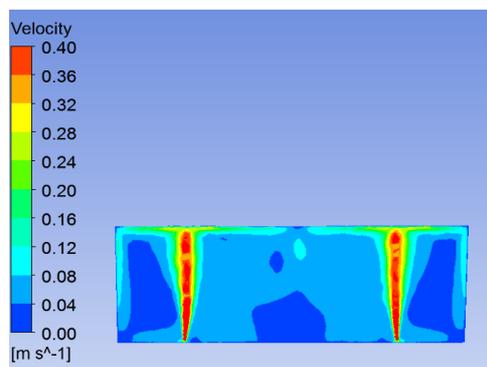


Рисунок 9 – Распределение скорости потоков в профильном сечении ковша по пробкам при уровне расплава 25 %

По результатам серии расчетов движения расплава в процессе продувки аргоном в сталеразливочном ковше при варьировании уровня металла и расхода инертного газа как некоторой линейной функции (рисунок 1) можно заключить, что при снижении уровня металла до 50 и 25 % от номинальной высоты, эффективность перемешивания значительно снижается. Это снижение отчетливо видно по увеличению площади застойных зон металла по профильному сечению и площади в сечении между продувочными пробками, а также значительном увеличении объема зон на изометрической модели (см. рисунки 5, 7 и 10). Это приводит к необходимости корректировки расхода аргона и проведении серии дополнительных расчетов при уменьшении шага варьирования высоты расплава с 25 до 10 % на первоначальном этапе.

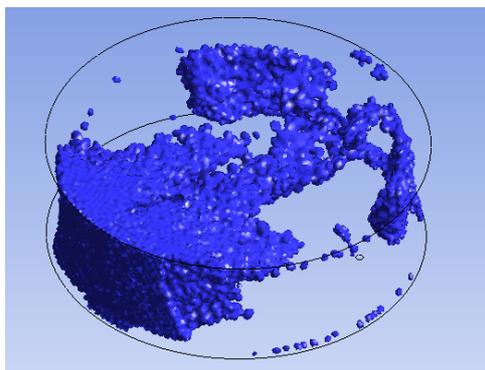


Рисунок 10 – Изометрическая проекция «застойных зон» при уровне расплава 25%

Результатом серии моделирований продувки расплава аргоном стала адекватная и устойчивая 3D-модель сталеразливочного ковша с расплавом и набором начальных и граничных условий расчета и возможностью задания расхода аргона как функции высоты расплава, позволяющая оценивать характер движения металла, газа, шлака и неметаллических включений в процессе опорожнения ковша на сталеразливочном стенде УНРС-4,6 КЦ-1 ПАО «НЛМК». Полученные результаты возможно применить на производстве для улучшения качества слябов и листового проката по дефектам макроструктуры и поверхности, связанным с наличием неметаллических включений.

### Библиографический список

1. Ефимова, В. Г. Теоретическое исследование и физическое моделирование параметров рафинирования металла в промежуточных ковшах слябовой МНЛЗ при продувке аргоном [Электронный ресурс] / В. Г. Ефимова, А. В. Ноговицын, А. В. Кравченко // Процессы литья. – 2013. – №2(98). –

С. 60-67. – Режим доступа: <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/132914>; (дата обращения: 30.02.2020 г.).

2. Совершенствование защиты стали от вторичного окисления при разливке на МНЛЗ [Текст] / А. Н. Смирнов [и др.] // Сталь. – 1998. – № 11. – С. 19–23.

3. Рафинирование стали инертным газом [Электронный ресурс] / К.И. Баканов [и др.] – М.: Металлургия, 1975 – 232 с. – Режим доступа: <https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/rafinirovanie-stali-inertnym-gazom>; (дата обращения: 30.02.2020 г.).

4. Шипельников, А. А. Исследование гидродинамики расплава в условиях стационарного теплообмена в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А. А. Шипельников, А. Н. Роговский, Н. А. Бобылева // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – Т. 16, № 2. – С. 51-55. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32574024>; (дата обращения: 04.06.2019 г.).

5. Шипельников, А. А. К вопросу о дозированной подаче стали в слябовый кристаллизатор [Электронный ресурс] / А. А. Шипельников, Н. А. Бобылева, В. Н. Роговский // World Science: problems and innovations: сборник статей XXV Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2018. – С. 70–72. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36558147>; (дата обращения: 04.06.2019 г.).

6. Шипельников, А. А. Моделирование движения расплава в промежуточном ковше сортовой МНЛЗ [Электронный ресурс] / А. А. Шипельников, Н. А. Бобылева // World Science: problems and innovations: сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2019. – С. 75–79. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32750492>; (дата обращения: 04.06.2019 г.).

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ И АГЛОМЕРАТА

В работе представлен статистический анализ химического состава агломерационной шихты и полученного из нее агломерата. Полученные результаты позволяют предположить, что на стабильность химического состава агломерата существенное влияние оказывают колебания содержания СаО в агломерационной шихте.

**Ключевые слова:** агломерационная шихта, агломерат, колебания, химический состав

На современных металлургических предприятиях основными составляющими железорудной части шихты доменных печей являются агломерат и окатыши. Их химический состав существенно влияет на технико-экономические показатели работы печей, при этом основными требованиями являются:

- максимальное содержание железа;
- минимальное количество вредных примесей;
- минимальные количественные колебания химического состава [1, 2].

С целью соблюдения последнего требования для агломерата на металлургических предприятиях выполняют: ряд усреднительных операций на разных стадиях технологического процесса, повышают точность дозировки компонентов при составлении шихтовых смесей и др.

Проведен статистический анализ химических составов агломерационной шихты и полученного из нее агломерата на одном из металлургических предприятий. За исследуемый период рассмотрено 4178 проб агломерационной шихты и 4605 проб агломерата. После их синхронизации и удаления неполных проб, оставлено – 4153 пробы. В качестве исследуемых факторов в пробах агломерационной шихты использовали данные о содержании Fe, СаО, SiO<sub>2</sub>, влажности и основности (СаО/SiO<sub>2</sub>), а в пробах агломерата – Fe, FeO, СаО, SiO<sub>2</sub>, MgO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO и основности (СаО/SiO<sub>2</sub>). В таблице 1 приведены основные статистические характеристики переменных по выборке.

Таблица 1 — Статистические характеристики переменных (%)

Переменная	Кол-во проб	Среднее	Min значение	Max значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
Агломерационная шихта						
Fe <sub>ш</sub>	4153	49,20	40,10	61,40	2,750	6
SiO <sub>2ш</sub>	4153	8,50	5,80	11,60	0,720	8
СаО <sub>ш</sub>	4153	10,50	1,80	16,90	1,860	18
Влажность <sub>ш</sub>	4153	7,30	1,20	15,50	1,410	19
Основность <sub>ш</sub>	4153	1,24	0,24	2,42	0,210	17
Агломерат						
Fe <sub>а</sub>	4153	53,80	48,70	58,80	1,570	3
FeO <sub>а</sub>	4153	13,20	5,80	24,30	1,860	14
СаО <sub>а</sub>	4153	12,10	6,40	17,60	1,660	14
SiO <sub>2а</sub>	4153	9,40	7,20	11,90	0,690	7
MgO <sub>а</sub>	2156	1,30	0,70	2,60	0,180	14
Al <sub>2</sub> O <sub>3а</sub>	2033	1,20	0,50	2,20	0,230	19
MnO <sub>а</sub>	784	0,30	0,00	1,10	0,120	46
Основность <sub>а</sub>	4153	1,29	0,69	2,02	0,157	12

Для оценки стохастической связи между переменными были рассчитаны коэффициенты парной корреляции. Переменные с малыми значениями всех коэффициентов были исключены из дальнейшего анализа, а остальные, с учетом внесенных изменений, пересчитаны и приведены в таблице 2.

Все отмеченные коэффициенты парной корреляции указывают на связи, объясняемые известными зависимостями материальных балансов производства агломерата. Однако необходимо обратить внимание на сохранение значимости связей между компонентами в группах, при переходе от агломерационной шихты к агломерату.

Таблица 2 — Коэффициенты парной корреляции между переменными (выделены значения 0,5 и более)

Переменная	Fe <sub>ш</sub>	SiO <sub>2ш</sub>	CaO <sub>ш</sub>	Влажность <sub>ш</sub>	Основность <sub>ш</sub>
Fe <sub>ш</sub>	1,00	-0,46	<b>-0,91</b>	0,37	<b>-0,72</b>
SiO <sub>2ш</sub>	-0,46	1,00	0,34	-0,49	-0,14
CaO <sub>ш</sub>	<b>-0,91</b>	0,34	1,00	-0,38	<b>0,88</b>
Влажность <sub>ш</sub>	0,37	-0,49	-0,38	1,00	-0,15
Основность <sub>ш</sub>	<b>-0,72</b>	-0,14	<b>0,88</b>	-0,15	1,00
Fe <sub>а</sub>	<b>0,65</b>	-0,43	<b>-0,67</b>	0,45	<b>-0,50</b>
FeO <sub>а</sub>	0,13	-0,03	-0,18	0,11	-0,18
CaO <sub>а</sub>	<b>-0,64</b>	0,31	<b>0,71</b>	-0,40	<b>0,59</b>
SiO <sub>2а</sub>	-0,44	<b>0,60</b>	0,40	<b>-0,59</b>	0,12
Основность <sub>а</sub>	-0,48	-0,01	<b>0,57</b>	-0,10	<b>0,62</b>
Fe <sub>ш</sub>	<b>0,65</b>	0,13	<b>-0,64</b>	-0,44	-0,48
SiO <sub>2ш</sub>	-0,43	-0,03	0,31	<b>0,60</b>	-0,01
CaO <sub>ш</sub>	<b>-0,67</b>	-0,18	<b>0,71</b>	0,40	<b>0,57</b>
Влажность <sub>ш</sub>	0,45	0,11	-0,40	<b>-0,59</b>	-0,10
Основность <sub>ш</sub>	<b>-0,50</b>	-0,18	<b>0,59</b>	0,12	<b>0,62</b>
Fe <sub>а</sub>	1,00	0,15	<b>-0,93</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,68</b>
FeO <sub>а</sub>	0,15	1,00	-0,13	0,01	-0,16
CaO <sub>а</sub>	<b>-0,93</b>	-0,13	1,00	0,49	<b>0,85</b>
SiO <sub>2а</sub>	<b>-0,64</b>	0,01	0,49	1,00	-0,04
Основность <sub>а</sub>	<b>-0,68</b>	-0,16	<b>0,85</b>	-0,04	1,00

Как видно из таблицы 2, существенные коэффициенты парной корреляции для составляющих агломерационной шихты находятся между содержанием Fe<sub>ш</sub>, CaO<sub>ш</sub> и Основность<sub>ш</sub>, что также наблюдается и в агломерате, но в последнем добавляется значительно усилившаяся связь между содержанием Fe<sub>а</sub> и SiO<sub>2а</sub>.

В результате можно предположить, что на колебания химического состава агломерата существенное влияние оказывают колебания содержания CaO в агломерационной шихте. Соответственно снижение колебаний последнего должно привести к стабилизации химического состава спекаемого железорудного материала.

В дальнейшем для проверки и уточнения выдвинутого предположения планируется провести канонический анализ рассматриваемых данных.

### Библиографический список

1. Товаровский, И. Г. Доменная плавка. 2-е изд. / И. Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
2. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. 3-е изд. / Под ред. Ю. С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров электродных процессов на извлечение металлов из разбавленных растворов с использованием вольтамперометрических методов.

**Ключевые слова:** амальгамный метод, инверсионная вольтамперометрия, электрохимическое концентрирование, фон, деполяризатор, амальгамный электрод, многокомпонентные металлосодержащие отходы.

Данная работа является частью исследований, которые проводятся для оценки возможности электрохимического концентрирования некоторых металлов из сильно разбавленных растворов при переработке отходов металлургического производства.

Экономические предпосылки создания безотходной технологии и безотходного производства тесно связаны с определением точного состава отходов черной металлургии. Современная металлургия ставит перед аналитическим контролем сложные задачи, решить которые можно только при комплексном подходе к анализу, как к системе получения информации о химическом составе объектов металлургического производства. В настоящее время основой методов анализа веществ (кулоно-, кондукто- и потенциометрии, полярографии) являются электрохимические процессы [1-2].

Вольтамперометрические (ВА) методы основаны на изучении зависимости между силой тока в цепи электролитической ячейки и напряжением, приложенным к электродам, которые находятся в растворе (или расплаве) исследуемого вещества. Аналитические возможности (ВА) методов очень широки. Методы эти универсальны, т. к. позволяют определять практически все катионы металлов, многие анионы. Определение возможно в водных и неводных растворах, а также в расплавах электролитов. Преимущество метода в большой чувствительности при малой погрешности, достаточной селективности, скорости выполнения анализа.

Инструментальное совершенствование (ВА) методик привело к созданию новых ее вариантов (инверсионная ВА, адсорбционная ВА, контактная ВА и т. д.) с использованием электронных полярографов в сочетании с компьютерной техникой [3-5 и др.]. Инверсионные методы являются самыми чувствительными из всех электрохимических методов.

При выщелачивании отходов металлургической промышленности образуются разбавленные растворы, которые содержат целый набор различных ионов. При исследовании отходов титано-магниевого производства, которые представляют собой многокомпонентную смесь хлоридов, содержание металлов определялось методом инверсионной вольтамперометрии (ИВА) с амальгамными электродами [6]. Особенности амальгамного метода и преимущества использованных электродов представлены в работах [7, 8].

Выбор условий эксперимента (потенциал накопления, время накопления, начальный потенциал, скорость развертки) и снятие кривой осуществляли с использованием программы IVA, разработанной сотрудниками НИПКИ «Параметр».

Для исследования процессов извлечения металлов из растворов целесообразно использовать (ИВА), которая позволяет извлекать металлы из многокомпонентных систем методом электрохимического концентрирования. Важную роль в этих процессах играют условия проведения электрохимического накопления конкретного металла и его растворения из амальгамы. Для извлечения металла из амальгамы необходимо его электрохимическое окисление. Для этого в (ИВА) используют линейную развертку потенциала. При этом на высоту аналитического пика влияет скорость развертки потенциала. Высота пика зависит еще и от количества вещества, осажденного на электроде, которое является функцией его концентрации в

растворе. В этом случае эффективность зависит от условий процесса растворения (окисления), в первую очередь – от скорости поляризации, которая задается скоростью развертки потенциала. В работе [4] приведена математическая модель этого процесса для электродов различного типа.

Анализ результатов исследований указывает на необходимость более глубокого и детального подбора соответствующих параметров для электрохимического концентрирования металлов, что даст возможность добиться строгой последовательности восстановления и/или окисления этих металлов на ртутно-пленочных электродах. Это может иметь большое значение для разработки технологий электрохимического извлечения малых количеств металлов из отходов металлургического производства.

### Библиографический список

1. Химия : учебник; 3-е изд., испр. [Текст] / А. А. Гуров [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 784 с.
2. Карпов, Ю. А. Аналитический контроль в металлургическом производстве: учебное пособие [Текст] / Ю. А. Карпов, А. П. Савостин, В. Д. Сальников. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 352с.
3. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство: уч. пособие для вузов [Текст] / В. Б. Алесковский [и др.]; Под. ред. В. Б. Алесковского – Л.: Химия, 1988. – 376 с.
4. Выдра, Ф. Инверсионная вольтамперометрия [Текст] / Ф. Выдра, К. Штулик, Э. Юлакова. Перевод В. А. Немова.: Под ред. Б. Я. Каплана. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – С. 274.
5. Сечина, А. А. Возможность совместного определения осмия и рения в молибденовых рудах [Текст] / А. А. Сечина, Л. Г. Гольц, Н. А. Колпакова // Материалы XVIII Международной Черняевской конференции по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. – М., 2006. – С. 82–83.
6. Божанова, Е. С. Амальгамное извлечение металлов из отходов [Текст] / Е. С. Божанова, С. В. Семирягин // Зб. тез доповідей Третьої Всеукраїнської наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення». 17–19 березня 2009 р. – Донецьк : ДонНУ, 2009 – С. 123.
7. Смирнова, И. В. Закономерности влияния объемных и поверхностных химических стадий в инверсионной вольтамперометрии хелатов и их использование в анализе некоторых пищевых продуктов [Текст] : дис. ... канд. хим. наук: 02.00.02 / Смирнова Ирина Владимировна; ТПУ. – Томск, 1996. – 132 с.
8. Семирягин, С. В. Использование электролиза в металлургических технологиях. [Текст] / С. В. Семирягин, И. В. Смирнова, Е. С. Божанова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Вып. 28 – Алчевск : ДонГТУ, ИПЦ «Лад», 2009. –С. 232–238.

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ОДНОРОДНОСТИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

В работе предложен способ повышения степени однородности гранулометрического состава агломерата за счет усовершенствования конструкции одновалковой дробилки. Аналитически обоснована целесообразность применения ротора дробилки с шевронным расположением лопастей звездочек в процессе дробления агломерационного пирога.

**Ключевые слова:** агломерат, гранулометрический состав, одновалковая дробилка, эффективность процесса дробления.

Повышение качества железорудной части шихты является одним из наиболее эффективных способов, который во время работы доменной печи позволяет снизить удельный расход кокса, повысить ее производительность, уменьшить выход шлака и создает благоприятные условия для применения технологии вдувания в печь пылеугольного топлива [1].

Для этих целей используется процесс агломерации, который является заключительной операцией в комплексе мероприятий по подготовке железных руд к доменной плавке. Главная цель агломерационного производства состоит в том, чтобы превратить мелкий рудный концентрат в более крупные куски – агломерат, использование которого в доменной плавке обеспечивает формирование слоя шихты хорошей газопроницаемости, что является обязательным условием эффективной и высокопроизводительной работы доменной печи [1].

На последнем этапе процесса спекания аглопирог необходимо раздробить на отдельные куски. Для этого на большинстве ведущих металлургических предприятий применяют роторные одновалковые зубчатые дробилки [1-3]. Наиболее существенным их недостатком является переизмельчение агломерата, в результате чего наряду с крупными кусками требуемых размеров образуется большое количество мелких зерен, что снижает производительность агломашин по выходу годного продукта и негативно сказывается на технико-экономических показателях хода доменных печей. Образование мелочи возникает вследствие раздавливания значительной части продукта рабочей поверхностью лопастей о приемный стол и колосники, а не разламывания пирога относительно консольной части поверхности стола [3, 4].

Однако наличие в доменной шихте особо крупных кусков также является негативным фактором для доменного процесса, от которого необходимо избавляться, по причине их невысокой прочности при транспортировке и перегрузке, а также из-за того, что они могут создать проблемы при подаче в доменные печи, в которых применяются бесконусные загрузочные устройства.

Крупность кусков агломерата зависит от различных факторов, одним из которых является расстояние, проходимое аглопирогом при свободном движении в рабочем пространстве ротора до контакта с рабочей поверхностью лопастей звездочек дробилки, при котором происходит его разрушение [3].

Величину проникновения аглопирога в рабочую зону лопастей ротора можно определить с помощью следующей зависимости [4]:

$$a = \frac{g \cdot (\sin \beta_n - \mu_a \cos \beta_n) \cdot t^2}{2}, \quad (1)$$

где  $a$  – расстояние, которое пройдет аглоспек за время  $t$  в рабочем пространстве дробилки, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_n$  – угол наклона поверхности прием-

ного стола относительно горизонтали, град;  $\mu_a$  – коэффициент трения скольжения агломерата по стали.

Для определения времени  $t$  необходимо рассмотреть процесс выгрузки аглопирога со спекательных тележек агломерационной машины в рабочее пространство дробилки. В процессе движения паллет аглоспек сбрасывается с них и скользит по поверхности приемного стола, затем аглоспек упирается в торцевую часть зубьев ротора и останавливает свое дальнейшее перемещение в рабочее пространство дробилки. После того, как торцевая поверхность лопасти (в процессе вращения ротора) проворачивается и выходит из зоны контактного взаимодействия с материалом, пирог начинает двигаться в рабочей зоне лопастей до контакта со следующим рядом зубьев, при котором происходит их контактное взаимодействие с аглоспекком.

Для роторов с расположением лопастей звездочек в один ряд время  $t$  определяется как:

$$t = \frac{30}{n_p} \left( \frac{2}{n_z} - \frac{b_z}{\pi^2 D_p} \right), \quad (2)$$

где  $n_p$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>;  $n_z$  – количество зубьев на одной звёздочке, шт.;  $b_z$  – ширина торцевой поверхности зуба, м;  $D_p$  – рабочий диаметр внешней грани звездочек, м.

При шевронном расположении лопастей [4, 5]:

$$t = \frac{15 \left( (N_{zg} - k_N) \cdot b_z + 4\pi^2 D_p \right)}{\pi^2 D_p n_p n_z (N_{zg} - k_N)}, \quad (3)$$

где  $N_{zg}$  – количество звездочек, установленных на валу ротора, шт.;  $k_N$  – конструктивный показатель рабочего органа дробилки (для роторов с нечетным количеством звёздочек  $k_N = 1$ , с четным –  $k_N = 2$ ).

На примере дробилки ДО-1300-2700-61 (с технико-технологическими параметрами [4] в условиях агломерационного производства Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС») проведен анализ условий движения аглопирога в рабочем пространстве одновалковой дробилки в процессе его дробления.

Так при расчетах расстояния, пройденного аглопирогом в дробилке с типовой конструкцией ротора за время свободного движения в ее рабочем пространстве, по зависимости (1) было получено значение 1,4...3,1 м (в пределах коэффициента трения агломерата по стали  $\mu_a = 0,4...0,5$ ). Это указывает на то, что основная часть аглоспека полностью проникает в рабочее пространство за время поворота ротора от поверхности нерабочей грани уходящего от него зуба до рабочей грани лопастей следующего ряда. Вследствие этого, дробление большинства кусков аглоспека обеспечивается за счет взаимодействия с колосниковой решеткой, что не позволяет обеспечить стабильный фракционный состав дробленого агломерата [4].

При использовании шевронных роторов [5] происходит поэтапное внедрение аглопирога в дробилку [4] между рабочими поверхностями лопастей звездочек на расстояние  $a = 0,021...0,049$  м, что обеспечивает раздавливание аглоспека в зоне приемного стола на куски определенной фракции с верхним пределом, не превышающим максимального значения  $a$ . Это позволит стабилизировать размеры отдельных кусков агломерата и уменьшить количество материала, раздавливаемого о колосники, что снизит содержание мелочи, пылевидной и крупной фракций в дробленном продукте.

Таким образом, в работе установлено, что применение дробилок с шевронным расположением зубьев позволит обеспечить условия ступенчатого проникновения агломерационного спека в рабочее пространство дробилки и раздавливания пирога о рабочий стол на куски

требуемого размера, что положительно скажется на самом процессе дробления и степени однородности гранулометрического состава агломерата.

Анализ результатов исследований указывает на необходимость более глубокого и детального изучения влияния различных параметров процесса дробления на фракционный состав агломерата, что в настоящее время реализуется в Донбасском государственном техническом институте с привязкой к агломерационному производству Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШ-ТОРГСЕРВИС».

### Библиографический список

1. Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов [Текст] / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Т. Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. – 400 с.
2. Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование фабрик окускования и доменных цехов : учебное пособие для вузов [Текст] / В. М. Гребеник [и др.]. – К.: Выща шк., 1985. – 312 с.
3. Власенко, Д. А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко // Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, Донецк, 21–23 мая 2019 года. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Т. 3 – С. 150–154.
4. Власенко, Д. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров одновалковой дробилки железорудного агломерата с шевронным расположением зубьев звёздочек ротора [Текст] / Д. А. Власенко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. – № 19 (62). – С. 69–79.
5. Пат. 196194 Российская Федерация, МПК В02С 4/00, В02С 4/28, В02С 4/30. Ротор одновалковой зубчатой дробилки / Власенко Д. А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. – № 2019137708; заявл. 21–11–2019; опубл. 19–02–2020, бюл. № 5. – 6 с.: ил.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ НА АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЕ

Преобладающая часть продукции агломерационных фабрик мира – это агломераты повышенной и высокой основности. Использование их флюсующей способности при проплавке в доменных печах совместно с неофлюсованными окатышами обеспечивает экономию металлургического кокса. При этом для улучшения газодинамических условий плавки чугуна важно повышение прочности аглоспека и улучшение гранулометрического состава годного агломерата. Эта задача актуальна для многих отечественных предприятий, в том числе для Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ).

Агломерационный цех предприятия – единственный производитель высокоосновного агломерата в ДНР. Его технический уровень не соответствует многим современным требованиям. Доступным и не требующим значительных материальных затрат способом совершенствования технологии производства агломерата является модернизация технологической операции загрузки шихты на агломашину, при которой обеспечиваются рациональные параметры формируемого слоя, и, как следствие, достигается улучшение основных производственных показателей.

Загрузка шихты на агломашину – важнейшая заключительная технологическая операция подготовки шихты к спеканию. Получение прочного агломерата невозможно без рационального формирования слоя шихты на агломашине.

Цель работы – совершенствование технологии формирования слоя шихты на агломерационной машине.

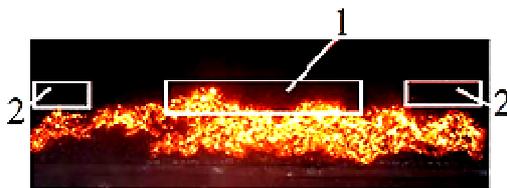
Основной недостаток применяемого на агломашине ЕМЗ бесчелнокового загрузочного устройства заключается в том, что сформированный на агломашине слой шихты неравномерно спекается по ширине паллет. Это является одной из основных причин значительного ухудшения прочности агломерата. В работах [1, 2] отмечено, что такой недостаток характерен и для современных агломашин, оборудованных челноковыми распределителями шихты.

Исследован характер формирования слоя шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине бесчелноковой загрузочной воронки и по ширине агломашины в условиях ЕМЗ. При основной установке барабана-окомкователя и загрузочной воронки, в загрузочной воронке агломашины происходит нежелательная сегрегация шихты по двум, относительно поперечной оси воронки, наклонным криволинейным поверхностям в форме выпуклой параболы, сформированным окомкованной полидисперсной шихтой при ее перегрузке из барабана-окомкователя в центр загрузочной воронки. Содержание фракций более 5 мм в шихте у боковых стенок загрузочной воронки на 55-60 % (отн.) выше, чем в центре. Соответственно в центральной части загрузочной воронки формируется слой шихты повышенного газодинамического сопротивления, в пристеночных зонах – пониженного.

В результате исследования гранулометрического состава шихт основностью 2,5 и 3,5 абс. ед. по ширине загрузочной воронки и по ширине агломашины установлено, что структура слоя, образовавшегося в загрузочной воронке, синхронно передается на агломашину. На агломашине формируется слой шихты, для которого характерно плавное увеличение крупности и газопроницаемости от центра к периферии, как минимум, на 12-15 %. Насыпная плотность шихты периферийных слоев на паллете на 5-6 % меньше, чем в центре. Кроме того, содержание углерода в шихте периферийных слоев на 0,2-0,35 % (абс.) меньше, чем в шихте центральных слоев, из-за чего в слое периферийной зоны тепла выделяется меньше, чем в слое центральной зоны.

Таким образом, загрузочная воронка является преобразователем узкого потока шихты, падающего из барабана-окомкователя, в широкий и высокий слой на агломашине. Но, одновременно в ней формируется слой с неравномерным по ширине физико-химическим составом шихты, который передается на агломашину.

Перечисленные факторы, наряду с пристеночным эффектом, являются причиной повышенной скорости спекания шихты у бортов паллеты. На фотографии, приведенной на рисунке 1, по форме свечения излома спека в хвостовой части агломашины видно, что на расстоянии примерно 250 мм от бортов паллеты формирование аглоспека завершено, в то время как в центральной зоне паллеты процесс спекания еще продолжается. Повышенная газопроницаемость периферийного спека вызывает увеличение вредных прососов воздуха в газовую сеть агломашины, замедляет спекание шихты осевой части слоя, приводит к снижению производительности агломашин.



1 – зона, в которой процесс спекания продолжается; 2 – периферийные зоны, охлаждения готового агломерата

Рисунок 1 — Фотография излома спека в хвостовой части агломашины ЕМЗ

Для обеспечения требуемых газодинамических и температурно-тепловых режимов спекания и достижения заданных показателей по объему производства и прочности агломерата слой высокоофлюсованной шихты на агломашине должен обладать следующими параметрами, обоснованными в работе [3]:

1. *Высота слоя шихты на агломашине не менее 350-380 мм.* Плавное увеличение высоты слоя от 350-380 мм в центральной зоне паллеты до 400-430 мм у ее бортов позволяет увеличить газодинамическое сопротивление прибортовой части слоя шихты. При этом вертикальная скорость спекания в прибортовой зоне агломашины уменьшается на 5-5,5 мм/мин, обеспечивая, вместе с тем, общее увеличение скорости спекания. Происходит рациональное перераспределение просасываемого воздуха по ширине спекаемого слоя шихты на агломашине.

2. *Рациональное и относительно стабильное во времени распределение гранулометрического состава шихты, твердого топлива и основности по высоте слоя.* Рациональное распределение гранулометрического состава шихты состоит в том, что крупность частиц шихты должна линейно увеличиваться от верхнего горизонта слоя к нижнему. При этом для формирования на колосниковой решетке слоя естественной постели толщиной 30-40 мм содержание фракции более 5-7 мм в шихте должно составлять 7-10 %. Рациональное распределение основности шихты и горючего углерода в составе шихты по высоте слоя должно быть близко к линейному: вверху – максимальные значения, внизу – минимальные значения.

3. *Насыпная плотность шихты в верхней части слоя, близкая по величине к плотности шихты средней части.* Экспериментально установлено, что насыпная плотность шихты основностью 3,5 абс.ед. по высоте и ширине слоя неравномерна. Рациональным является увеличение насыпной плотности верхних горизонтов слоя на  $150-160 \text{ кг/м}^3$  до уровня  $1800 \text{ кг/м}^3$ , при котором, по многим исследованиям, достигается максимум выхода годного агломерата.

Для формирования на агломашине слоя высокоофлюсованной шихты с рациональными параметрами предложена конструкция загрузочного комплекса шихты на паллеты агломера-

ционной машины (рис. 2). Фрагменты, детализирующие виды *Д*, *Е*, *Ж*, показаны на рисунках 3 и 4.

Загрузочный комплекс работает следующим образом. Направляющие сегменты 3, закрепленные на разгрузочном торце барабана-окомкователя 2, и распределитель шихты 5, установленный в загрузочной воронке 4, способствуют тому, что в загрузочной воронке поток шихты 1 при ссыпании с барабана-окомкователя формирует засыпь со сглаженной поверхностью. Выдача шихты из загрузочной воронки осуществляется барабанным питателем 6. Толщина слоя шихты регулируется шиберной заслонкой 7, установленной на разгрузочной щели воронки 4. Наличие в шиберной заслонке угловых срезов (вид *В*) обеспечивает выдачу с пристеночных участков загрузочной воронки добавочного количества шихты, направляемого на увеличение высоты слоя в прибортовой зоне паллет. Непрерывность потока шихты обеспечивается зубчатым стабилизатором 8 (вид *Г*).

Первая ступень 9 загрузочного лотка выполнена в виде наклонного отражательного листа с поверхностью, покрытой гидрофобным абразивостойким материалом. Она приподнята над слоем шихты, угол её наклона  $\beta$  составляет  $54 - 65^\circ$ , что создает условия для сегрегации частиц шихты. Вторая ступень 11 (рис. 2) состоит из двух металлических пластин 1 (рис. 3), состыкованных под углом  $140 - 150^\circ$ . Её нижняя кромка 2 имеет конфигурацию вогнутой параболы за счёт концевых регуляторов 3. Благодаря второй ступени высота слоя в периферийной зоне паллет увеличивается на 50-70 мм.

Далее по ходу движения паллеты 15 (рис. 2) слой шихты 14 поступает под секционную гладилку 13 (вид *Ж* приведен на рисунке 4). Под ней сформированная поверхность слоя шихты заглаживается и уплотняется.

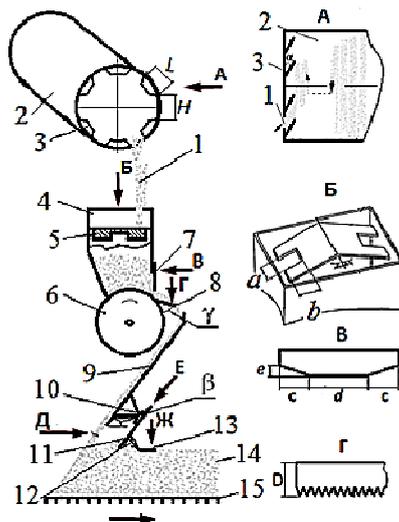


Рисунок 2 — Принципиальная схема загрузочного комплекса шихты на агломашину

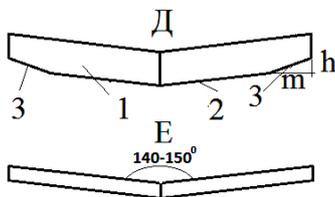


Рисунок 3 — Вторая стреловидная ступень загрузочного лотка

Предложены конструкции трёх- и пятисекционной гладилок с автономными утяжеленными секциями (рис. 4). Секции гладилки крепятся к штанге 1 с помощью цепных тяг 2. Ра-

циональный вес утяжеленных периферийных 3 и облегченных центральных 4 секций подбирается в условиях аглоцеха путём селекции нагрузки, оказываемой секциями на слой шихты.

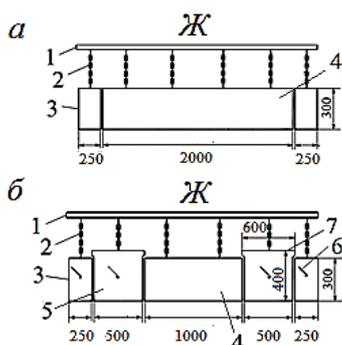


Рисунок 4 — Схема гладилок поверхности слоя аглошихты: *а* — трехсекционной; *б* — пятисекционной

Оснащение агломашин ЕМЗ загрузочным комплексом шихты предлагаемой конструкции позволит увеличить среднюю высоту спекаемого слоя на 30-50 мм, снизить содержание фракции менее 5 мм в агломерате на 1-2 % (абс.), уменьшить расход твердого топлива на процесс спекания на 3-5 кг/т агломерата, сократить выбросы вредных веществ в атмосферу на 12-15 %, возможно повышение производительности агломашин на 7-10 %.

### Библиографический список

1. Фролов, Ю. А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. — М.: Металлургиздат, 2016. — 672 с.
2. Русанов, И. Ф. Оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек конвейерных агломашин/ И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, Д. В. Лупанов// Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск: ДонГТУ, 2019. — Вып. 56. — С. 49-54.
3. Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на паллетах агломерационной машины/ И. М. Мищенко, Я. Ю. Асламова, А.В. Кузин [и др.] // Вестник ДонНТУ. — 2020. — № 1 — С. 35-44.

## ОСНОВНАЯ ЦЕННОСТЬ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

В работе проанализированы основные физико-химические свойства кремнеземсодержащих материалов и отходов черной металлургии, определена их металлургическая ценность для дугового глубинного восстановления кремния.

**Ключевые слова:** шлак, пыль, ферросплавы, кремнеземсодержащий огнеупор, горная порода, песок, гранулометрический состав, химический состав.

В настоящее время наиболее распространённые способы раскисления, легирования и рафинирования железоуглеродистых расплавов предполагают использование различных ферросплавов и лигатур, производство которых является весьма энерго- и ресурсоёмким, в частности, ферросплавные процессы требуют больших энергетических затрат на подготовку рудного сырья и подведение в реакционную зону необходимого количества тепла за счет электрической энергии.

Сотрудниками кафедры «Металлургия черных металлов» была разработана и на данном этапе совершенствуется технология внепечной обработки железоуглеродистых расплавов, которая получила название «метод дугового глубинного восстановления» (ДГВ) для насыщения железоуглеродистых расплавов полезными элементами, восстановленными из отходов и вторичных материалов непосредственно в объём жидкого металла в условиях низкотемпературной плазмы заглублённого дугового разряда.

Метод ДГВ позволяет совместить одновременно важные операции раскисление, легирование, рафинирование, нагрев и гомогенизацию, что обеспечит высокую энергетическую эффективность за счёт реализации указанных процессов в объёме металлического расплава. В предыдущих работах основной задачей ДГВ являлось извлечение марганца из шлака силикомарганца, а кремний восстанавливался попутно. Кремний является важным элементом, входящим в состав практически всех чёрных металлов, применяется, как один из основных раскислителей и легирующих элементов чугуна и стали, повышает магнитопроницаемость металла, сопротивление его коррозии и стойкость к окислению. Кремний повышает способность сталей к термическому упрочнению и их износостойкость, увеличивает пределы текучести и упругости, а также является особенно важным компонентом при литье деталей из чугуна. Поэтому актуальным вопросом является поиск наиболее доступных кремнийсодержащих материалов и определение их металлургической ценности для разрабатываемой технологии [1].

Для черной металлургии характерно образование огромных шлаковых отвалов, шламов, отходов производства и боя огнеупора, занимающих большие площади и оказывающих негативное влияние на экологическую обстановку.

К наиболее распространённым и доступным кремнийсодержащим материалам и отходам можно отнести: кварцит, пыль (шлам) и шлак ферросплавного производства, бой динасовых огнеупоров, кремнеземсодержащие породы и пески.

При производстве кремнистых ферросплавов используют дорогостоящий кварцит, его подвергают измельчению до фракции 20–80 мм. При доведении кварцита до данных фракций доля мелкодисперсных отсевов кварцита составляет 18–25 % и применяется в авто- и железнодорожном строительстве [2]. Также при производстве ферросилиция (ФС) на 1 т выплавляемого кремния образуется от 300 до 900 кг пыли и до 70 кг шлака, а при производстве ферросиликомарганца (МнС) образуется от 200 до 600 кг пыли на 1 т полученного сплава и до 1200 кг шлака [3–6].

На свалках промышленных отходов складывается бой динасовых огнеупоров, в основу которых входит кремнезем, однако такие отходы характерны большими размерами и высокой прочностью, что затрудняет их измельчение для дальнейшей переработки.

При добыче ценных минералов в отвалах скапливаются кремнеземсодержащие породы. Такие отвалы богаты природным минералом порцеланитом, залегающим совместно с фторапатитом и после добычи последнего он остается в пустой породе. Порцеланит относится к группе осадочных и вулканогенно-осадочных пород, состоящих более чем на 50 % из обводненного или свободного кремнезема различной степени закристаллизованности. По минералогическому составу порцеланит существенно отличается от традиционного кремнеземсодержащего сырья в металлургической промышленности. Если в песках оксид кремния представлен кристаллическим кварцем, то кремнеземсодержащими фазами порцеланита являются кварц и тридимит, а также присутствуют примеси фторапатита и гипса.

Пески и песчанки наряду с глинами являются одними из наиболее распространенных типов осадочных пород оболочки планеты. Они занимают обширную часть поверхности Земли, встречаются повсеместно, используются человеком с древних времен, однако их использование в традиционных металлургических технологиях ограничено. Песок – обломки различных минералов и горных пород размером от 0,1 до 2 мм. По преобладающему размеру зерен подразделяется на мелкозернистый (от 0,1–0,25 мм), среднезернистый (0,25–0,5 мм), крупнозернистый (>0,5 мм); по минералогическому составу – на моно- и полиминеральный. Искусственный песок получают путем дробления природных и синтезированных минералов.

Наиболее распространенным является кварцевый, глауконито-кварцевый, полевошпатово-кварцевый и слюдястый песок. Минералогический состав песков определяется составом исходных горных пород, условиями их разрушения, переноса и переотложения продуктов разрушения. В большинстве пески состоят из кристаллов кварца, а к их примесям можно отнести: альбит ( $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), анортоклаз ( $(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ), диксит ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), индиалит ( $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ), антофиллит ( $(\text{Mg},\text{Fe})_7(\text{OH})_2 \cdot [\text{Si}_8\text{O}_{22}]$ ) и др. [7].

Песок представляет собой непрерывно воспроизводимое минеральное сырье. Количество песка на планете постепенно увеличивается по причине дезинтеграции горных пород, эти естественные процессы постоянны и необратимы.

В таблице представлены литературные и опытные данные химического состава кремнеземсодержащих материалов. Химический состав пробы карьерного песка, пыли и шлака МнС и ФС филиала №13 «Стахановский завод ферросплавов» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» определен с помощью сканирующего рентген-флуоресцентного спектрометра Simultix 12.

Для условий ДГВ кремния очень важно, чтобы рудное сырье отвечало следующим параметрам: максимальное содержание кремнезема в виде свободного оксида; фракция около 0,5–1,0 мм; доступность и дешевизна материала.

Данные таблицы свидетельствуют, что максимальное количество кремнезема содержится в кварците (98–99,4%) и незначительная доля примесей, однако данный материал дорогостоящий и требует больших затрат на логистику и дробление для применения его в качестве основного рудного сырья в технологии ДГВ кремния.

Пыль газоочисток от производства кремнийсодержащих ферросплавов содержит до 91 % кремнезема, а ее фракционный состав не требует дополнительной подготовки, но данный вид отходов реализуется ферросплавными предприятиями в качестве сырья. Шлаки от производства кремнийсодержащих ферросплавов могут содержать до 50 % кремнезема, однако данные отходы дефицитны т. к. могут содержать до 60 % корольков ФС. В динасовом огнеупорном бое высокое содержание кремнезема до 94 %, но, учитывая высокую прочность их подготовка для рудного сырья ДГВ кремния требует дополнительных затрат. Отвалы кремнеземсодержащих пород из порцеланита содержат до 80% кремнезема, а их фракционный состав не стабилен и в большинстве случаев требует дополнительного измельчения. Также как в пыли и шлаках необходимо отметить содержание оксида кальция (5–16 %), наличие которого будет негативно влиять на процесс восстановления кремния методом ДГВ из

данных материалов снизит технико-экономические показатели процесса ДГВ кремния. Песок наиболее доступный материал с малым содержанием примесей и богат кремнеземом (80–97 %), а его фракционный состав не требует дополнительного измельчения.

Таблица – Химический состав кремнеземсодержащих материалов, %

Материал	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	S	SiC	Прочие	
Кварцит [8]	98-99,4	–	0,2-0,9	–	0,1-0,5	–	–	–	–	–	–	–	
Пыль	ФС [1]	91	–	0,7	0,7	0,85	1,01	0,61	1,2	0,9	0,26	–	2,7
	МнС [1]	30-50	10-25	2,3-3,5	–	3,75	1,2-3,0	–	–	–	–	–	48,2
	МнС <sup>1</sup>	29,2	46	1,5	–	2,13	–	–	–	–	–	–	21,2
	Доменного ФМн [1]	15,1	20,8	5,4	–	15,6	–	–	–	–	–	–	43,1
Шлак	ФС [6]	30-50	–	10-30	–	8-15	2-5	–	–	–	–	10-20	10-40
	ФС <sup>1</sup>	63,6	–	12,7	7,24	12,9	1,23	–	–	–	–	–	2,33
	МнС [5]	40-47	13-15	5-7	–	12-13	2,9-3,1	–	–	–	–	–	–
	МнС <sup>1</sup>	41,5	12,5	8,7	–	14,9	4,74	–	–	–	–	–	–
Бой динаса [9]	80-94	–	–	1-3	0,2-2,8	–	–	–	–	–	–	–	
Порцеламит [8]	79,7	0,01	1,03	0,51	8,15	0,8	0,8	0,1	–	–	–	8,9	
Пески всех видов [7]	80-97,3	–	0,1-4,4	0,6-1,8	0,4-4	0,4-2,7	–	–	–	–	–	–	
Карьерный песок <sup>2</sup>	95,9	–	0,87	1,34	0,95	0,29	–	–	–	–	–	–	

<sup>1</sup> – филиал №13 «Стахановский завод ферросплавов» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»;

<sup>2</sup> – проба карьерного песка, отобранного на территории Луганской Народной Республики

На основании проведенного анализа кремнеземсодержащих материалов для ДГВ кремния в качестве рудного сырья был выбран карьерный песок, как наиболее удовлетворяющий требованиям к рудному сырью. При проведении в лабораторных условиях опытных плавок по внепечной обработке чугуна методом ДГВ кремния из песка использовали различные связующие добавки (цемент, каменноугольный пек, жидкое стекло). По результатам проведенных опытных плавок степень восстановления кремния из песка составила 22–79 %, что подтверждает использование песка как основного рудного сырья для ДГВ кремния, однако необходимо провести дополнительные исследования для достижения стабильных степеней восстановления кремния.

В дальнейших направлениях для усовершенствования метода ДГВ кремния необходимо произвести подбор количества связующего материала и провести анализ минералогического состава песка, т. к. в песке помимо кварца, могут содержаться различные горные породы, которые необходимо будет учитывать при термодинамических расчетах процесса восстановления кремния.

### Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов [и др.] – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 320 с.
2. Павлов, С. Ф. Отходы и выбросы при производстве ферросилиция [Текст] / С. Ф. Павлов, Ю. П. Снитко, С. Б. Плюхин. – Электрометаллургия. – 2001. – №4. – С.22 – 28.
3. Розенберг, В. Л. Рудовосстановительные электропечи. Энергетические показатели и очистка газов [Текст] / В. Л. Розенберг, А. Ю. Вальдберг. – М.: «Энергия», 1974. – 130 с.
4. Толстогузов, Н. В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов [Текст] / Н. В. Толстогузов. – М.: Metallurgia, 1992. – 239 с.
5. Гасик, М. И. Теория и технология производства ферросплавов: учеб. для вузов [Текст] / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев, Б. И. Емлин. – М.: Metallurgia, 1988. – 784 с.
6. Зубов, В. Л. Электрометаллургия ферросилиция [Текст] / В. Л. Зубов М. И. Гасик. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 704 с.

7. Почвоведение : учеб. для вузов. [Текст] / И. С. Кауричев [и др.]. М.: Агропромиздат, 1989. – 722 с.
8. Гербер, Д. В. Экологические аспекты использования кремнезем содержащих горных пород в стекольной промышленности [Текст] / Д. В. Гербер, Н. Ю. Михайленко // Горные науки и технологии – М.: НИТУ «МИСиС», 2013. – № 13. – С. 22–25.
9. Гусев, К. П. Определение физико-механических характеристик огнеупорных строительных изделий на основе силикатного вяжущего материала и отходов керамики металлургического производства [Текст] / К. П. Гусев, З. А. Коротаяева, В. А. Полубояров // Известия высших учебных заведений. Строительство – Новосибирск: НГАСУ, 2017. – № 1 (697). – С. 45–54.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОТРАБОТАННОГО ШЛАКА ПОСЛЕ  
ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Черная металлургия – один из основных загрязнителей окружающей среды. Выбросы вредных веществ на предприятии зависят от многих факторов, основные из них: объем производства, структура его, оснащенность газоочистным оборудованием, технологические особенности и др.

Технологический прогресс в черной металлургии немислим без решения защиты окружающей среды от загрязнений. Новые технологические процессы производства металла, агрегаты, оборудование могут считаться прогрессивными, эффективными только в том случае, если наряду с увеличением выпуска продукции, повышением его качества и других технико-экономических показателей достигается уменьшение вредных выбросов в окружающую среду.

Одним из путей снижения материалоемкости производства продукции, увеличения его экологичности является повышение использования вторичных материальных и энергетических ресурсов, которые неизбежно образуются в сфере материального производства [2]. Опыт показывает, что использование многих видов отходов производства экономически выгодно и технически осуществимо. Одной из причин неудовлетворительного использования вторичных ресурсов производства является отсутствие соответствующих разработок и объектов по утилизации этих отходов.

В настоящее время существуют технологии по использованию тепла полученного шлака после доменной плавки.

Один из вариантов – это способ, в котором высокотемпературный жидкий шлак подвергают мокрой грануляции. При такой технологии: потребляется большее количество воды; происходит загрязнение воды щелочными компонентами шлака; требуется операция сушки; имеет место выброс в атмосферу серосодержащих веществ [1].

Возможная схема использования тепла шлака при водяной грануляции приведена на рисунке 1. Грануляция шлака, стекающего из шлакоприемника 1, осуществляется не только при погружении струи шлака в бассейн 2, но и при механическом и термическом воздействии на нее «отработанной» воды из «грязного» контура. Гранулированный шлак непрерывно удаляется из бассейна наклонным ленточным скребковым транспортером 3. Вода в контуре теплового потребителя 5 подогревается «грязной» водой первого контура в водоводяном бойлере 4.

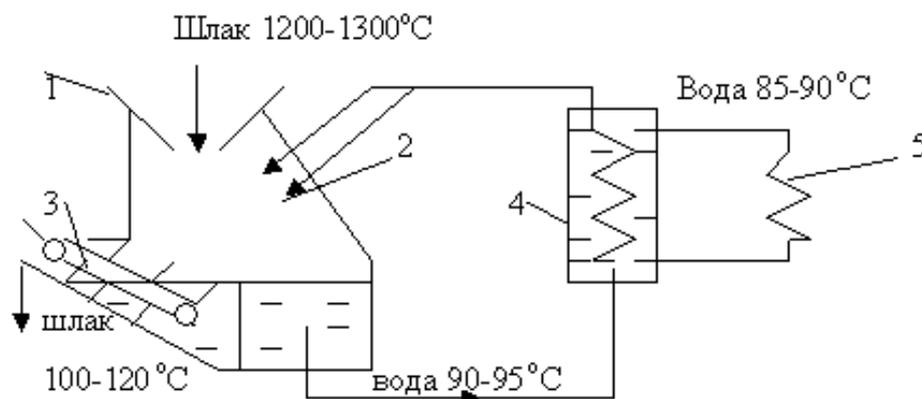


Рисунок 1 — Схема энерготехнологического использования доменного шлака

Недостатком этой схемы является невысокая эффективность водоводяного бойлера из-за сравнительно низкой температуры «грязной» воды (менее  $100^{\circ}\text{C}$ , так как бассейн сообщается с атмосферой и поэтому нагрев воды ограничен температурой кипения воды  $100^{\circ}\text{C}$ ). Другим недостатком является то, что вода первичного контура загрязняется не только механически (взвесями), но и химически, поэтому первый контур труб и циркуляционный насос работает в тяжелых условиях из-за абразивного износа и сернокислотной коррозии.

Грануляцию шлака пытались осуществить и контактным способом (без смешивания шлака и воды) [2]. Такой способ показан на рисунке 2. В этом случае расплавленный шлак из шлакоприемника 1 по летке 2 перетекает в шлаковую ванну 3. В ней вращается барабан 4, наружная поверхность которого образована навитой в виде змеевика трубой 5 с входом и выходом в нее воды по оси барабана. Змеевиковая труба снаружи залита чугуном, на гладкую поверхность которого налипают расплавленный шлак, образуя корку застывшего шлака толщиной от 2 до 15 мм (в зависимости от скорости вращения барабана). Поскольку барабан погружен на треть диаметра в расплавленный и подогреваемый за счет электроэнергии б шлак, вода, подаваемая циркуляционным насосом, в змеевиковой трубе нагревается и превращается в пар. Шлаковая корка на поверхности барабана охлаждается на пути от расплава шлака в ванне шлакоснимателя 7 и гранулированный шлак сбрасывается в бункер готовой продукции. Меняя скорость вращения барабана, можно изменять толщину шлаковой корки, а следовательно, и производительность установки как по грануляционному шлаку, так и получаемому пару.

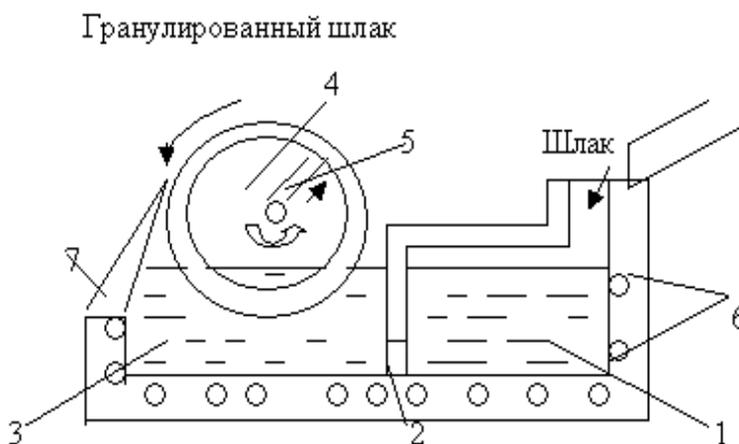


Рисунок 2 — Установка для грануляции шлака контактным способом

Воздушная грануляция шлака по схеме, предложенной Н. А. Семенко (рис. 3) происходит внутри большого бункера во встречном потоке вдуваемого снизу холодного воздуха. Гранулированный шлак выдается из нижней части камеры-бункера. При начальной температуре шлака  $1200-1300^{\circ}\text{C}$  холодный воздух в процессе движения вверх нагревается до  $800-900^{\circ}\text{C}$ , а затем используется в котле-утилизаторе змеевикового типа с принудительной циркуляцией пароводяной смеси. Влажный пар из барабана-сепаратора, пройдя через пароперегреватель, перегревается до  $450^{\circ}\text{C}$  и при давлении до 4 МПа отправляется потребителю.

Расчеты показывают, что при воздушной грануляции 100 т/ч шлака можно получить до 50 т/ч пара энергетических параметров при условии его охлаждения от  $1300^{\circ}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . Этого достаточно для обеспечения работы турбогенератора мощностью 10 МВт.

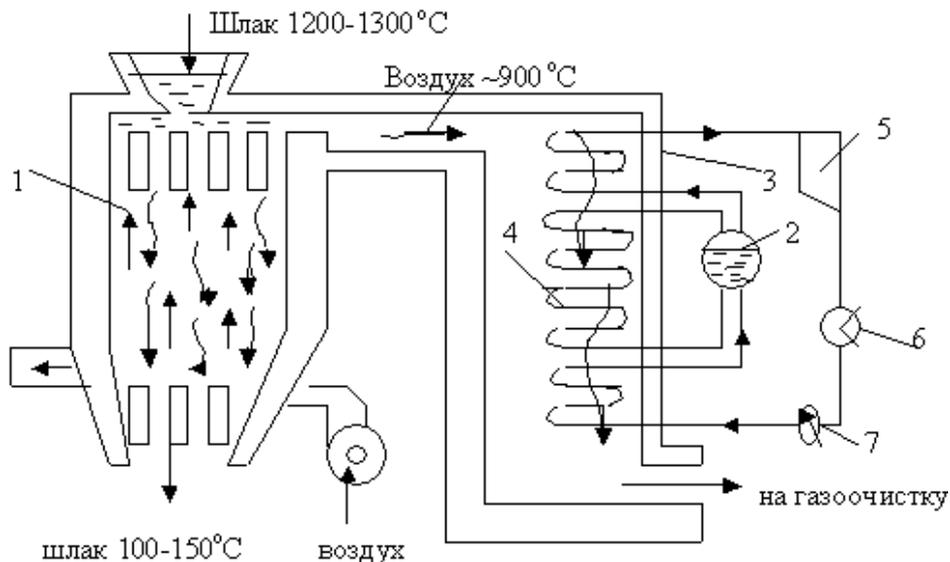
Можно рассчитать какой объем воздуха необходим для осуществления данного технологического процесса.

Для расчета используем уравнение теплового баланса

$$t_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot G_{\text{ш}} = t_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}}, \text{ или } t_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot \frac{G_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ш}}} = t_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}},$$

где  $t_{\text{ш}}$  – температура шлака,  $t_{\text{ш}} = 1300^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{ш}}$  – теплоемкость шлака,  $C_{\text{ш}} = 0,750 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{K})}$ ;

$G_{\text{ш}}$  – расход шлака,  $G_{\text{ш}} = 100 \text{ т/ч}$ ;  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность шлака,  $\rho_{\text{ш}} = 1600 \text{ кг/м}^3$ ;  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха,  $t_{\text{в}} = 25^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха,  $C_{\text{в}} = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .



1 – камера шлакогранулятора; 2 – барабан-сепаратор котла-утилизатора; 3 – пароперегреватель; 4 – водяной экономайзер; 5 – теплосиловая установка; 6 – конденсатор; 7 – насос

Рисунок 3 — Схема использования тепла шлака при воздушной грануляции

Тогда расход воздуха, необходимый для воздушной грануляции, составит:

$$V_{\text{в}} = \frac{t_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot G_{\text{ш}}}{t_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{ш}}} = \frac{1300 \cdot 0,750 \cdot 100000}{25 \cdot 1,005 \cdot 1600} = 2425,37 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Тогда в пересчете на извлекаемую тепловую энергию

$$Q = V_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 2425,37 \cdot 1,005 \cdot (800 - 25) \approx 2,6 \text{ МДж/ч},$$

или в пересчете на условное топливо

$$B_{\text{у.т.}} = 4,19 \cdot 0,29 \cdot 2,6 = 2,5 \text{ т/ч}.$$

Таким образом, несмотря на наличие разнообразных способов утилизации, тепло доменных шлаков на металлургических заводах практически не используется, и несмотря на то, что теплосодержание жидкого шлака на 1 тонну, эквивалентно 60 т условного топлива в сутки или почти 20 тыс. т у. т. в год.

### Библиографический список

1. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов, Я. Ш. Школьник, Н. В. Орининский, В. А. Коломиец и др. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.
2. Черепанов К. А., Черныш Г. И., Динельт В. М., Сухарев Ю. И. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии. – М.: Металлургия, 1994. – 224 с.
3. Розентгарт Ю. И. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – К.: Вища шк., 1988. – 154 с.
4. Брызгунов К. А., Гаврилова О. Н. Металлургические шлаки Донбасса. – Донецк: Донбасс, 1989.

*к.т.н., проф. Куберский С. В.,  
к.т.н., доц. Романчук А. Н.,  
ассистент Романчук Я. А.,  
ассистент Стоцкая О. В.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПОДАЧЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА В ЖИДКИЙ РАСПЛАВ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

В работе приведены результаты физического моделирования процесса перемешивания металла на агрегате ковш-печь в ходе пульсирующей продувки аргоном через два донных продувочных устройства.

**Ключевые слова:** агрегат ковш-печь, сталь, шлак, физическая модель, инертный газ, пульсирующая продувка.

Современный сталеплавильный комплекс, как правило, включает четыре функциональных блока: подготовки чугуна к сталеплавильному переделу, выплавки полупродукта, доводки металла в агрегате ковш-печь (АКП) и разливки стали на МНЛЗ.

Одним из основных блоков АКП является система непрерывного перемешивания жидкой стали инертным газом через продувочные элементы, установленные в днище ковша.

При доводке металла в сталеразливочных ковшах большой емкости стационарная продувка инертным газом ведется через одну или несколько продувочных пробок. При этом продувочный газ приводит в движение слои жидкого металла, создавая благоприятные условия для перемешивания металла и шлака, расплавления присаживаемых материалов, усреднения металла по температуре и химическому составу [1].

Основной задачей исследования на физической модели являлось установление оптимальных режимов пульсирующей продувки инертным газом, обеспечивающих эффективное перемешивание металла при его обработке на АКП. Физическое моделирование процесса пульсирующей продувки металла инертным газом проводилось на прозрачной (из органического стекла) модели сталеразливочного ковша. В качестве жидкости, моделирующей расплав, использовалась вода при температуре 18–25°C, в качестве продувочного аргона – воздух. С целью индикации степени перемешивания расплава в воду вводили жидкий электролит в виде насыщенного раствора поваренной соли. Для подачи сжатого воздуха через продувочные пробки использовался компрессор с ресивером объемом 25 дм<sup>3</sup>. Конструкция компрессора позволяет с большой точностью подводить необходимый объем продувочного газа и обеспечивать непрерывную его подачу. Контроль расхода сжатого воздуха производился поверенным газовым счётчиком [2]. Пульсирующая подача продувочного газа осуществлялась через продувочные пробки, установленные в днище модели ковша.

Для проведения опытов в рабочем пространстве модели расположено 8 датчиков, как показано на рисунке 1. Считывающие датчики подключаются через блок согласования каналов к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП) Е-154. АЦП подключается к компьютеру, где установлено специализированное программное обеспечение «LGraph2» для сбора данных. Во время проведения опыта в рабочем окне программы «LGraph2» отображается напряжение на каждом из датчиков, как показано на рисунке 2.

При достижении электролитом датчиков, расположенных по объему физической модели на экране монитора наблюдается рост напряжения на конкретном датчике. Показания напряжения на датчиках постепенно меняют свои значения. По истечении определенного времени напряжение на всех датчиках выравнивается, т. к. изменяется электропроводность. Датчики показывают стабильное изменение показаний в диапазоне 0,1–0,2 В. Это позволяет зафиксировать и описать механизм процесса перемешивания во временном интервале, а также определить момент завершения процесса массообмена.

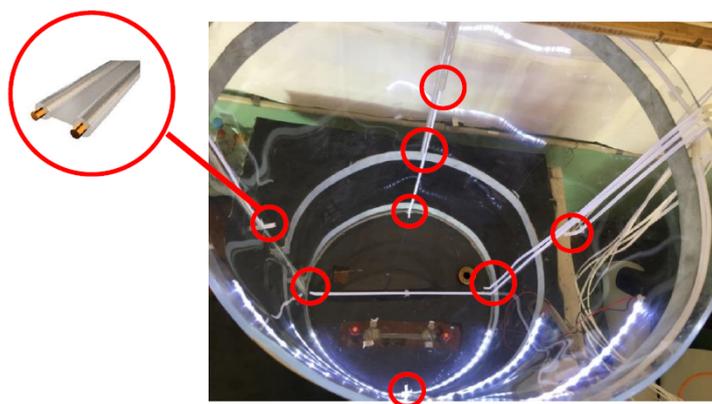


Рисунок 1 — Расположение датчиков в рабочем пространстве модели сталеразливочного ковша

В ходе проведения исследований применена методика планированного эксперимента с двумя звездными точками, основной задачей которой является разработка оптимальной схемы исследования, обеспечивающей получение необходимой информации при минимальных временных и материальных затратах. Для проведения исследований с пульсирующей подачей модельного газа (воздуха) использовалась матрица планированного эксперимента. Первым фактором являлся расход воздуха на холодной физической модели, вторым частота срабатывания электромагнитного клапана [3].

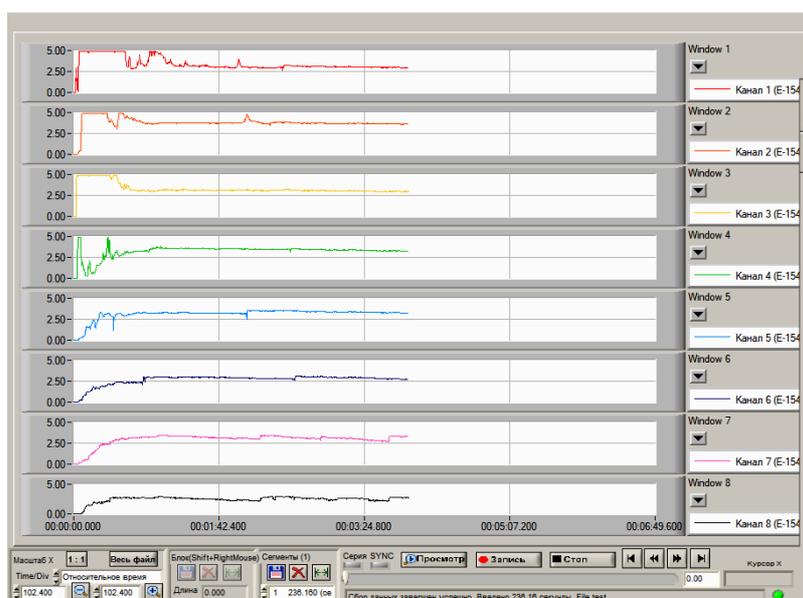


Рисунок 2 — Рабочее окно программы во время проведения опыта

Система пульсирующей подачи воздуха в модели может обеспечить максимальную частоту подачи воздуха до 60 Гц, а минимальную 0,016 Гц. При использовании матрицы планирования эксперимента расчёт показал, что максимальные и минимальные значения частоты пульсации в итоге составляют 0,36 и 5,8 Гц, соответственно. Расчётный расход продувочного газа может варьироваться от 2 до 28  $\text{дм}^3/\text{мин}$  на модели, что соответствует расходу аргона в пределах от 100 до 1400  $\text{дм}^3/\text{мин}$  на объекте моделирования. Таким же образом расчёт с помощью матрицы показал, что максимальное значение расхода воздуха для пульсирующей продувки составляет 27,73  $\text{дм}^3/\text{мин}$ , а минимальное 2,27  $\text{дм}^3/\text{мин}$ .

Режимы пульсирующей продувки воздухом на модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы пульсирующей продувки воздухом на модели

№ опыта	Расход воздуха, $\text{дм}^3 / \text{мин}$	Частота пульсаций, Гц
1	6,00	1,17
2	6,00	5,00
3	24,00	1,17
4	24,00	5,00
5	2,27	3,08
6	27,73	3,08
7	15,00	0,40
8	15,00	5,80
9	15,00	3,08

В результате исследований установлено, что наиболее эффективными режимами пульсирующей продувки, обеспечивающими качественное перемешивание расплава в ковше являются: расходы воздуха на модели от 15 – 24  $\text{дм}^3 / \text{мин}$  и частота подачи воздуха от 1,16 – 3,08 Гц. Кроме того, при полученных выше параметрах пульсирующей продувки на модели уменьшается воздействие газожидкостной струи на нарушение шлакового покрова, оголение зеркала металла и его контакт с атмосферой.

Исследование пульсирующей продувки расплава на модели позволили выявить положительное влияние на эффективность (качество) и скорость усреднения жидкой стали в ковше. Найдены режимы, позволяющие улучшить существующие способы стационарной продувки стали через донные пробки. Установлено, что при пульсирующей продувке расплава через две продувочные пробки одновременно, изменяется механизм перемешивания жидкости с образованием дополнительных вихревых потоков вверх, вдоль дна и боковых стен, что способствует повышению степени массообмена. Перемешивание расплава в процессе его обработки на агрегате ковш-печь с использованием пульсирующей продувки позволяет ускорить этот процесс в застойных зонах объема жидкого металла, ускорить перемешивание и усреднение металла по химическому составу и температуре, снизить расход аргона.

Перемешивание расплава в процессе обработки его на АКП при пульсирующей продувке позволяет решать следующие проблемы:

- предотвращение возникновения застойных зон в ванне жидкого металла в ковше;
- достижение качественного перемешивания металла в ковше, что способствует лучшему усреднению металла по химическому составу и температуре;
- достижение экономии аргона в процессе продувки металла в ковше.

При пульсирующей продувке расплава через две продувочные пробки наблюдается интенсивное перемешивание с распространением потоков вверх, на дно и по бокам модели, что способствует лучшему тепло-массообмену.

Из проведенных исследований получено, что пульсирующая продувка стали аргоном является более эффективной и улучшает показатели процесса обработки металла на АКП.

### Библиографический список

1. Смирнов А. Н. Внепечное рафинирование чугуна и стали: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Смирнов, А. М. Зборщик. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 186 с.
2. Куберский С. В. Усовершенствование методики моделирования продувки металла инертными газами в агрегате ковш-печь [Текст] / С. В. Куберский, А. Н. Романчук, Я. А. Романчук // IV Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» Сб. тез. конф. 2019. – С. 127–130.
3. Романчук Я. А. Физическое моделирование процесса перемешивания металла со шлаком [Текст] / Я. А. Романчук // Международный форум-конкурс молодых учёных. Сб. тез. докл. 2017. – С. 199–201.

## СЕКЦИЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.27

*д.т.н., проф. Яковченко А. В.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

*д.т.н., проф. Снитко С. А.,*

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР*

*ассистент Денищенко Н. П.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР)*

### САМОЦЕНТРОВКА ОВАЛЬНОГО РАСКАТА В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

Основные недостатки калибровок валков крупносортовых станов для проката круглого сечения связаны с плохой устойчивостью подката (устойчивость обеспечивается только вводной арматурой) и возможностью появления поверхностных дефектов на готовой продукции, обусловленных неравномерной деформацией металла в чистовом круглом калибре. Поставлена задача обеспечить самоцентрировку овального раската при прокатке круга диаметром 120 мм на стане 600 на базе технического решения [1]. На рисунке 1 показан механизм самоцентрировки овала при задаче его в круглый калибр с наклоном.

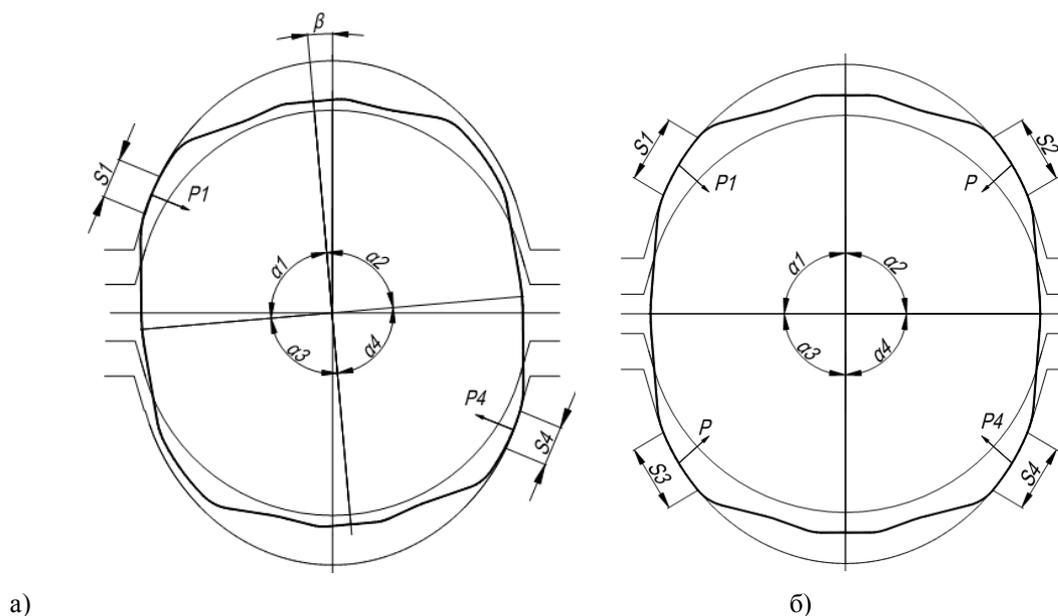


Рисунок 1 — Механизм самоцентрировки овала при задаче его в круглый калибр:

а) – наклон овала на угол  $\beta$  в первый момент контакта;

б) – устойчивое положение овала после его самоцентрировки [1]

На рисунке 1, б показано, что боковые участки овала расположены симметрично относительно главных осей чистового калибра. Обжатие металла по боковым участкам выполняется переменным по их ширине. За счет этого в момент захвата имеет место одновременный по их ширине контакт металла с круглым калибром, что существенно повышает устойчивость раската, а при наклоне овала (рис. 1, а) обеспечивает его самоцентрировку (рис. 1, б).

Расчет параметров предчистового овала, которые обеспечивают указанное выше переменное обжатие по ширине его боковых участков, выполнено на базе метода [1] с использованием специализированной компьютерной программы, окно которой показано на рисунках 2 и 3. Чертеж предчистового овала, совмещенного с калибром для прокатки круга диаметром 120 мм, представлен на рисунке 4.

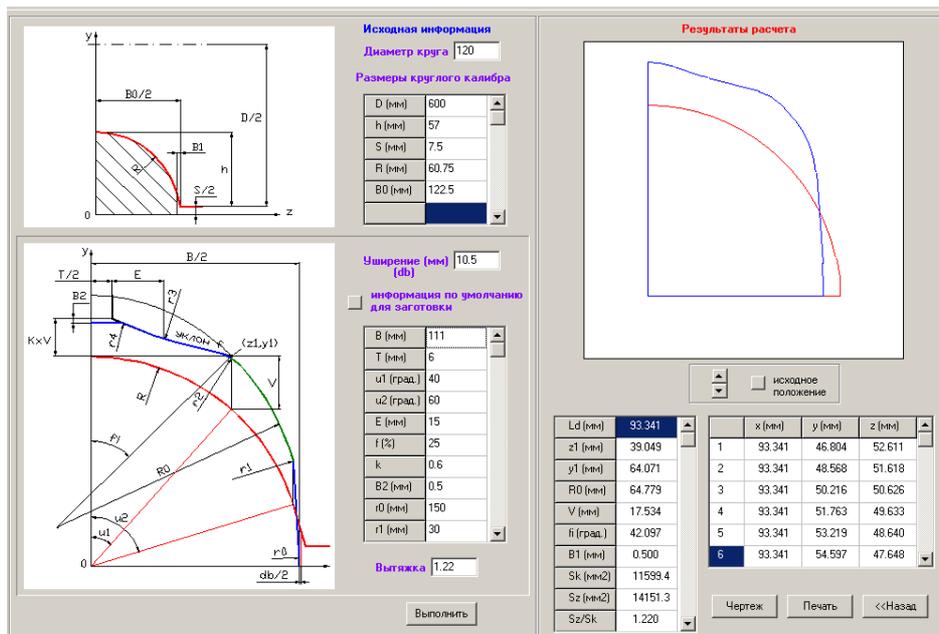


Рисунок 2 — Расчет параметров предчистового овального раската

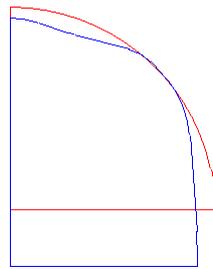


Рисунок 3 — Контрольное построение контуров овала и круглого калибра в момент захвата

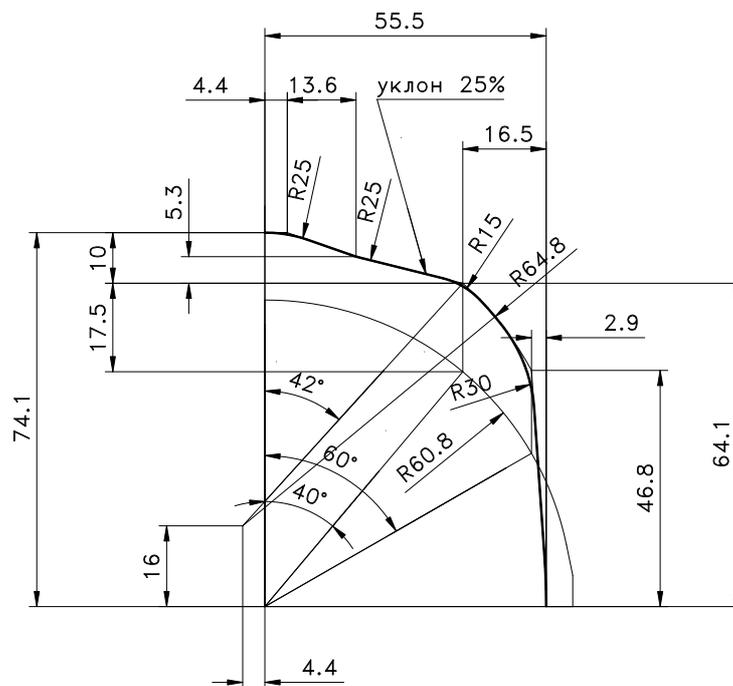


Рисунок 4 — Чертеж предчистового овала, совмещенного с калибром для прокатки круга  $\varnothing 120$  мм

### **Вывод**

Усовершенствована калибровка предчистового овала для прокатки круга диаметром 120 мм на стане 600. Показано, что в момент захвата длина очага деформации по боковым участкам овала равна const (91,3 мм), что повышает устойчивость раската, а при наклоне овала обеспечивает его самоцентрировку.

### **Библиографический список**

1. Шум В. Б., Яковченко А. В., Никишин В. М., Курилов А. В., Гайдук Р. Е., Борискин В. В. Способ прокатки круглых профилей. Пат. 102915 Украина, МПК (2012) В21В 1/02.– № а201200925; Заявл. 30.01.2012; Оpubл. 27.08.2013; Бюл. №16.

*к.т.н., доц. Чичкан А. А.*  
 ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР  
*к.т.н. Луцкий М. Б.*  
 г. Тель-Авив, Израиль

### РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ, УНИФИЦИРОВАННЫХ КАЛИБРОВОК ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ НА СТАНЕ 600 «ВТС» ФИЛИАЛ №12

В последние годы в филиале №12 «ВТС» проводится работа по совершенствованию и расширению сортамента крупносортового стана 600 путем освоения производства высокотехнологичной продукции с высокой добавленной стоимостью, в частности швеллеров с параллельными гранями полок №22П и №24П по ГОСТ 8240, которые значительно превышают по габаритам профили проектного сортамента ( $\text{№№}12 \div 20$ ). Проведенные предварительные расчеты показали, что применение известных действующих способов калибровки при прокатке этих швеллеров может привести к значительному увеличению энергосиловых параметров.

Стан 600 – полунепрерывного типа, состоит из 15 рабочих двухвалковых клетей [1]. Прокатка осуществляется по принципу: клеть – проход. Такая компоновка приводит к большому парку рабочих валков и, при освоении новых профилей, значительно его увеличивает с большими материальными затратами.

С целью уменьшения затрат на освоение новой продукции, подготовка производства ведется с максимальным использованием энерго- и ресурсосберегающих технологий. Одним из таких направлений является создание технологии производства с максимальной унификацией калибров. Внедрение таких калибровок позволяет уменьшить расход валков, сократить простой стана при смене калибров, перевалках и настройке. Применение валков с однотипными калибрами создает условия для более полного и равномерного их износа, так как значительно уменьшается количество переточек валков с не полностью выработанными калибрами. Кроме того, применение унифицированных калибровок позволяет повысить точность профилей, сократить выход продукции второго сорта и брак по «недокатам» при настройке стана на профиль.

Такая технология успешно применяется на стане 600 для прокатки некоторых фасонных профилей. Для освоения двутавровых балок №16 и №18 по ГОСТ 8239 была разработана универсальная калибровка валков с единым для обоих профилей открытым разрезным калибром, расположенным в клетях 4Г (рис. 1).

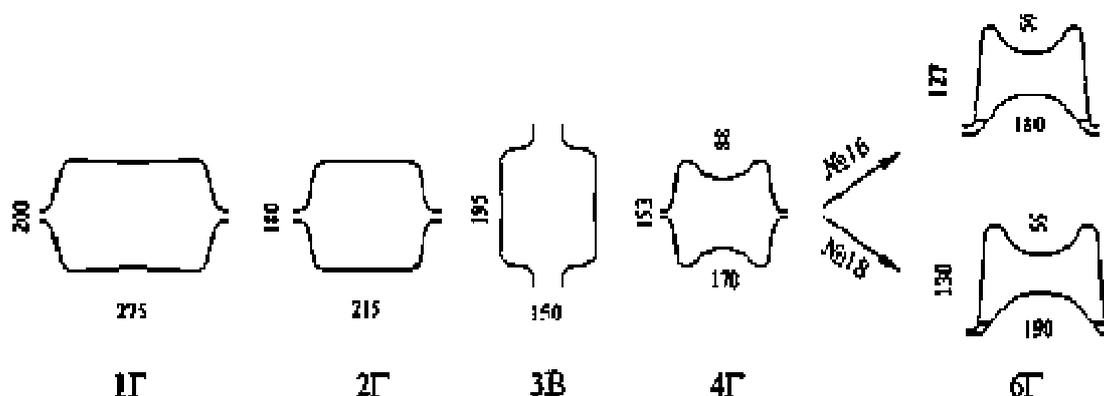


Рисунок 1 — Схема прокатки и калибровки двутавров №16 и №18 в клетях 1Г – 6Г

Возможность формирования из одного общего открытого разрезного калибра в клетях 4Г двух разных по ширине стенки и высоте полок двутавров достигнута за счет изменения соотношений деформации металла по отдельным элементам профиля, в частности различной

степени ограничения уширения стенки в закрытых разрезных калибрах клетки 6Г, величины бокового обжатия фланцев в черновых закрытых балочных калибрах клеток 7Г и 9Г, а также высотного обжатия полоч в контрольных полузакрытых калибрах клеток 10Г [2].

Для профилей СВП22, СВП27 и СВП33 применяются одинаковые калибры в проходах 1...9. В этих клетях различны лишь режимы обжатий. Фасонные калибры расположены начиная с 6-го прохода (рис. 2).

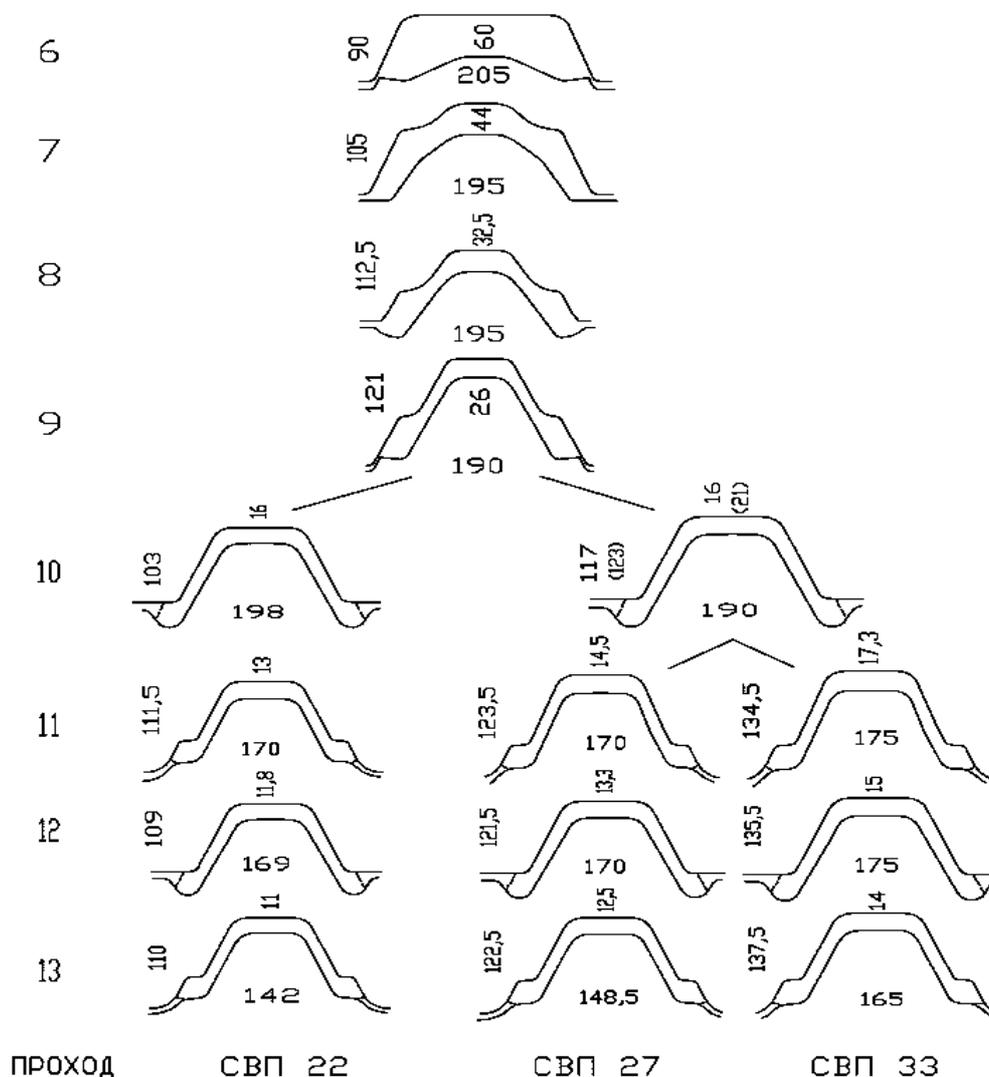


Рисунок 2 — Схема прокатки профилей СВП22, СВП27 и СВП33

При освоении швеллеров №22П и №24П также была поставлена задача по унификации калибровок. Предварительные расчеты показали возможность применения одинаковых фасонных калибров в клетях №№ 4Г, 6Г и 7Г. Кроме того разрезной калибр клетки №4Г может применяться при прокатке швеллера №20П. Данное предложение стало возможным благодаря разработанной специальной калибровке черновых клеток с подгибкой фланцев и увеличенным изгибом стенки (рис. 3), что позволяет значительно уменьшить ширину этих калибров и снизить нагрузки по клетям №№7Г...12Г.

Подготовка к изгибу фланцев и стенки производится в клетях 7Г. В первоначальном варианте разгибание элементов раската проводилось в предчистовой клетке 16Г, однако опытная прокатка показала, что при этом происходят большие колебания по ширине фланцев с выходом размеров за пределы допусков. После корректировки калибровки разгибание производится в клетях 12Г для швеллера №22П и в клетях 13Г для швеллера №24П [3]. Схема унифицированных калибровок швеллеров №20П, №22П и №24П приведена на рисунке 4.

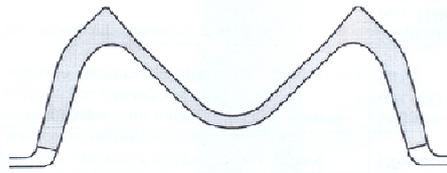


Рисунок 3 — Калибр с подгибкой фланцев и увеличенным изгибом стенки

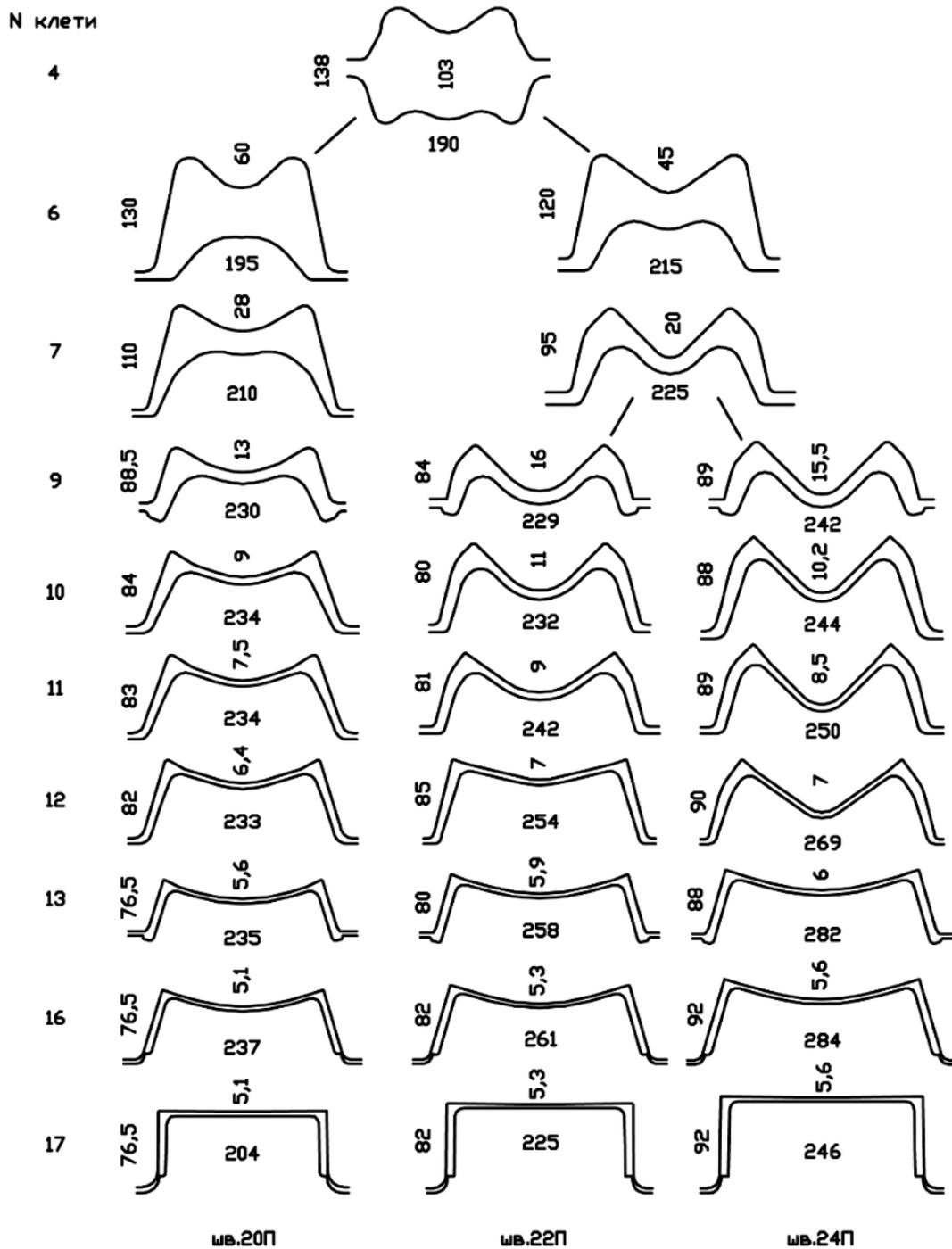


Рисунок 4 — Схема прокатки швеллеров №20П, №22П и №24П

Таким образом, на стане 600 была внедрена унифицированная схема прокатки швеллеров №20П, №22П и №24П с применением в черновых клетях калибров с подгибкой фланцев

и увеличенным изгибом стенки, что позволяет снизить энергосиловые параметры прокатки, уменьшить расход валков, сократить простой стана при смене калибров, при перевалках и настройке клетей.

### **Библиографический список**

1. Производство сортовых и фасонных профилей проката на крупносортном стане 600. Технологическая инструкция. ТИ 229-ПС-036-64-2015. Алчевск: –2015. –166с.

2. Универсальная калибровка валков для прокатки двутавров смежных размеров. Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность», №4, 2016, с. 49–54. А. А. Чичкан, Э. Н. Клепач, В. С. Медведев, Е. В. Базарова.

3. Освоение новых фасонных профилей на стане 600 ПАО «АМК». «Черная металлургия» Бюллетень НТЭИ, Выпуск 4, М.: «Черметинформация», 2016, с.52–56. А. А. Чичкан, Э. Н. Клепач, Е. В. Базарова.

*д.т.н., проф. Рябичева Л. А.*

*ГОУ ВО «Луганский национальный университет им. В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

*ведущий научный сотрудник Дядичев В. В.*

*Инжиниринговый центр Академии строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», г. Симферополь, Республика Крым*

*к.т.н., доц. Коробко Т. Б.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ СИЛ ТРЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОЛОСТЬЮ

Повышение гидростатического давления в очаге пластической деформации увеличивает пластичность металла, что особенно важно для порошковых материалов. Изменение гидростатического давления в очаге пластической деформации при прямом выдавливании можно получить с помощью сил активного трения на контактных поверхностях приложением к свободным поверхностям заготовки сил противодействия и др. Развитие активного действия сил контактного трения путем изменения кинематики движения деформирующего инструмента позволяет управлять деформированным состоянием заготовки за счет интенсивного увеличения сдвиговых деформаций, снижения нормального давления на инструмент.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния активных сил трения на течение металла при прямом выдавливании деталей с полостью из порошковых заготовок.

Для выполнения исследований образцы изготавливали из медного порошка марки ПМС-1 по следующей технологии: прессование на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН заготовок диаметром 32 мм пористостью 15 %; спекание по ступенчатому режиму в среде синтез-газа; прямое выдавливание на том же прессе с противодействием 120 МПа в штампе с неподвижной и подвижной матрицей. В качестве смазки применяли дисульфид молибдена.

При выдавливании в штампе с неподвижной матрицей на первой стадии происходит осадка и уплотнение пористого образца. На второй стадии происходит истечение уплотненного металла в кольцевую щель между контрпуансоном и неподвижной матрицей. Противодействие равное 120 МПа для доуплотнения и устранения дефекта типа утяжины на торце образца создается обоймой.

Для прямого выдавливания с наличием сил активного трения с противодействием 120 МПа величина противодействия выбрана исходя из устранения дефектов на торце образца и равномерности напряженно-деформированного состояния. На первой стадии также происходит осадка и уплотнение пористого образца. При этом скорость движения пуансона и подвижной матрицы равны. При дальнейшем перемещении пуансона происходит истечение уплотненного металла в кольцевую щель между контрпуансоном и подвижной матрицей. Наличие сил активного трения регулируется скоростью перемещения металла и матрицы.

Для анализа кинематики прямого выдавливания на меридиональном сечении порошковых заготовок наносили координатную сетку. После выдавливания элементы сетки измеряли на инструментальном микроскопе и рассчитывали поле интенсивности деформаций. По искаженной сетке определяли компоненты линейных деформаций. После выдавливания определяли плотность, изучали микроструктуру, измеряли твердость.

Процесс прямого выдавливания проходит в две стадии. На первой стадии осуществляется радиальное течение металла и заполнение полости матрицы. Прямое выдавливание заготовки с истечением металла в щель наступает тогда, когда плотность материала достигает некоторой критической величины, которая определяется свойствами порошкового материала и геометрическими параметрами изделия.

В обоих случаях существуют три кинематических модуля очага деформации: в донной, угловой и кольцевой частях. Высокое противодавление 120 МПа обеспечивает отсутствие утяжины на кольцевой части образца и относительно равномерное распределение координатной сетки. При наличии активных сил трения на кольцевой части образца с внешней стороны наблюдается деформация растяжением элементов сетки по направлению их действия. Интенсивности деформаций по трем сечениям образца имеют практически одинаковый характер изменения и величину в донной части для обоих случаев деформирования. В угловой части образца со стороны действия активных сил трения величина интенсивности деформации несколько уменьшается. Значительно она изменяется и в кольцевой части, где происходит наиболее активное проявление трения. Величина интенсивности деформаций уменьшается за счет действия напряжений обратного знака.

Структура образцов, полученных при наличии активных сил трения, характеризуется неравномерностью. Однако высокая интенсивность деформации обеспечивает мелкозернистую структуру и высокую твердость.

В работе установлено влияние активных сил трения на изменение интенсивности деформаций, плотности, структуры и твердости при прямом выдавливании деталей с полостью из порошкового материала. Наличие активных сил трения увеличивает деформации растяжения с внешней стороны образца и сжатия с внутренней стороны. Это повышает разнородность в объеме образца. Вместе с тем плотность остается на уровне теоретической. Активные силы трения увеличивают разнородность по объему образца, и, соответственно, твердость разных объемов образца отличается. Отжиг устраняет разнородность и выравнивает твердость.

### **Библиографический список**

1. Леванов, А. Н. Технологическая эффективность осадки и штамповки с активным действием сил трения [Текст] / А.Н. Леванов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 2. – С. 6–8.
2. Рябичева, Л. А. К определению противодавления при прямом выдавливании порошковых пористых заготовок [Текст] / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів у машинобудуванні Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СЛУ ім. В. Даля. – 2012. – №1 (13). – С. 211–219.
3. Ренне, И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки [Текст]. – Тула: ТПИ, 1970. – 146 с.

*старший преподаватель Горецкий Ю. В.,  
к.т.н., доц. Денищенко П. Н.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР  
заместитель начальника ТЛЦ № 2 по технологии Осипенко А. А.  
Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис», г. Алчевск, ЛНР*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ ГОТОВОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ ТРУБ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К56 В УСЛОВИЯХ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА 3000 ФИЛИАЛА № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»

При производстве толстолистовой стали предназначенной для изготовления труб класса прочности К56 (стали типа 09Г2, 15Г и др.) происходит появление дефектов поверхности листа, которые проявляются в виде повышенной коррозии. Проявляется дефект или после хранения на складе (в течение нескольких суток) или уже у потребителя после его транспортировки (рис. 1).



Рисунок 1 — Поверхность образца толстолистовой стали, покрытой налетом ржавчины

При визуальном исследовании поверхности листа, с помощью микроскопа Бринелля МПБ-2 с увеличением  $50\times$ , обнаружили большое количество неметаллических включений, таких как точечные оксиды, многофазные оксисульфиды (шпинели алюминия, кальция, магния), другие загрязнения – их происхождение может быть обусловлено остатками шлакообразующих смесей на поверхности сляба (рис. 2).

Сравнительный фазовый анализ показал, что в дефектных участках, кроме фаз соответствующих окалине ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ) присутствуют оксигидроксиды железа ( $\text{FeOOH}$ ), которые являются продуктами электрохимической коррозии, образовавшимися вокруг областей анодного растворения металла. Электрохимическая коррозия протекала выборочно в местах повышенного содержания в поверхностных слоях меди и никеля, так как электрохимическая (гальваническая) коррозия протекает на границе контакта двух металлов с разной напряженностью.

Применяемая на стане 3000 технология контролируемой прокатки с использованием установки УКО (ускоренного контролируемого охлаждения) металла после последнего прохода оказывает значительное влияние на формирование воздушной окалины. Резкое охлаждение металла после последнего прохода водой приводит к значительным объемным изменениям не только металла, но и окалины. Чем выше температура окисления, тем больше образуется различных окислов, обладающих разной пластичностью. Превращение их приводит к возникновению внутренних напряжений, вызывающих образование трещин и пор.

Учитывая, что коэффициенты объемных изменений металла и окалины отличаются, это приводит к тому что слой окалины испытывает значительные деформации, что приводит к ее растрескиванию и отрыву от металла; такая окалина становится рыхлой в отличие от окалины формируемой при спокойном охлаждении на воздухе в условиях обычного режима прокатки (рис. 3).



Рисунок 2 — Загрязнения на поверхности листа

На рисунке 4 на поверхности листа видны участки чистого металла (блестящие зоны) граничащие с областями окалины. Через незначительный отрезок времени на границе металл-окалина наблюдаются начальные очаги зарождения коррозии (т. е. сама граница этих областей является гальванической парой, и даже при воздействии атмосферы является источником развития коррозии).

Пока корка окалины цела, она является коррозионностойким покрытием, однако, при деформации металла во время дальнейшей обработки, транспортировки или хранения окалина растрескивается и частично осыпается. Так как оксид всегда имеет более положительный электродный потенциал по сравнению с исходным металлом, они являются гальванической парой, и при попадании в трещину влаги начинается коррозия контактного типа, которая имеет скорость, превышающую обычную атмосферную коррозию в несколько раз.

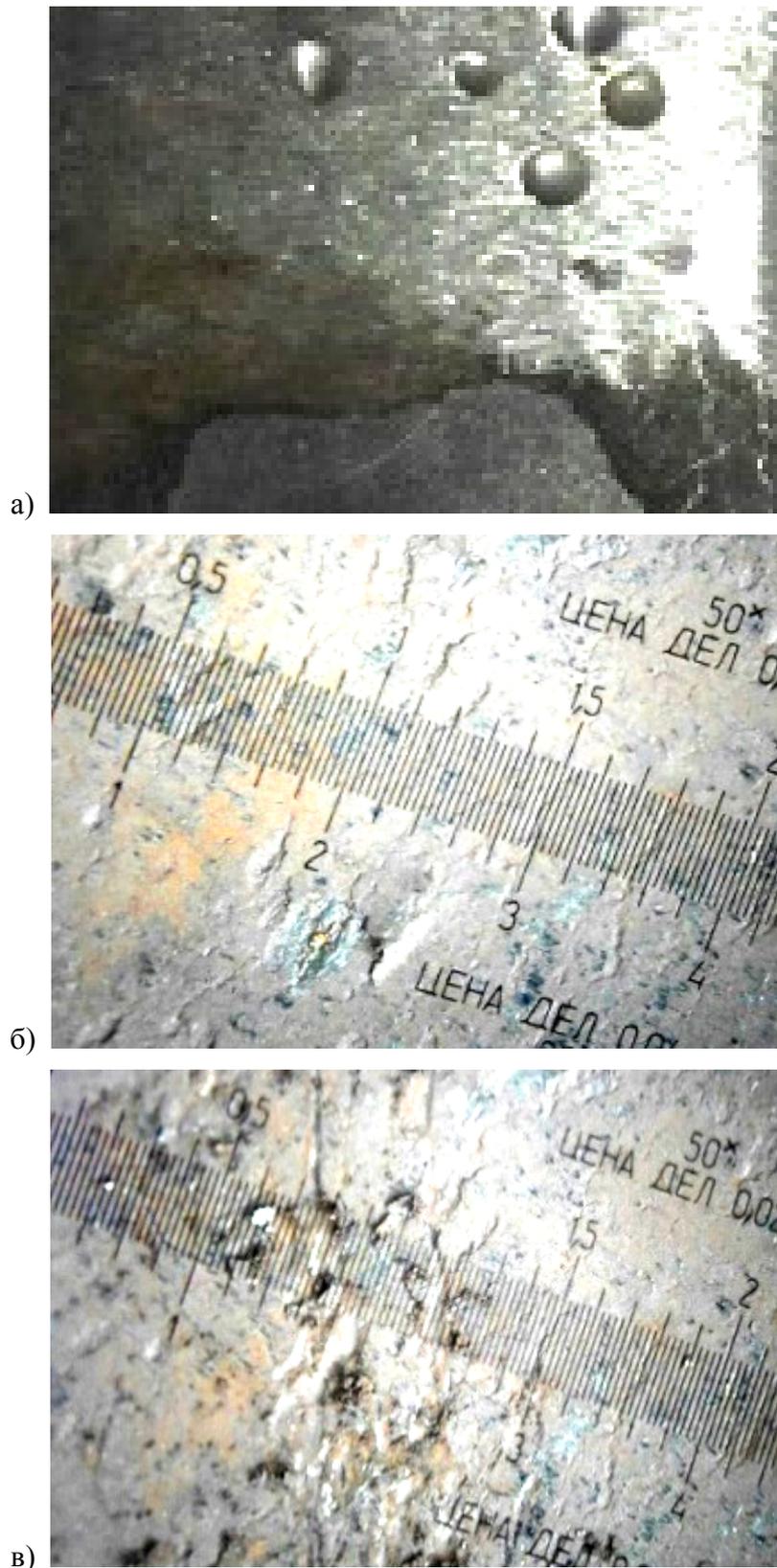


Рисунок 3 — Вид окалины на поверхности горячекатаного листа с охлаждением после прокатки на воздухе (а) и вид окалины на поверхности горячекатаного листа с применением технологии УКО; б) трещины и вздутие окалины на поверхности листа прокатанного с использованием установки УКО (увеличение  $50\times$ ); в) взрыхление окалины от механического воздействия на поверхность образца (увеличение  $50\times$ )

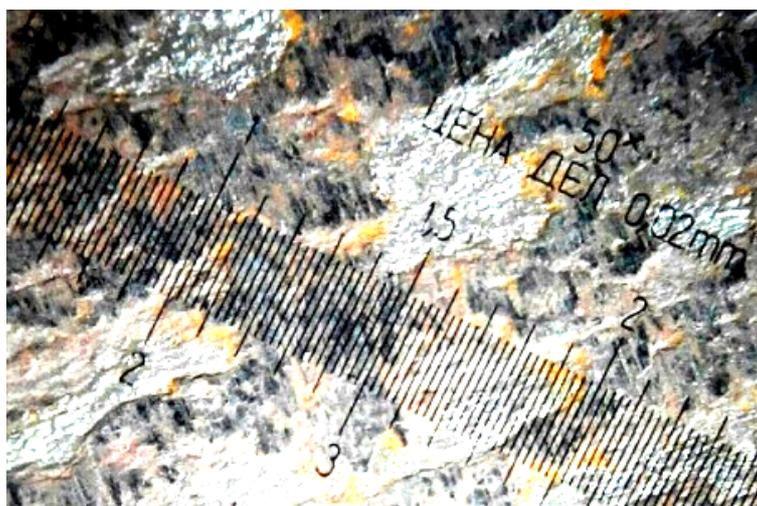
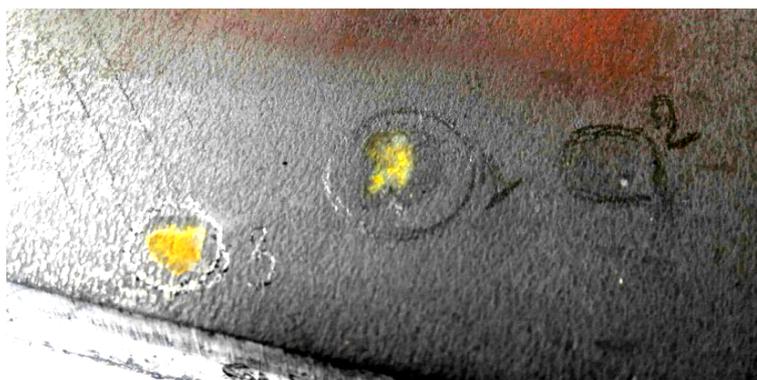


Рисунок 4 — Начальный этап коррозии на границе металл-окалина (увеличение 50<sup>×</sup>)

Опытным путем выявлено, что интенсивно коррозионные процессы начинают развиваться в местах наличия различных поверхностных загрязнений. На поверхность образца были нанесены капли водопроводной воды (рис. 5). При этом капли наносились на поверхность без загрязнения и участки с имеющимися загрязнениями.



1, 3 область – наличие загрязнений; 2 область – загрязнение отсутствует

Рисунок 5 — Механизм формирования коррозионного пятна вокруг дефекта

Металлографические исследования и аналитический обзор указывают, что причиной образования рассматриваемых поверхностных дефектов является локальная электрохимическая коррозия металла в результате образования на поверхности листа многочисленных коррозионных гальванических пар «железо-медь», «железо-медь, никель», «железо-загрязнения» в присутствии электролита (вода, влага атмосферы). Так же гальванической парой является сам металл и рыхлая, с элементами трещин и вздутий окалина на его поверхности.

Возможной причиной наличия меди в поверхностном слое заготовки мог быть износ медных плит кристаллизатора при непрерывной разливке слябов. Но наличие меди в поверхностном слое готового листа, по этой причине, под вопросом, т. к. сляб в последующем подвергается нагреву в методической печи при температуре выше 1300<sup>°C</sup>, а температура плавления меди 1083<sup>°C</sup>, объемы ее незначительны и она должна выгореть с поверхности. Так же, последующее удаление печной окалина гидросбивом перед прокаткой должно удалить остатки поверхностных включений. Таким образом, наличие загрязнений с включениями ино-

родных материалов может быть связано с нарушениями функционирования оборудования в технологической линии прокатки.

Для устранения повышенной коррозии поверхности готового листового проката для труб класса прочности К56 можно рекомендовать следующее. На этапе получения заготовки в ККЦ усилить контроль над эксплуатацией медных кристаллизаторов на МНЛЗ, с целью недопущения их повышенного износа и выработки. В условиях ТЛЦ № 2 обеспечить безаварийную работу оборудования стана с целью предотвращения попадания продуктов износа, смазки и других загрязнений на поверхность раската; усилить контроль качеством очистки технической воды, используемой в технологической линии стана, особенно на установке УКО, для предотвращения попадания загрязнений с водой на поверхность листа. В случае необходимости полного удаления окалина с поверхности готового проката можно рекомендовать использование после установки УКО технологических агрегатов газопламенной обработки, травления, абразивной очистки или гидромеханического способа обработки поверхности раската, с последующим нанесением специального грунта.

### **Библиографический список**

1. Северденко, В. П. Окалина при горячей обработке металлов давлением [Текст] / В. П. Северденко, Е. М. Макушок, А. Н. Равин. – М.: Металлургия, 1997. – 208 с.
2. Архаров, В. И. Окисление металлов [Текст] / В. И. Архаров. Свердловск – Москва: Металлургиздат, 1945. – 171 с.
3. Петрова, Л. Г. Методы исследования структуры металлических материалов: учеб. пособие / Л. Г. Петрова. – М.: МАДИ, 2002. – 125 с.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ  
ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Форма раската в плане является одним из важнейших показателей качества листового проката, прежде всего толстолистого. Улучшения рассматриваемого показателя обеспечивает более высокий уровень технологических и потребительских свойств, что способствует качеству и конкурентоспособности исследуемого вида металлопродукции. Работа посвящена проверке математической модели [1] серповидности раската при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клетки. На основании математической модели, представленной в [1], была проведена опытная прокатка на базе лабораторного стана 200/500/400 кафедры ОМД и М ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». В качестве факторов использовались безразмерные величины:  $\Delta h_{cp} / B$ ,  $H / B$ ,  $\delta / B$  ( $\Delta h_{cp}$  – среднее обжатие по ширине раската;  $H$  – исходная толщина перед прокаткой;  $\delta$  – величина поперечной разнотолщинности (клиновидности);  $B$  – ширина раската перед проходом). Пределы изменения переменных исследуемого процесса представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 — Параметры эксперимента в натуральных величинах

Параметр	$H$ , мм		$\Delta h_{cp}$ , мм		$\delta$ , мм		$B$ , мм	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Натуральный	9,00	56,00	2,00	6,00	0,12	1,00	1219,00	1600,00
Модель	2,00	12,44	0,44	1,33	0,03	0,22	270,89	355,56

Таблица 2 — Пределы изменения факторов в безразмерном виде

$H / B$			$\Delta h_{cp} / B$			$\delta / B$		
min	max	средний	min	max	сред	min	max	средний
0,00563	0,03500	0,02031	0,00125	0,00375	0,00250	0,00008	0,00063	0,00035

Откликом служило отношение  $\Delta L / B$ , которое представляет собой котангенс угла поворота раската в горизонтальной плоскости, где:  $\Delta L$  – разность длин на кромках образца.

Таблица 3 — Кодирование факторов

Уровни и интервалы варьирования факторов	$P1 = H / B$	$P2 = \Delta h_{cp} / B$	$P3 = \delta / B$
Верхний уровень ( $Pg = +1$ )	0,035000	0,003750	0,000625
Нижний уровень ( $Pg = -1$ )	0,005625	0,001250	0,000075
Нулевой уровень ( $Pg0 = 0$ )	0,020313	0,002500	0,000350
Интервал варьирования	0,014688	0,001250	0,000275

После проведенных опытов, из полученных результатов была составлена множественная регрессионная модель, которая описывает поведение раската от разных исходных данных.

$$\Delta L / B = -0,248 - 17,996 \cdot H / B + 238,673 \cdot \Delta h_{cp} / B - 229,041 \cdot \delta / B \quad (1)$$

Таблица 4 — Матрица плана ДФЭ  $2^{4-1}$ 

X1= $H/B$	X2= $\Delta h_{cp}/B$	X3= $\delta/B$	X1	X2	X3
0,035000	0,003750	0,000075	+	+	–
0,005625	0,001250	0,000075	–	–	–
0,035000	0,003750	0,000625	+	+	+
0,005625	0,001250	0,000625	–	–	+
0,014688	0,001250	0,000275	0	0	0

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась в соответствии с ГОСТ 8.207-76 (Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений) и общей схемой регрессионного анализа. Проверка воспроизводимости эксперимента показала, что опыты являются равнозначными: табличное значение критерия Кокрена при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  равен 0,684, больше эмпирического (табл. 5). Следовательно, гипотеза об однородности ряда дисперсий подтверждается.

Коэффициент множественной корреляции полученного уравнения  $R = 1,000$ . Значимость  $R$ , проверенная по  $t$ -критерию Стьюдента и  $F$ -критерию Фишера показала, что гипотеза о равенстве коэффициента множественной корреляции нулю отвергается и связь считается статистически значимой. Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента показала, что при  $\alpha = 0,05$  все они значимы (расчетные значения коэффициентов больше табличного).

Таблица 5 — Статистическая обработка результатов

$S_{[y]}^2$	$G_{табл}$	$G_{расч}$	$S_{ад}^2$	$R$	$R^2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$
2,541	0,684	0,612	0,088	1,000	1,000	1,334	6,400

Результаты расчета серповидности раската по формуле (1) показали хорошую сходимость с результатами, получаемыми по математической модели расчета серповидности [1]. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики прогноза серповидности с учетом температурного градиента по ширине раската.

### Библиографический список

1. Денищенко П. Н., Макаганюк А. С. Математическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения // Сборник научных трудов ДонГТУ – Алчевск, 2020. – Вып. 61. – С. 77–83.
2. Выдрин, В. Н. Об основах планшетности полосы [Текст] / В. Н. Выдрин // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Челябинск, 1972. – Вып. 102. – С. 208–219.
3. Выдрин, В. Н. Постановка задачи по исследованию условия получения планшетных листов при холодной прокатке [Текст] / В. Н. Выдрин, Н. В. Судаков, Е. А. Остсемин // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Челябинск, 1978. – Вып. 209. – С. 23–30.
4. Sergey M. Belskiy, Igor P. Mazur. Mathematical Model of hot-rolled Strip's Camber Formation / Sergey M. Belskiy, Igor P. Mazur // 8th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing. – Lipetsk State Technical University, 2016. – P. 5–7.
5. Бельский, С. М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / С. М. Бельский. – Липецк. – 2009. – 368 с.

*к.т.н., доц. Коробко Т. Б.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

*к.т.н. Георгиаду М. В.*

*Частное АО «Лугцентрокуз» им. С. С. Монятовского», инженер технолог ОКП  
(отдел кузнечного производства) г. Луганск, ЛНР*

*инженер Георгиадис Т.*

*ВТУЗ Западной Македонии, г. Козани, Греция*

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАВАРКОЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 42CRMO4

Технические требования (ОСТ 5.9137-83 «Заварка дефектов литья из стали и чугуна») определяют количество и размер, допускаемых в них дефектов. Если же качество штамповки не соответствует требованиям чертежа и технических условий, то ее бракуют. Для уменьшения потерь от брака в ряде случаев применяют заварку для исправления дефектов стальных штампованных деталей, причем последние поддаются исправлению значительно труднее. В зависимости от характера дефекта, конструктивных особенностей и условий эксплуатации восстанавливаемых изделий, а также от стадии механической обработки, после которой выявлен дефект, применяют различные способы заварки.

В данной работе были проведены опыты по восстановлению заваркой геометрических размеров детали «Корпус» из стали 42CrMo4 (сталь марки 42CrMo4, легированная термообрабатываемая, популярна в машиностроении, из нее изготавливают ответственные высокопрочные детали компрессоров, турбин, рабочие элементы тяжелой наземной и подземной техники, детали сельскохозяйственных машин, но она имеет низкую свариваемость в виду высокой трещиностойкости) по EN 10083-3:2006 и дополнительно ввели операцию по диагностике качества сварного шва после заварки и зачистки дефектов. Заварку дефектных участков стального литья следует производить одним из следующих способов: ручной дуговой сваркой плавящимся электродом; полуавтоматической дуговой сваркой в углекислом газе; полуавтоматической дуговой сваркой под флюсом; электрошлаковой сваркой; ручной аргоно-дуговой сваркой. В данной работе использовали полуавтомат сварочный ПДГ-421, который предназначен для сварки изделий из стали на постоянном токе стальной порошковой проволокой в среде защитных газов, а также имеет возможность ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Разделку и зачистку дефектов производили машиной ручной шлифовальной ИП 2014Б по ТУ 22-166-13-88 с кругом шлифовальным 150×25×32 14А F24 35 ВF 8050 по ГОСТ Р 52588-2011. Средняя длительность зачистки дефектов одного корпуса составляла около 10 мин.

Предварительный подогрев зачищенной зоны дефекта до температуры 200–250°C производили газовой горелкой. Температуру поверхности измеряли с помощью пирометра «Термоскоп-100-НТ» с диапазоном измерения температуры –20...+800°C. Длительность нагрева одного дефекта составляла в среднем 40–45 мин.

Восстановление производили сварочной проволокой Св-08ХГСМФА, полуавтоматом для дуговой сварки ПДГ-421 с выпрямителем ВДГ 303-3 фирмы «Селма» при скорости подачи проволоки 2,7 м/мм. Напряжение дуги составляло 29 В, сварочный ток – 125–150 А.

После заварки дефектов, наплавленную зону укрывали тремя слоями асботкани и оставляли остывать до 70–90°C. Среднее время остывания при температуре в цехе (22–28°C) составляло 3,5 часа.

После остывания производили зачистку наплавленной поверхности с сохранением геометрии детали и проводили диагностику ультразвуком на предмет наличия несплошностей в наплавленной зоне – дефекты не выявлены.

Все корпуса были подвергнуты отжигу для снятия напряжений.

Период времени между наплавкой и отжигом не превышал 2 суток.

Закалка и отпуск выполнялись совместно с серийными корпусами по существующей технологии. Твердость корпуса после термообработки составила 270 – 285 НВ ( $\varnothing_{\text{отп}} = 3,7 - 3,6$  мм).

После окончательной термообработки при ультразвуковом и магнитном контроле поверхностные и внутренние дефекты не выявлены. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности восстановления заваркой массивной штампованной детали «Корпус» из стали 42CrMo4 по EN 10083-3:2006.

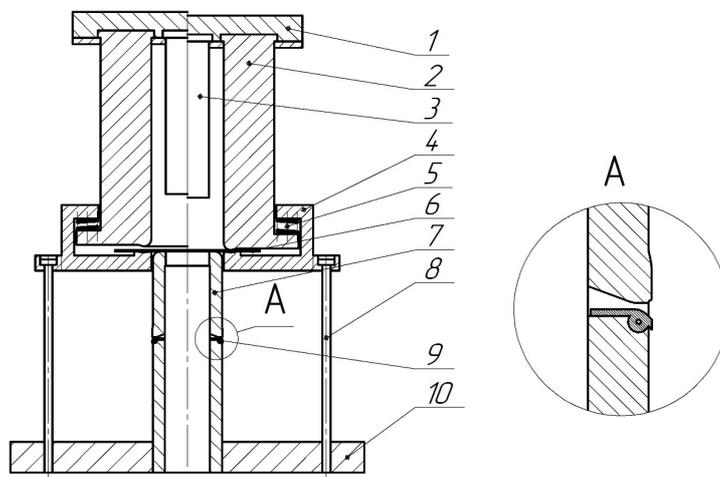
### **Библиографический список**

1. ОСТ 5.9137-83. Заварка дефектов литья из стали и чугуна. Технические требования [Текст]. – Введ. 1983–18–10. – Издательство стандартов. – 59 с.
2. ТУ 22-166-13-88. Машина ручная шлифовальная пневматическая радиальная ИП-2014Б. Технические условия. [Текст]. – Введ. 1988–15–02. – Издательство стандартов. – 33 с.
3. ГОСТ Р 52588-2011. Инструмент абразивный. Требования безопасности. [Текст]. – Введ. 2013–01–01. – Издательство стандартов. – 15 с

РАЗРАБОТКА ШТАМПА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК  
ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ

На современном этапе развития народного хозяйства все больше предприятий металлургической и машиностроительной отраслей сталкиваются с явлениями кризиса. На многих из них имеется прессовое оборудование, которое в данный момент не используется или имеет значительные простои. Для расширения номенклатуры изделий на таких предприятиях можно рекомендовать получение изделий, имеющих высокий потребительский спрос, таких как трубные заготовки (бочаты, резьбы, сгоны и т. д.), используемые для соединения элементов трубопроводов отопительных, водопроводных систем и т. д. Чаще всего для их изготовления используют стали, алюминиевые и медные сплавы. Одним из методов получения таких изделий является штамповка из листа, обычно штамповка вытяжкой с утонением с последующим удалением дна полученной полой заготовки. Преимуществом в этом случае является высокая равнотолщинность получаемой заготовки, а недостатком – высокие отходы металла и несколько переходов вытяжки [1].

Для снижения количества переходов и повышения коэффициента использования металла предложен новый способ получения трубных заготовок ограниченной длины из листовых заготовок, позволяющий получить изделие за три перехода: вырубку, штамповку и обрезку. Для штамповки трубной заготовки предложен штамп оригинальной конструкции совмещенного действия, обеспечивающий процесс вытяжки с прижимом, пробивку дна и отгибку полученного контура. Конструкция штампа представлена на рисунке 1.



1 – верхняя плита штампа; 2 – вытяжная матрица с перетяжным ребром; 3 – пробивной пуансон;  
4 – прижим; 5 – пружины; 6 – заготовка; 7 – пуансон-матрица; 8 – ограничитель вертикального перемещения; 9 – съемник; 10 – нижняя плита штампа

Рисунок 1 — Схема конструкции штампа совмещенного действия для получения трубной заготовки (начальный момент и момент прижима заготовки)

Для штамповки заготовку 6 устанавливают на прижим 4. При ходе пресса верхняя плита 1 опускается и прижим прижимает заготовку к вытяжной матрице с перетяжным ребром 2. Далее происходит процесс вытяжки пуансоном-матрицей 7, который входит в вытяжную матрицу за счет движения верхней части штампа вниз. Вытяжка осуществляется на предельную глубину, рассчитываемую для каждого деформируемого материала индивидуально. По

достижении предельной глубины, заготовка входит в контакт с пробивным пуансоном 3 (рис. 2, а) и с помощью пуансон-матрицы отделяет отход по замкнутому контуру. При этом отход удаляется на провал. Далее при движении верхней части штампа вниз пуансон-матрица отгибает полученное отверстие, а калибровочный поясок на пуансон-матрице протягивает заготовку (рис. 2, б), после чего отштампованная заготовка при движении верхней части штампа вверх удаляется съемником 9. Для обеспечения соосности верхней и нижней части штампа предусмотрен ограничитель вертикального перемещения 8.

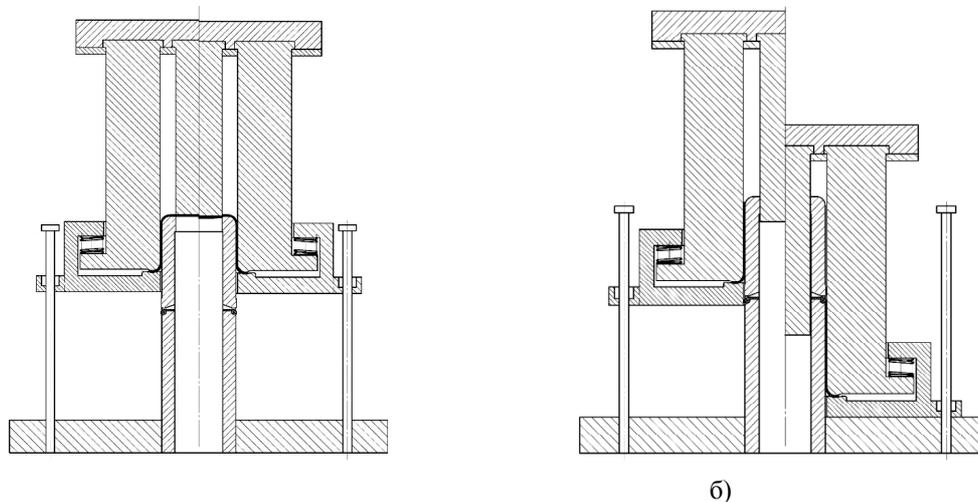


Рисунок 2 — Стадии штамповки: а) вытяжки и пробивки; б) отгибки и протяжки

Штамп устанавливается на пресс простого действия, что делает его универсальным в использовании. Для проверки возможности осуществления данного вида штамповки осуществлено конечно-элементное моделирование процесса, которое подтвердило возможность его осуществления. Результаты процесса моделирования опубликованы в работе [2].

Таким образом, предложена конструкция штампа для изготовления трубной заготовки, позволяющая осуществить процесс вытяжки, пробивки дна, его отгибки и протяжки за один ход пресса и обеспечивающий разнотолщинность получаемой заготовки и экономию металла за счет снижения отходов по сравнению с процессом вытяжки и удаления дна.

### Библиографический список

1. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учеб. для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: МГТУ, 2000. – 479 с
2. Митичкина Н. Г., Токарев А. В. Оценка распределения толщины трубного изделия, полученного штамповкой из листовой заготовки на этапах формоизменения // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов IV международной научно-технической конференции (17 октября 2019) под общей редакцией В. А. Козачишена. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019, С. 99–100

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЬЦА С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ НА РАДИАЛЬНО-ОСЕВОМ КОЛЬЦЕПРОКАТНОМ СТАНЕ

Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем выполнено с учетом условий проведения физического эксперимента на радиально-осевом кольцепрокатном стане [1].

Процесс прокатки кольцевых заготовок на кольцепрокатном стане реализован в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне Ring Rolling. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец выполнена в работе [2].

Визуализация моделирования процесса прокатки фланца представлена на рисунке 1.

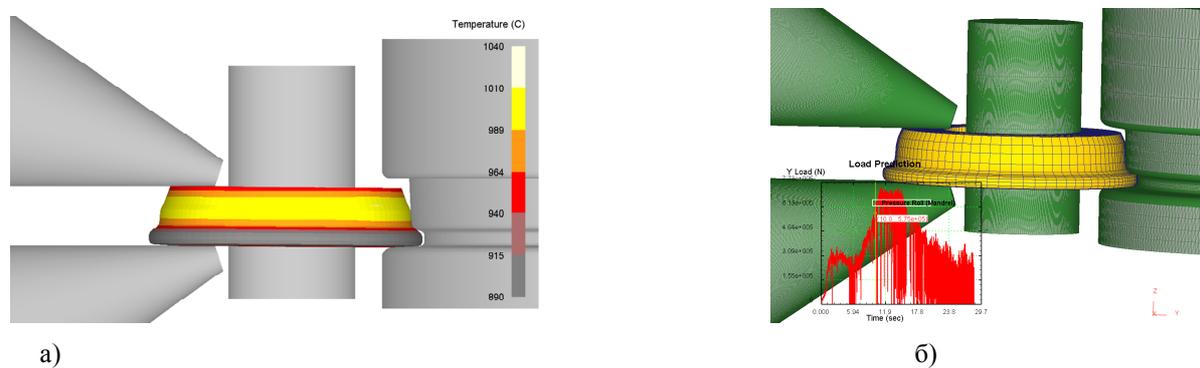


Рисунок 1 — Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки фланца:  
а) распределение температуры кольца; б) распределение усилия прокатки

Расчетные (при конечно-элементном моделировании) и экспериментальные графические зависимости показаны на рисунках 2, 3. Зависимости овалности и разнотолщинности кольца от времени прокатки, установленные на базе конечно-элементного моделирования, представлены на рисунке 4.

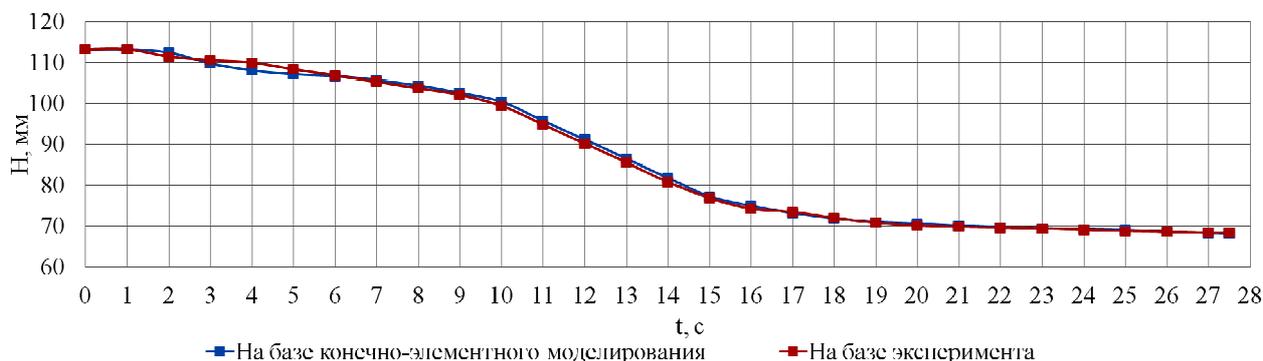


Рисунок 2 — Зависимости толщины кольца от времени процесса прокатки

Как показал анализ полученных результатов (рис. 2, 3) конечно-элементное моделирование позволило установить основные закономерности изучаемого процесса прокатки. Полученные при конечно-элементном моделировании зависимости толщины кольца от времени адекватно описывают характер формоизменения металла, установленный эксперименталь-

ным путем (рис. 2). Среднее относительное отклонение расчетных значений толщины кольца от экспериментальных не превысило 1 %. Полученный при моделировании характер изменения силы прокатки в радиальном очаге деформации в качественном отношении достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным (рисунок 3). Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превысило 15 %.

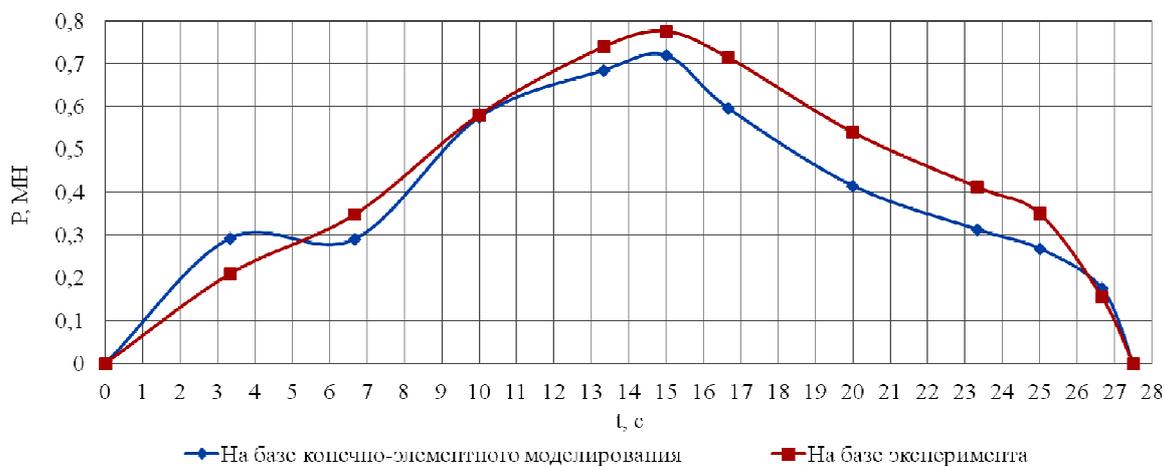


Рисунок 3 — Зависимости силы прокатки в радиальном очаге деформации от времени процесса прокатки

Анализ полученных результатов также показал, что режим прокатки, который был реализован при выполнении эксперимента, характеризуется достаточно интенсивными радиальными обжатиями, в первую очередь на этапе по времени от 10-ти до 15 с (рис. 2). На этом этапе, соответственно, имеет место интенсивный рост силы прокатки (рис. 3). При этом за счет значительной неравномерности деформации (обжатий и вытяжек) в течение одного оборота заготовки происходит, во-первых, некоторый наклон кольца в горизонтальной плоскости (рис. 5, *a*) и, во-вторых, интенсивный рост его овальности и разнотолщинности (рис. 4 и 5, *б*).

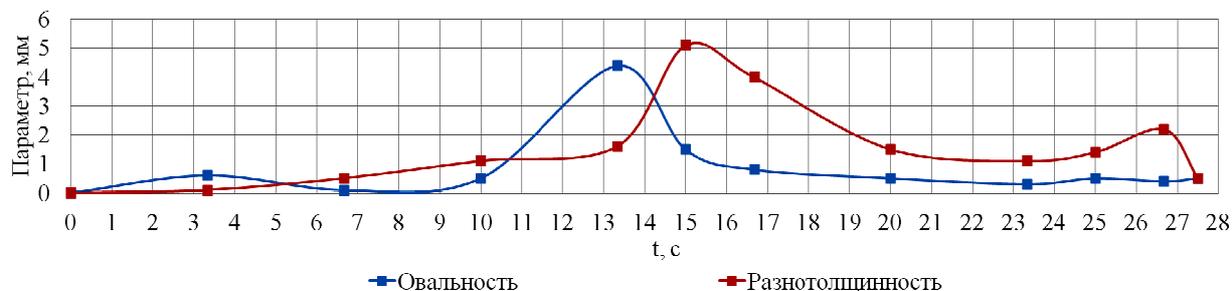


Рисунок 4 — Зависимости овальности и разнотолщинности от времени прокатки, установленные на базе конечно-элементного моделирования

Изучение факторов, приводящих к овальности и разнотолщинности колец имеет высокую актуальность. Этой теме посвящен ряд работ, например, [3, 4].

Нами установлено, что на завершающем этапе прокатки (который начинается с 25-ой и завершается на 27-й секунде) имеет место повторный рост разнотолщинности и овальности кольца (рис. 4), который связан уже с интенсивным снижением силы прокатки (рис. 3) и, соответственно, с ростом неравномерности деформации. Поэтому параметры разнотолщинности и овальности получены порядка 0,5 – 1,5 мм. Причем необходимо учитывать, что конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане выполнено на базе осесимметричной исходной кольцевой заготовки, что на практике встречается крайне редко.

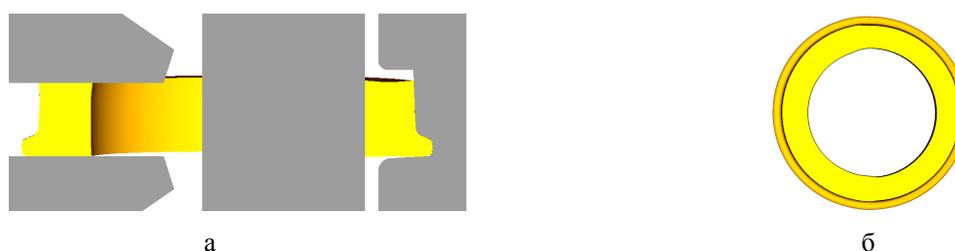


Рисунок 5 — Формоизменение кольца на этапе прокатки, соответствующем по времени 15 с:  
 а) наклон кольца относительно горизонтальной плоскости; б) асимметрия кольца после интенсивной раскатки по диаметру

Рассмотренный выше режим прокатки обеспечивает высокую производительность процесса, вместе с тем, отсутствие устойчивой тенденции к минимизации разнотолщинности и овальности прокатываемого кольца на завершающей его стадии является недостатком.

### Выводы

1. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем (фланца) на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Полученные зависимости толщины кольца от времени адекватно описывают характер формоизменения металла, установленный экспериментальным путем. Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 1 %. Характер изменения силы прокатки в радиальном очаге деформации в качественном отношении достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным. Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышают 15 %.

2. Установлено, что на завершающем этапе прокатки имеет место повторный рост разнотолщинности и овальности кольца, который связан с интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, с ростом неравномерности деформации металла. Рассмотренный режим прокатки обеспечивает высокую производительность процесса. Вместе с тем, отсутствие устойчивой тенденции к минимизации разнотолщинности и овальности кольца на завершающей стадии прокатки является недостатком. Его устранение (для получения разнотолщинности и овальности кольца менее 0,5 – 1,5 мм) обеспечивается менее интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца на завершающем этапе прокатки.

### Библиографический список

1. Яковченко, А. В. Экспериментальные исследования процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане / А. В. Яковченко, В. В. Пилипенко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – Том 31, №2. – С. 8–18.
2. Разработка режимов деформации металла для прокатки главного вала колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // Инновационные перспективы Донбасса: тезисы докладов 6-й Межд. науч.-практ. конф., 26-28 мая 2020 г., Донецк. В 6 т. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 98–104.
3. Husmann, T. Measurement of radial-axial rolled rings by using image processing and thermography / T. Husmann, D. Kreimer // Key Engineering Materials. – 2015. – №651–653. – P. 278–283.
4. A 3D-FEM of adaptive movement control of guide and conical rolls in ring rolling process / W. F. Peng [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 92 Iss. 9–12. – P. 3287 – 3298.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ГОРЛОВИН НА ОСНОВЕ  
МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Горловины – изделия из листового материала, которые широко применяются в различных отраслях народного хозяйства. Чаще всего для их получения используют процесс отбортовки отверстий, при котором с помощью пластической деформации исходной заготовки образуют борт по контуру отверстия, полученного пробивкой или сверлением. Этим способом получают горловины с небольшой относительной высотой. Для увеличения высоты изделия совмещают обычно несколько операций, например предварительную вытяжку, формовку или выдавливание, или принудительное утонение стенки борта. В таких процессах чаще всего страдает производительность, т. к. горловину делают за несколько переходов [1]. Еще одной проблемой при получении горловин является искривление отбортованной стенки и обеспечение равной толщины отбортованной стенки по всей высоте, что обеспечило бы лучшие механические свойства и долговечность соединения отбортованных изделий сваркой, с помощью резьбы и др. Поэтому обеспечение равной стенки горловины после отбортовки при высокой производительности процесса, является одним из актуальных направлений исследования. Так как ни один из существующих способов получения горловин не обеспечивает высокого ее качества при высокой производительности был выбран метод морфологического анализа для получения компоновочного решения процесса формообразования горловины. Метод является простым и эффективным инструментом по мнению многих авторов [2, 3].

Целью работы является совершенствование процесса получения горловин на основе морфологического анализа. Для проведения качественного морфологического анализа компоновочной задачи, необходимо точно сформулировать проблему: предложить новую эффективную схему процесса получения горловин методом листовой штамповки на основе процесса отбортовки. Затем определить морфологические признаки: *A* – вид воздействия на заготовку (статическое, импульсное), *B* – материал заготовки (вид материала, толщина заготовки, форма и размер отверстия), *B* – способ разделения материала при получении отверстия (пробивка, чистовая пробивка, сверление, лазерная, и плазменная резка), *Г* – температурные условия (холодная и горячая обработка давлением), *Д* – условия трения (сухое, полужидкостное, жидкостное, дифференцированное), *Е* – дополнительные операции (вырубка, вытяжка, протяжка, выдавливание, формовка, нет), *Ж* – вид штампа (комбинированный, простого действия, последовательного действия), *З* – вид движения деформирующего инструмента (поступательное, вращательное, комбинированное), *И* – дополнительное воздействие на заготовку (тепловое, ультразвуковое), *К* – вид деформирующего инструмента (жесткий, эластичный, комбинированный). Кроме того, ось *B* достаточно обширна, т. к. сюда могут входить любые материалы заготовки, пригодные для листовой штамповки такие как  $B_1^1$  – малоуглеродистые и пластичные стали,  $B_1^2$  алюминий и его сплавы,  $B_1^3$  медь и ее сплавы,  $B_1^4$  пластик и т. д. Толщину заготовки, признак  $B_2$ , подразделяем на  $B_2^1$  – особо тонкие (до 0,5 мм),  $B_2^2$  – тонкие (до 1 мм),  $B_2^3$  – средней толщины (до 4 мм),  $B_2^4$  – толстые (свыше 4 мм). Форму отверстия, признак  $B_3$ , подразделяем на  $B_3^1$  – круглая,  $B_3^2$  – овальная,  $B_3^3$  – прямоугольная,  $B_3^4$  – сложной формы. Размер отверстия, признак  $B_4$ , подразделяем на:  $B_4^1$  – мелкие,  $B_4^2$  – средние,  $B_4^3$  – крупные.

Морфологическая модель при этом является укрупненной и достаточно разветвленной. Анализ данной модели показывает, что имеется  $2 \times 15 \times 5 \times 2 \times 4 \times 6 \times 3 \times 3 \times 3$  различных вариантов способов получения горловин методами штамповки. Часть из них неосуществима. Многие процессы по своим параметрам не могут осуществить разделение или формоизменение того или иного материала и имеют ограничения по толщине заготовки и др.

Морфологический анализ одна из составных частей современных методов прогнозирования, его применение целесообразно при решении узких задач, возникающих при конструкторских и технологических разработках. В сущности, он формально приводит к формированию комбинированных методов обработки на основе дополнительного введения интенсифицирующих факторов: применение нагрева, введение в зону обработки вибраций, комбинирования операций в одном штампе и т. д. Поэтому процессы получения горловин, использующие эти интенсифицирующие факторы, более производительны и обладают более широким спектром технологических возможностей, однако же и приводят к увеличению стоимости и усложнению конструкции оснастки.

На основе полученной морфологической матрицы авторами предложен способ штамповки горловин, который включает в себя выполнение трех операций: выдавливания, пробивки и отбортовки, причем операция выдавливания осуществляется для предварительного формирования заданного распределения толщины вдоль образующей горловины. Эффективность применения предварительного выдавливания, доказана на основе работ [4, 5]. Все формоизменяющие и разделительные операции (выдавливание, пробивку и отбортовку) предложено совместить на основе известного штампа последовательно-совмещенного действия с шиберным механизмом для штамповки шайбы [6]. В штампе выполняется четыре операции: выдавливание в ленте, вырубка заготовки, пробивка отверстия и отбортовка горловины. В штампе предусмотрено V переходов, из которых I и III являются рабочими, II переход из конструктивных соображений не рабочий, IV и V являются разгрузочными, здесь происходит удаление детали из штампа. Первые три перехода располагаются по ходу перемещения штампованной ленты, а два других – перпендикулярно к ленте.

Конструктивной особенностью штампа является наличие в нем шиберного устройства, позволяющего передавать обрабатываемую заготовку поштучно с одного перехода на другой [7]. Однако это решение применимо только для мелких горловин из тонколистовых металлических заготовок.

### Библиографический список

1. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учеб. для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: МГТУ, 2000. – 479 с
2. Капустян В. М., Махотенко Ю. А., Системно-морфологический подход в конструировании. – М.: Атомиздат, 1981. 12 с
3. Драгобецкий В. В., Драгобецкая Л. М., Трушевская Л. П. Применение морфологического анализа при выборе и прогнозировании технологии листового проката // Научные труды КДПУ. Вып. 1/2001(10). – Кременчуг: КДПУ, 2001. – С. 399–401
4. Калюжный В. Л. Исключение утонения и искривления торца стенки при отбортовке отверстий / В. Л. Калюжный, С. А. Пахолко, И. П. Куликов // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2011 – № 46 – С. 41–48.
5. Калюжный А. В. Расчетно-экспериментальный анализ влияния относительной толщины заготовки на силовые режимы и качество изделий при отбортовке / А. В. Калюжный, С. А. Пахолко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – ДГМА. – Краматорск. – 2011 – № 3 (28). – С. 177–183.
6. Дурандин М. М., Рымзин Н. П., Шихов Н. А. Штампы для холодной штамповки мелких деталей. Альбом конструкций и схем М.: Машиностроение, 1978. – 108 с
7. Шабельская Л. И., Митичкина Н. Г. Совершенствование способа получения горловин на основе применения штампа последовательно-совмещенного действия // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции (19 марта 2020) под общей редакцией С.В. Куберского. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020, С. 11–13

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ БАЗЫ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАПРЯЖЕНИИ ТЕЧЕНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ NB-TI

Для микролегированной стали NB-Ti разработана база цифровой информации, являющаяся важным элементом метода автоматизированного определения напряжения течения этой стали в зависимости от фиксированных значений степени логарифмической деформации, скорости деформации и температуры

**Ключевые слова:** микролегированная сталь, напряжение течения металла, экспериментальные кривые течения, база цифровой информации, сплайн-интерполяция

Создание компьютерных баз цифровой информации о напряжении течения металла является актуальной задачей. На их основе можно в автоматизированном режиме выполнять решения широкого круга задач, таких как расчет рациональных режимов деформации металла, разработку эмпирических формул расчета напряжения течения металла, проверку их адекватности и других. Метод автоматизированного формирования базы цифровой информации о напряжении течения металла представлен в работе [1].

Поставлена задача, разработать компьютерную базу цифровой информации о напряжении течения высококачественной микролегированной конструкционной стали NB-Ti (0.055 C, 0.25 Si, 0.7 Mn, 0.17 Mo, 0.018 Nb, 0.023 Ti, 0.003 N), разработанной в [2, 3], которая характеризуется хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью. Кривые течения стали NB-Ti, полученные экспериментально при испытаниях на сжатие, представлены в работе [4] (рис. 1). Они помещены в окно программы для задания исходной информации.

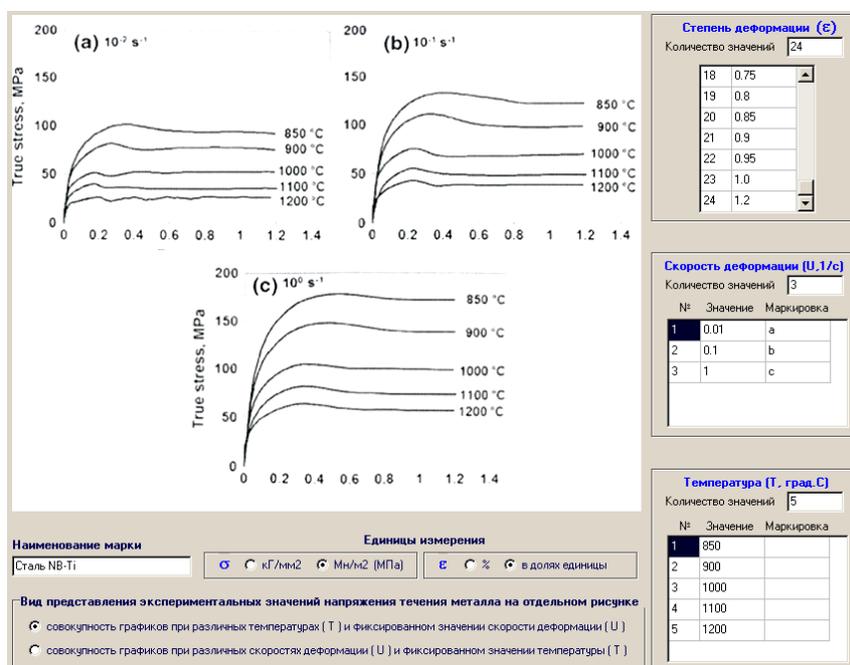


Рисунок 1 — Окно исходной информации для микролегированной стали NB-Ti

На рисунках 2–4 представлены окна программы, которые предназначены для снятия экспериментальной информации и формирования цифровой базы о напряжении течения микролегированной стали NB-Ti.

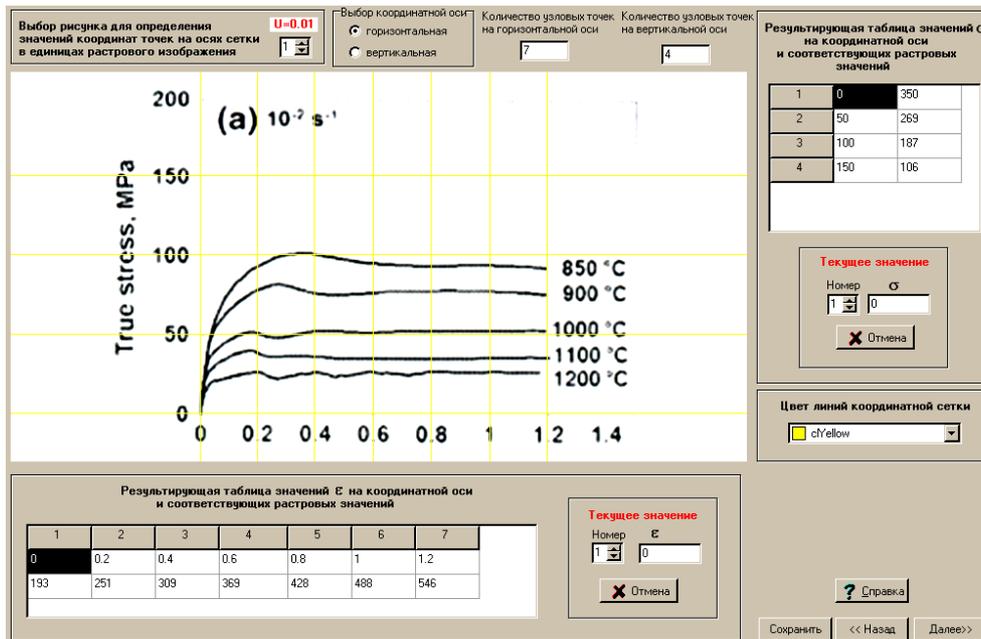


Рисунок 2 — Окно построения координатной сетки

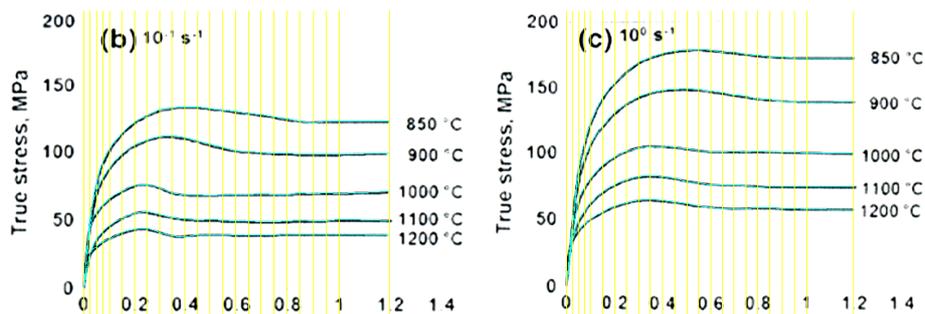
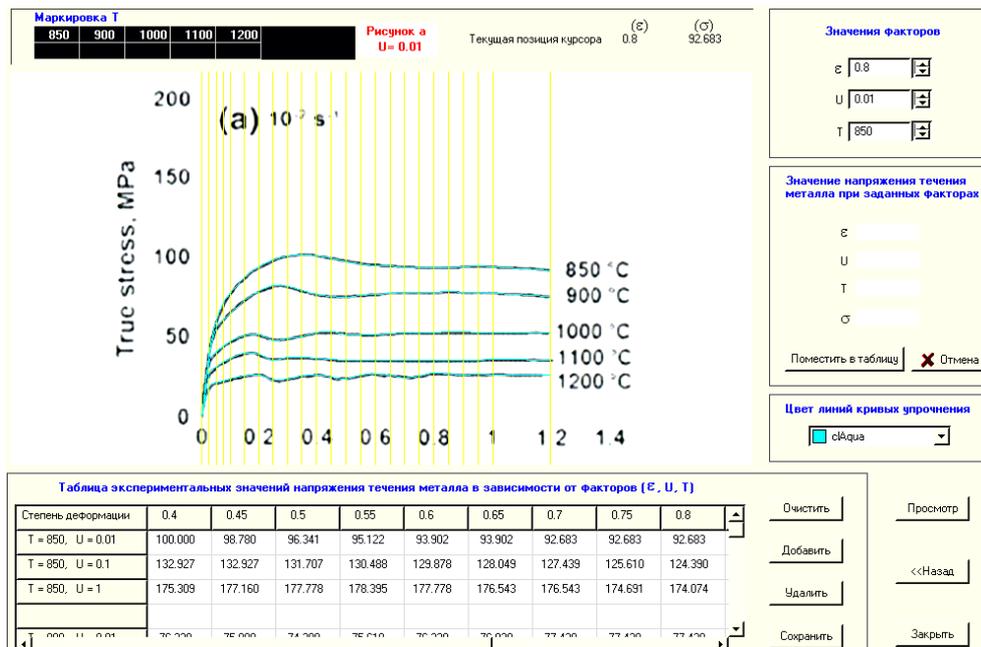


Рисунок 3 — Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн-кривых: а)  $U = 0,01 \text{ c}^{-1}$ ; б)  $U = 0,1 \text{ c}^{-1}$ ; в)  $U = 1,0 \text{ c}^{-1}$

В окне контрольного построения на исходные кривые (показанные черным цветом) выполнено наложение сплайн-интерполированных кривых (показанных бирюзовым цветом), которые получены с использованием базы цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали NB-TI (рис. 3). Видно, что имеет место полное совпадение этих кривых. Причем в процессе сплайн-интерполяции используя метод, представленный в [1], можно определять значения напряжения течения микролегированной стали не только для точек, лежащих на кривых, но и для любых других сочетаний значений степени логарифмической деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$  в диапазоне их изменения на экспериментальных кривых (рис. 1).

Степень деформации	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
T = 850, U = 0.01	0.000	38.272	59.146	70.732	76.829	86.585	93.293	97.561	100.000	100.617	100.000	98.780
T = 850, U = 0.1	0.000	46.951	76.829	92.073	101.829	113.415	121.951	126.220	131.098	132.317	132.927	132.927
T = 850, U = 1	0.000	47.468	87.195	107.500	122.500	141.875	153.086	161.111	168.519	172.222	175.309	177.160
T = 900, U = 0.01	0.000	36.420	54.878	60.366	64.634	72.561	78.049	81.707	81.098	78.659	76.220	75.000
T = 900, U = 0.1	0.000	50.000	70.732	80.488	87.805	98.171	104.878	108.537	110.976	111.585	110.366	107.927
T = 900, U = 1	0.000	44.304	81.707	95.122	106.250	120.000	130.625	136.875	142.500	145.625	147.500	148.125
T = 1000, U = 0.01	0.000	32.716	40.123	43.827	46.914	50.610	51.220	47.531	48.765	50.000	52.439	53.049
T = 1000, U = 0.1	0.000	43.902	54.878	60.366	65.244	70.732	75.000	75.610	73.171	69.512	68.293	68.293
T = 1000, U = 1	0.000	37.342	64.024	73.780	80.488	90.244	96.341	100.625	103.125	104.375	104.375	103.750
T = 1100, U = 0.01	0.000	25.926	30.864	33.951	36.420	39.506	38.889	35.185	37.037	37.037	36.420	35.802
T = 1100, U = 0.1	0.000	24.390	35.366	40.854	45.122	50.610	54.268	55.488	53.659	51.220	50.610	49.390
T = 1100, U = 1	0.000	34.177	49.367	56.098	62.195	70.122	75.610	79.268	81.707	82.317	81.707	80.488
T = 1200, U = 0.01	0.000	17.901	20.988	22.222	23.457	25.309	25.926	22.840	23.457	25.309	25.926	24.691
T = 1200, U = 0.1	0.000	24.390	29.878	33.537	35.366	40.244	42.683	43.293	40.244	37.805	37.195	38.415
T = 1200, U = 1	0.000	32.911	41.772	46.203	50.000	55.488	59.756	62.195	64.024	64.634	64.024	62.805

Степень деформации	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.2
T = 850, U = 0.01	96.341	95.122	93.902	93.902	92.683	92.683	92.683	93.293	93.902	93.902	93.293	90.854
T = 850, U = 0.1	131.707	130.488	129.878	128.049	127.439	125.610	124.390	122.561	121.341	122.561	122.561	122.561
T = 850, U = 1	177.778	178.395	177.778	176.543	176.543	174.691	174.074	172.840	172.840	171.605	171.605	171.605
T = 900, U = 0.01	74.390	75.610	76.220	76.829	77.439	77.439	77.439	78.049	77.439	77.439	76.829	75.000
T = 900, U = 0.1	105.488	103.049	100.610	100.000	99.390	98.780	98.780	98.171	98.171	98.171	98.171	98.780
T = 900, U = 1	148.750	148.125	146.875	145.625	143.750	143.125	140.625	140.625	138.750	138.750	138.125	138.750
T = 1000, U = 0.01	51.220	51.220	51.220	51.829	52.439	52.439	52.439	53.049	53.049	52.439	52.439	52.439
T = 1000, U = 0.1	67.683	68.293	68.293	68.293	68.902	68.293	68.293	69.512	68.902	69.512	68.902	70.732
T = 1000, U = 1	102.500	101.250	100.000	100.000	100.625	100.000	100.625	100.000	100.000	100.000	99.390	99.390
T = 1100, U = 0.01	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.185	35.802	35.185
T = 1100, U = 0.1	50.000	49.390	48.780	48.780	48.171	48.171	48.780	49.390	48.780	48.780	50.000	48.780
T = 1100, U = 1	78.049	76.829	75.610	75.610	75.610	75.000	73.780	74.390	74.390	74.390	74.390	74.390
T = 1200, U = 0.01	23.457	25.926	26.543	25.926	24.074	25.309	27.160	26.543	25.926	26.543	25.926	25.926
T = 1200, U = 0.1	38.415	38.415	38.415	38.415	38.415	38.415	38.415	39.024	39.024	39.024	39.024	38.415
T = 1200, U = 1	61.585	59.756	58.537	57.927	57.927	57.927	58.537	58.537	57.927	57.927	57.317	56.707

Рисунок 4 — База цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали NB-TI

### Выводы

1. Разработанная для микролегированной стали NB-TI база цифровой информации является важным элементом метода автоматизированного определения напряжения течения этой стали в зависимости от фиксированных значений степени логарифмической деформации, скорости деформации и температуры.
2. База цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали NB-TI позволяет в процессе выполнения дальнейших исследований выполнить разработку ряда соответствующих эмпирических формул и проверку их адекватности.

### Библиографический список

1. Яковченко, А. В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации : учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. Образования / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева. – Донецк: «Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ», 2018. – 197 с.
2. I. Tamura, H. Sekine, and T. Tanaka : Thermomechanical Processing of High-Strength Low-Alloy Steels, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1988, pp. 1–15.
3. D. K. Matlock, G. Krauss, and J. G. Speer: Mater. Sci. Forum, 2005, vols. 500–501, pp. 87–96, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.500-501.87>.
4. Analysis of flow behavior of an Nb-Ti microalloyed steel during hot deformation / Mohebbi, M. S. [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2018. – Vol. 49, Iss. 5. – P. 1604–1614.

## СЕКЦИЯ ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.876.212

*д.т.н., проф. Корнеев С. В.,  
к.т.н., доц. Доброногова В. Ю.,  
ассистент Захаров О. В.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Резинотканевые ленты участковых шахтных конвейеров, в основном, соединяются механическим способом.

Стандартом на соединение пластинчатыми скобами резинотканевых лент предусмотрено отношение прочности соединения к прочности ленты не менее 60 % и срок службы соединения – не менее 5 месяцев [1].

Вместе с тем, МС концов ленты остаются наименее надежным элементом тягового органа ленточных конвейеров. Опыт эксплуатации показывает, что относительные прочность и долговечность МС с П-образными скобами в среднем составляют 77 % и 35 %. В результате применения на шахтах Кузбасса и Воркуты соединений типа «Флекско», например, установлено, что их прочность на резинотканевых многослойных лентах достигает – 60 %, а на лентах с цельнотканым каркасом – 75 % от прочности ленты [2]. Средний срок службы заклепочных шарнирных МС «Флекско» типоразмеров R5½, R6/RAR6, R8/RAR8 на шахтах Кузбасса составляет 2 ... 6 месяцев, а максимальный – 14 ... 15 месяцев [3].

Модели неразъемного МС при растяжении и растяжении с изгибом и результаты моделирования представлены в работах [4, 5]. Разработана аналогичная модель шарнирного МС, проходящего обводной барабан.

Моделирование проходит в два этапа: на первом этапе к концам ленты прикладывается изгибающая сила; на втором этапе по окончанию изгиба, к ленте прикладывается растягивающее усилие. Данный метод позволяет получить данные отдельно при изгибе и при растяжении ленты, а также установить соотношение между этими составляющими. В результате моделирования на каждом этапе определялись нормальные и касательные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau$  на площадках, нормальных к осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  локальной системы координат, а также главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в прокладках.

Наибольшему нагружению подвергаются верхние прокладки. При чистом изгибе ленты с МС максимальное напряжение растяжения  $\sigma_{x\text{изг}}$  в верхней прокладке в случае неразъемного МС возникает на поверхности отверстия в поперечном сечении, проходящем через оси отверстий, и достигает 1,03 МПа. В случае шарнирного МС – 0,79 МПа. Максимальные значения напряжения  $\sigma_{y\text{изг}}$  для соответствующих видов МС, составляют 0,4 МПа и 0,15 МПа. Изгибные напряжения в ленте с шарнирными МС в 1,5 раза меньше, чем в случае применения неразъемных МС. Уменьшение изгибных напряжений объясняется тем, что конструкция разъемного МС позволяет исключить перекосы болтов относительно оси отверстия в ленте.

В прокладках наблюдаются зоны растяжения и сжатия. В случае неразъемного МС максимальные напряжения растяжения  $\sigma_{x\text{max}}$ , наблюдаемые на поверхности отверстия в верхней прокладке, равны 24,73 МПа. В случае шарнирного МС – 21,36 МПа.

Составляющая напряжения от изгиба ленты по основе в случае неразъемного МС составляет 4,2 % от суммарной нагрузки, а в случае шарнирного МС – 3,7 %.

Максимальные напряжения растяжения  $\sigma_{y_{\max}}$  по утку при растяжении и изгибе также образуются в верхней прокладке на поверхности отверстия, но со стороны разреза ленты. В случае неразъемного МС  $\sigma_{y_{\max}}$  равно 6,9 МПа, а в случае разъемного – 5,7 МПа.

Запас прочности неразъемного МС составляет 6, что не превышает нормативный запас прочности МС  $n_{\text{МС}}$ , который согласно [1] должен составлять 5...6 (60 % от запаса прочности ленты  $n_n$ , равного 8...10). Полученный запас прочности разъемного МС 7,5, что в 1,25 раз больше, чем в случае неразъемного МС.

**Выводы.** В типичных условиях эксплуатации коэффициенты концентрации напряжений в ленте вокруг отверстий механических соединений составляют для неразъемных МС 1,3, а для шарнирных 1,1. Запас прочности неразъемных соединений равен шести, т. е. предельно допустимому значению. В случае шарнирных МС запас прочности в 1,25 раз больше. Таким образом, применение шарнирных МС является предпочтительным.

### Библиографический список

1. Змикання та ремонт гумовотканевих конвеєрних стрічок рознімними з'єднувачами. Вимоги до технології виконання: ДСТУ 10124183643.001-2003. – Чинний від 2003-10-14. – Київ: Мінпаливенерго України, 2003. – 46 с.
2. Кондрашов, Ю. А. Опыт эксплуатации механических соединений «Флекско» для стыковки конвейерных лент на угольных шахтах и промышленных предприятиях России [Текст] / Ю. А. Кондрашов, А. Н. Комраков, Вальтер Зюльцле, Рудольф Вебер и др. // «Глюкауф», №1 (12), 2002.– С. 43–49.
3. Комраков, А. Н. Применение механических соединений для стыковки конвейерных лент на угольных шахтах и промышленных предприятиях России / А. Н. Комраков, А. Ю. Кондрашин, Р. Н. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. Горный инженер. Отдельный выпуск № 10, 2009. – С. 44–55.
4. Корнеев, С. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния механических стыков конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ, Вып. 54, Алчевск: ИПЦ «Лад», 2018. — С. 101 – 109.
5. Корнеев, С. В. Моделирование с применением ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния резинотканевой конвейерной ленты с механическим стыком при изгибе на обводных барабанах [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ, Вып.61, Алчевск: ИПЦ «Лад», 2020. – С. 101 – 109.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАТНЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ВИБРОЗАЩИТЫ РУЧНЫХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Использование механизмов ударного и возвратно-поступательного действия в промышленности увеличивает распространение вибрации на организм человека. Ручные машины ударного действия являются наиболее виброопасной техникой, а их эксплуатация продолжает оставаться основной причиной возникновения профессиональных заболеваний [1].

Систематическое воздействие вибрации на рабочих приводит к повышению утомляемости, снижению производительности, качества труда и развитию профессионального заболевания в виде вибрационной болезни, занимающей ведущее место в структуре профессиональных патологий. Поэтому защита рабочих от вредного влияния вибрации, снижение роста виброзаболеваемости, улучшение условий труда на современном этапе является важной как научно-технической, так и социально-экономической проблемой.

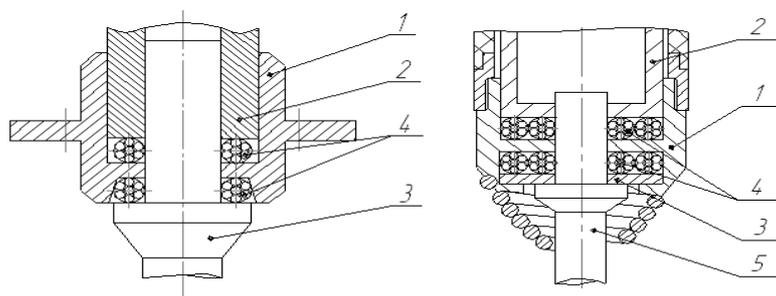
Методы подавления вибровозбуждения ручных машин продолжают совершенствоваться и находят реализацию в конструкциях создаваемых машин. Однако без применения средств виброизоляции и демпфирования до конца решить проблему виброзащиты пока не удается. Виброизоляторы позволяют исключить влияние таких источников вибрации, как переменные внутренние силы, обусловленные движущимися частями; ударные взаимодействия корпуса ручной машины с рабочим инструментом и обратные удары и др.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к средствам вибрационной защиты операторов ручных машин, является обеспечение малой массы и геометрических размеров этих средств. Во многих случаях ограничена возможность уменьшения данных параметров ниже некоторого значения жесткости системы виброизоляции вследствие необходимости поддержания должной силовой и тактильной связи оператора с машиной. Также недопустимо чрезмерное усложнение конструкции и, как следствие, повышение стоимости ручных ударных машин. Прогрессивными упругими элементами, из которых можно конструировать виброизоляторы для ручного ударного инструмента, являются многослойные элементы с регулярной структурой – металлические канаты, пакеты стержней, колец, лент. Имея распределенный по линиям или площадям контакт фрикционных пар трения, такие виброизоляторы являются более стабильными в работе. Кроме того, регулярная структура упругих элементов способствует созданию более точных расчетных моделей виброизоляторов при их нагружении. По указанным причинам наиболее целесообразным будет применение канатного (тросового) виброизолятора в качестве упругого элемента средств вибрационной защиты ручных ударных машин.

Упругим элементом виброизолятора является стальной канат, серийно выпускаемый промышленностью с линейным контактом проволок в прядях и точечным контактом прядей между собой. Канатные виброизоляторы просты в изготовлении; при малых габаритах и массе обеспечивают передачу значительных усилий предварительного поджатия и эффективное снижение динамических нагрузок; их долговечность соизмерима с долговечностью машин ударного действия; обладают высокой несущей способностью и коррозионной стойкостью. Структура каната позволяет необратимо рассеивать энергию колебаний за счет трения между проволоками и прядями и обеспечивает необходимую податливость при действии динамических нагрузок.

В ДонГТИ были разработаны виброзащитные системы ручных ударных машин на основе канатного виброизолятора. На рисунке 1, а упруго-демпфирующие элементы 4 в виде кольцевых канатных виброизоляторов, размещены во фланце 1, который установлен между торцом корпуса машины 2 и рабочим инструментом 3, один из которых расположен между корпусом ударной машины и упором фланца, другой – упором и буртом рабочего инстру-

мента [2]. На рисунке 1, б многокольцевые канатные виброизоляторы 4 расположены в крышке 1, которая взаимодействует с одной стороны с корпусом машины 2, а с другой стороны через упорную шайбу 3 с рабочим инструментом 5 [3].



а)

б)

Рисунок 1 — Конструкции виброзащитных систем ручных ударных машин:  
а) отбойный молоток; б) бетонолом

Для формирования упруго-демпфирующих элементов используется стандартный многожильный канат с центральной прямолинейной прядью и шестью навитыми на неё винтовыми прядями. Каждая из прядей может быть изготовлена (свита) из определенного количества проволок, которые сначала распускаются на отдельные пряди – центральную с прямолинейной осью и наружные пряди с винтовой осью, а затем одна из прядей с винтовой упругой линией достаточной длины сворачивается в кольцо с некоторым средним диаметром. После этого оставшуюся свободной спиралеобразную прядь навивают последовательно на образовавшееся кольцо. После заполнения всего спиралеобразного пространства кольца витками свободной спиральной пряди получается замкнутое тросовое кольцо.

Для оценки эффективности применения предлагаемых конструкций по сравнению с серийно выпускаемой и изучения влияния параметров виброзащитной системы на вибрационные характеристики проведен комплекс теоретических исследований на основе математического моделирования.

Автором разработана математическая модель динамической системы «человек-оператор – ударная машина – обрабатываемая среда», в которой учтены реальные упруго-демпфирующие характеристики виброизоляторов, полученные по результатам статических и динамических испытаний виброизоляторов, динамические характеристики руки человека-оператора при работе ручной машиной ударного действия, влияние свойств обрабатываемой среды при воздействии на неё рабочего инструмента, а также возмущающие силы, действующие на корпус машины.

В среде SIMULINK пакета MATLAB разработана блок-схема имитационного моделирования, которая позволяет проводить теоретические исследования влияния конструктивных параметров виброзащитной системы на вибрационные характеристики ручной ударной машины, а также проводить сравнительный анализ работы ручных ударных машин при различных значениях входящих параметров и разном характере возмущающих сил, которые определяют колебание корпуса машины.

Исследования показали, что использование в разработанных конструкциях виброзащитных систем ручных машин ударного действия кольцевых канатных виброизоляторов способствует снижению динамических усилий, действующих со стороны корпуса машины на рукоятку управления, и, следовательно, на человека-оператора. Но для достижения минимального уровня вибрации рукоятки машины необходимо провести анализ влияния параметров упруго-демпфирующих элементов на эффективность использования виброзащитной системы.

### Библиографический список

1. Тимофеева, И. Г. Безопасность труда на виброопасных технологических процессах [Текст] / И. Г. Тимофеева – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 95с.
2. Пат. 19365 Україна, МПК<sup>7</sup> B25D 17/24. Пневматична машина ударної дії / О. Ю. Рутковський, В. О. Сурело, Д. В. Мулов, Ю. В. Коробейников; заявник і патентовласник Донбас. держ. техніч. ун.-т. – №200606523; заявл. 13.06.06; опубл. 15.12.06, бюл. №12 – 3 с.: іл.
3. Пат. 36012 Україна, МПК B25D 17/00. Пневматичний молоток / Д. В. Мулов, О. Ю. Рутковський; заявник і патентовласник Донбас. держ. техніч. ун.-т. – №20806164; заявл. 12.05.08; опубл. 10.10.08, бюл. №19 – 3 с.: іл.

## СЕКЦИЯ ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 658.382.3

*д.т.н., проф. Гутько Ю. И.,  
старший преподаватель Шинкарева Т. А.,  
студент Бобкова С. Г.*

*ГОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», г. Луганск, ЛНР*

### АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХАХ

С позиции экологии и охраны труда литейное производство является одним из опасных. Производственные процессы в литейных цехах сопровождаются опасными и вредными производственными факторами, которые часто превышают предельно допустимые уровни и концентрации и оказывают негативное воздействие как на работников, так и на окружающую среду.

Сегодня, к сожалению, полное исключение из производственной среды неблагоприятных факторов невозможно. Это недостижимо и в литейных цехах с прогрессивными технологиями и современным оборудованием, а тем более на предприятиях, использующих традиционные технологии и устаревшее оборудование.

Сегодня литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – это прогрессивный способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах, изготавливаемых с использованием выплавляемых, а также выжигаемых и растворяемых моделей однократного использования.

Исследование источников опасных и вредных производственных факторов и анализ состояния окружающей среды прогрессивной технологии изготовления отливок по выплавляемым моделям является актуальным.

Преимущества способа [1, 2]:

- возможность изготовления практически из любых сплавов отливок сложной конфигурации, тонкостенных, с малой шероховатостью поверхности, высоким коэффициентом точности по массе, минимальными припусками на обработку резанием, с резким сокращением отходов металла в стружку;
- создание сложных конструкций, объединяющих несколько деталей в один узел;
- экономически выгодный процесс в единичном (опытном) и серийном производствах;
- снижение материалоемкости производства.

Недостатки [1, 2]:

- процесс многооперационный, трудоемкий и длительный;
- много технологических факторов, влияющих на качество, и соответственно сложность управления качеством;
- большая номенклатура материалов, используемых для получения формы, вредные выделения которых недостаточно изучены (материалы для моделей, суспензии, обсыпки блоков, опорные материалы);
- сложность манипуляторных операций изготовления моделей и форм, автоматизации этих операций;
- повышенный расход металла на литники и поэтому невысокий технологический выход годного.

Сравнительную характеристику проводили по следующим вредным факторам: пыль, газы, аэрозоли, избыточное тепло, шум, вибрации, инфракрасное и электромагнитные излучения, физические перегрузки, нервно-психические напряжения, микроклимат (скорость движения воздуха, температура, относительная влажность). По следующим опасным произ-

водственным факторам: повышенное напряжения в электрических цепях, движение машин и механизмов, искры, брызги и т. д.

Анализ состояния окружающей среды при изготовлении отливок по ЛВМ проводился в сравнении с литьем в песчано-глинистые формы (ПГФ) по комплексу интенсивных производственных факторов и выделению вредных веществ в воздух рабочей зоны [3].

Анализ показал, что при применении процесса литья ПГФ возникает 10 интенсивных факторов, при ЛВМ – 6 интенсивных факторов.

Проведенные исследования показали, что для улучшения состояния окружающей среды при литье по выплавляемым моделям необходимо применять следующие мероприятия:

при автоматизированном изготовлении моделей и сборке блоков использовать местную вытяжную вентиляцию;

участки нанесения связующего и огнеупорного покрытия, вплавления модельного состава оборудовать местными бортовыми отсосами и вытяжной общеобменной вентиляцией;

на участках сушки, заливки, выбивки, очистки и обрубки устанавливать местные отсосы для удаления пыли;

загрузка и выгрузка исходных материалов при гидролизе этилсиликата и приготовлении огнеупорного покрытия должны быть механизированы и производиться в изолированном помещении, оборудованном местной вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении.

Удаляемый вытяжной вентиляцией воздух очищать в соответствии с требованиями Санитарных норм.

### **Библиографический список**

1. Ефимов В.А. Специальные способы литья: Справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич и др.; Под общ. ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.: ил.

2. Иванов В. Н. Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов, С. А. Казанов, Б. С. Курчман и др. Под общей редакцией Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. – 3 изд., перераб. и ил. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с., ил.

3. Шинкарева Т. А. Исследование литья по выплавляемым моделям и анализ состояния окружающей среды / Т. А. Шинкарева, С. Г. Бобкова // Вестник Института Инженерной механики: Сб. научн. работ студентов. – Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018. – С. 188–194.

## CORONA SPRACHE

Sprache ändert sich ständig und in besonderen Zeiten auch besonders schnell. Das Institut für Deutsche Sprache hat deshalb eine Studie aufgelegt, wie die Corona-Krise in Deutsche Sprache einsichert.

Auch wer gerade nicht auf das „Corona-Abitur“ vorbereitet, verwendet Begriffe wie „Social Distancing“, „Besuchsverbot“, „Kontaktbeschränkung“ oder „Behelfsmaske“.

„In Krisenzeiten wir auch mit der Sprache auf die Verängerungen“, sagt Annette Klosa-Kückelhaus vom Leibniz-Institut für Deutsche Sprache (IDS). Sie befasst sich mit der „Coronisierung“ von Sprache.

**Noch nie so viele neue Begriffe.** Es sei normal, dass außergewöhnliche Ereignis dass Vokabular prägen. Sie habe aber noch keine Zeit erlebt, in der sich sprachlich so viel verändert wie jetzt, sagte die Leiterin Lexikographie und Sprachdokumentation im IDS. Selbst während der Wiedervereinigung Deutschlands 1989/90 seien nicht so viele neue Begriffe entstanden.

**Online-Wörterbuch.** Bisher sei es so gewesen, dass sich die 100 meist verwendeten Wörter von Tag zu Tag unterscheiden, so Klosa-Kückelhaus. Sie sammelt Neologismen, also neue Wörter, die in einem Online-Wörterbuch dokumentiert werden. Dazu werten die Wissenschaftler Zeitungen und Online-Medien aus.

**Alte Wörter mit neuem Sinn.** Durch die Krise entstanden nicht nur neue Wörter wie „Alltagsmaske“ oder „Corona-Abitur“. Auch bereits bekannte Wörter erhielten neue Bedeutungen. Weitere würden aus dem Englischen entlehnt wie etwa „Lockdown“ oder stammten aus der medizinischen Fachsprache.

„**Social Distancing**“. So sei etwa der englische Ausdruck „Social Distancing“ ein Fachausdruck aus der Epidemiologie. Da es hierbei nicht um eine soziale, sondern um eine räumliche Trennung gehe, sei eine Übersetzung mit „Soziale Distanzierung“ unzutreffend, erklärt sie.

„**Coronafrei**“ **positiv und negativ.** Eine sowohl negative wie positive Bedeutung habe das Adjektiv „coronafrei“. Positiv in der Bedeutung „keine Infektion aufweisend“ sowie „ohne Sorgen und Einschränkungen wegen der Pandemie“, negativ, wenn etwa das Training ausfalle. Eine ungewöhnliche Wortschöpfung sei der Begriff „Corönchen“, der verharmlosend für das Virus verwendet werde.

„**Corona Frisur**“ und „**Distanzschlange**“. Auch bildhafte Begriffe wie „Distanzschlange“ oder „Corona-Frisur“ zeigten, wie kreativ Menschen mit Sprache umgehen, sagt Klosa-Kückelhaus. So habe Bundeskanzlerin Angela Merkel wohl spontan den Ausdruck „Öffnungsdiskussionsorgie“ geschaffen um auf ein ihrer Ansicht nach endlose Diskussion zur Lockerungen von Beschränkungen hinzuweisen.

**Wer sagt Ausgangsverbot?** Wie wichtig die Wortwahl in Krisenzeiten ist, zeige sich etwa bei Politiker-Statements. Es mache einen Unterschied, ob von Ausgangssperre, Kontaktverbot oder Ausgangsbeschränkung gesprochen werde. Ein ausgesprochenes Verbot rufe schneller Widerwillen hervor. Dabei wählten die meisten Politiker ihre Worte sorgfältig, beobachtet Klosa-Kückelhaus, und arbeiteten an einer „Exit-Strategie“ aus dem „Lockdown“.

**Die neue Normalität.** Welche Wörter dauerhaften Eingang in die deutsche Sprache finden und damit Teil der „neuen Normalität“ werden, lässt sich noch nicht sagen. Eine Antwort darauf werden vielleicht in ein paar Jahren die „Coronials“, die jetzigen Jugendlichen, finden.

## ОЦЕНКА ИЗНОСА ШАРНИРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСНЫХ УСТРОЙСТВ НА ЗАКРЫВАЮЩИХСЯ ШАХТАХ ГУП ЛНР «УГЛЕРЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ»

Одним из основных звеньев технологического комплекса шахты являются подъемные установки. Современная подъемная установка – это сложная система, состоящая из множества механизмов, элементов, устройств, узлов, отвечающих требованиям ГОСТов. Безаварийность работы шахтного подъема должна обеспечиваться высокой надежностью всех элементов подъемной установки.

Подвесные устройства клетей, скипов и противовесов подъемных установок являются ответственными элементами. Это подтверждается особыми требованиями, предъявляемые к ним Правилами безопасности в угольных шахтах и, в частности, требованием относительно необходимости обеспечения тринадцатикратного запаса прочности подвесных устройств относительно максимальной статической нагрузки. Известно, что нормативный срок службы подвесных устройств составляет 7 лет [1]. Однако на практике он в 2–3 раза выше установленного. В процессе эксплуатации происходят усталостные разрушения элементов подвесного устройства. Согласно исследованиям, усталостные разрушения характеризуются тремя стадиями: первая стадия – период «зарождения» микротрещины; вторая стадия – появление усталостной трещины и третья стадия – хрупкое разрушение [2]. Установлено, что скорость износа зависит не только от величины напряжений и силовых параметров воздействующих на детали, но и от внешних факторов. Принимая во внимание, что подвесные устройства подвержены действию циклических нагрузок, следовательно, более напряженными будут являться поверхностные слои по сравнению с внутренними. Это связано с качеством их механической обработки и с действием коррозии, учитывая, что устройства подвержены воздействию агрессивной среды шахтного ствола.

Количество циклов в сутки при эксплуатации подвесных устройств типа УП в условиях закрывающихся шахт ГУП ЛНР «Углереструктуризация» составляло в 2018 г – не более 40, в 2019 г – не более 20, а в 2020 снизилось до 10.

В результате визуально-измерительного контроля установлен относительный износ валликов в зависимости от циклических нагрузок и воздействия агрессивной среды, который представлен в виде диаграмм на рисунке 1.

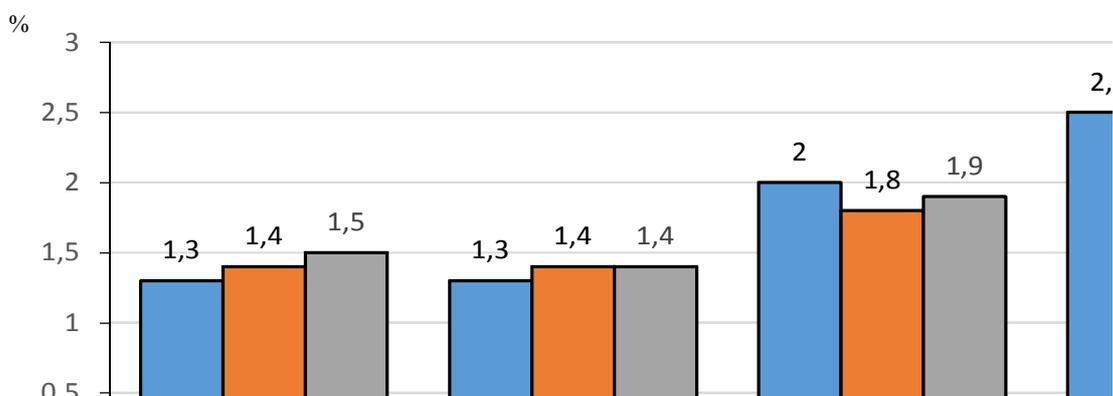
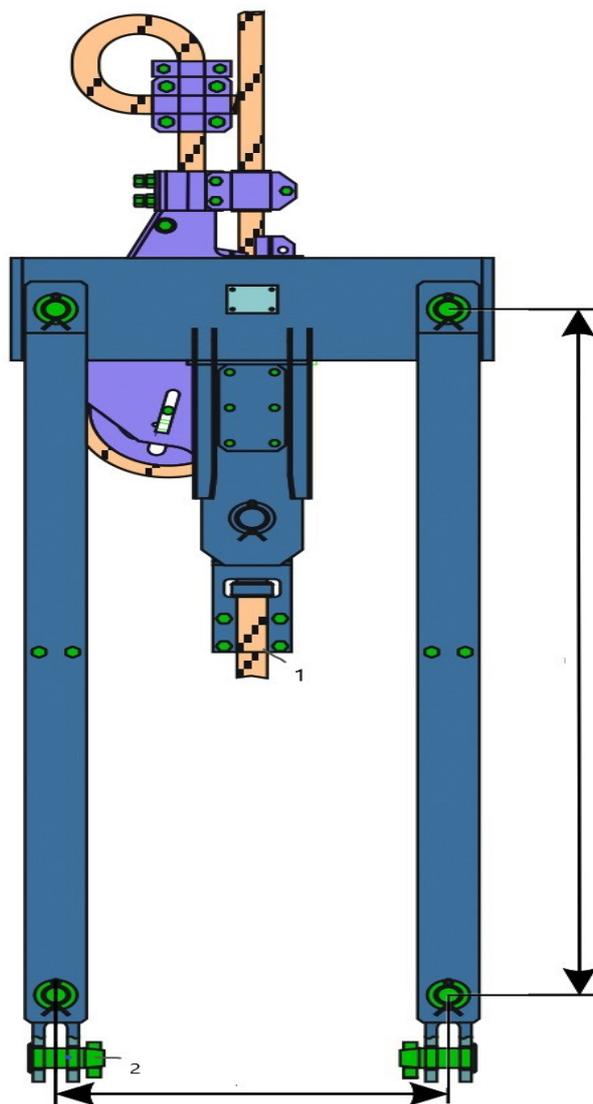


Рисунок 2— Диаграмма изменения относительного износа элементов шарнирных соединений устройства подвесного типа УП

В соответствии с [3] наиболее изнашиваемыми деталями подвесных устройств подъемных сосудов типа УП являются элементы шарнирных соединений – тяга и валик (рис. 2).



1 – тяга; 2 – валик

Рисунок 1 — Конструкция подвесного устройства подъемных сосудов типа УП

Так как количество циклических нагрузок подвесных устройств на исследуемых шахтах снизилось с 40 до 10, а относительный износ остался приблизительно неизменным, то можно предположить, что данные диаграмм отображают коррозионный износ элементов шарнирных соединений.

Таким образом, для уменьшения влияния агрессивной среды рекомендуется располагать подъемные сосуды на поверхности, над устьем ствола, где воздействие влаги будет минимальным.

### Библиографический список

1. ГОСТ 15851-84 Устройства подвесные для шахтных клетей. Технические условия.
2. Уголь Донбасса 2009-2015 Анализ причин разрушения подвесных устройств подъемных сосудов. [http://coal.in.ua/tehnicheskoe\\_obs\\_luzhivanie\\_remont\\_shahtnyh\\_stvolov/to\\_remont\\_podemnyh\\_sosudov/3783-analiz-prichin-razrusheniya-podvesnyx-ustrojstv.html](http://coal.in.ua/tehnicheskoe_obs_luzhivanie_remont_shahtnyh_stvolov/to_remont_podemnyh_sosudov/3783-analiz-prichin-razrusheniya-podvesnyx-ustrojstv.html)
3. СОУ 10.1.00174094.006:2005. Шахтные подвесные устройства и парашюты. Требования к контролю.

## КОНЦЕПЦИЯ ИРРАЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА К БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

На протяжении всего времени существования техногенной цивилизации основными направлениями безопасности жизнедеятельности, охраны труда и экологической безопасности считались и считаются фактологические проявления опасностей, классификация, описание и меры предотвращения которых основаны, по сути, на статистических методах. Такой подход считается вполне логичным и в полной мере отражает научное представление, так как официально научным считается то, что носит повторяемый характер и может быть устойчиво воспроизведено на основе устоявшихся методик проведения экспериментов.

Относительно недавно к вопросам безопасности жизнедеятельности и охраны труда стали применять метод, по сути имевший ранее иррациональное объяснение, но в современных условиях скорее получивший научный подход. К нему относится, так называемая, теория биологических ритмов, которой в последнее время уделяется достаточно большое внимание [1]. В частности при изучении курсов «Безопасность жизнедеятельности» и «Охрана труда» в высших учебных заведениях проводятся лабораторно-практические занятия [2]. В производственных условиях расчет индивидуальных биологических ритмов можно применять на практике при формировании людей в производственные группы [3], причем доказано, что вероятность травматизма при этом снижается [3-5].

С учетом постепенного преобразования иррационального подхода в рациональное русло на примере биоритмов можно предположить, что и иные теории могут постепенно завоевывать свое место в жизнедеятельности человека, поднимая ее уровень до более высокой безопасности.

Одним из подобных подходов в ближайшее время может стать концепция анализа и учета работы подсознания человека на основе информации, полученной в состоянии сна. Считается, что основоположниками таких работ являются швейцарский психиатр и педагог Карл Густав Юнг [6, 7] и основатель психоанализа Зигмунд Фрейд со своей знаменитой книгой «Толкование сновидений» [8].

Конечно же подход к учету коллективного бессознательного требует серьезнейшего всестороннего изучения и анализа с целью применения данных теории на практике. Однако, в первом приближении, для предварительной оценки личного подсознания индивида с помощью сновидений можно использовать более упрощенные приемы, например, широко распространённые сонники, одним из наиболее популярных из которых можно считать сонник Феломена [9].

Конечно же подсознание каждого изобилует огромнейшим количеством эмоциональных сфер, которые зачастую не подвластны даже его владельцу, однако при первичном анализе можно выразить некоторые основополагающие приориттные факторы, например, представленные в таблице 1, оказывающие первостепенное влияние на жизнь человека.

Как правило повторяемость сна основывается на том, что подсознание дает устойчивую подсказку, на которую нужно постараться обратить внимание.

Так, например, ученые из центра хосписной и паллиативной помощи в Буффало (США) на протяжении 10 лет проводили исследования по опросу сюжетов сновидений и выявили, что 90 % из 13000 опрошенных больных видели повторяющиеся сны в очень ярких красках. А 72 % из них общались со своими умершими друзьями или родственниками, которые зачастую пытались их куда-то провести [10].

Таблица 1 — Пример приоритетных ориентировочных факторов подсознания

Сюжет сна	Обобщенный символизм	Уточняющие детали сна	Уточняющий символизм
Все виды транспорта (личный, общественный, грузовой)	Движение (личное, коллективное, вперед, назад)	Легковой автомобиль	Личное движение
		Дорогой автомобиль	Повышенное благосостояние
		Грузовой автомобиль, трактор	Работа
		Троллейбус, автобус	Коллективная энергетика
		Поезд	Устойчивое направление жизни (судьбы)
Странное функционирование органов	Болезнь	Врач, люди, предметы, подсказки	Ассоциируется с каким-то органом
Черная, грязная вода	Перемены к худшему	Люди, предметы	Ассоциируются с жизненными обстоятельствами
Чистая, прозрачная вода	Перемены к лучшему		

Пациенты, преодолевшие клиническую смерть часто указывали, что перед ними пронеслась вся их жизнь, как в ускоренно кинофильме, при этом некоторые попадали в что-то напоминающее тоннель со светом в конце.

По мнению исследователей, подобные сновидения могут проявляться приблизительно за 10–11 недель до физической смерти, а за 3 недели до нее повторяемость сюжетов и их окраска существенно возрастают.

Психолог и терапевт Василий Данилов указывает «Любой сон – это знак. Попытка нашего подсознания нам помочь. О чём-то нас предупредить, подсказать. Не исключение и сны о скорой смерти. Важно правильно отнестись к такому сну. Не следует воспринимать подобный сон, как неизбежность. Только как предупреждение о необходимости что-то изменить в жизни».

Юнг считал, что бессознательное индивидуума не заостряет внимания на физическом завершении жизни и ведет себя как при продолжительности психической жизни и в дальнейшем. Однако некоторые сны могут в символической форме говорить об этом, не вызывая сомнений в продолжении психической жизни, ибо бессознательное однозначно смерти не имеет. Юнг считал, сны своеобразными очень индивидуальными символами, которые в сознании индивидуального человека это может восприниматься самыми разнообразными сюжетами.

С точки зрения, так называемой, эзотерической литературы, одним из знаменитейших произведений которой являются книги Карлоса Кастанеды, любое живое существо обладает не одним, а двумя телам: физическим и энергетическим (по сути Душой). При этом энергетическое тело имеет связь абсолютно со всеми энергиями Вселенной и особенно ярко проявляется в моменты сна, однако чувствительность такого восприятия зависит от возможностей управления энергетическим телом, что достигается упорными и длительными тренировками, а, следовательно, обычному человеку это в полной мере не подвластно. Причем признаками смерти физического тела является не общепринятые догматы в виде отсутствия дыхания и сердцебиения, а отсутствие энергетической оболочки вокруг тела (ауры). Жизнь энергетического тела со смертью физического тела не заканчивается, а может продолжаться в иных физических телах, как правило с момента воплощения при рождении ребенка и несет отпечаток прошлых воплощений.

Однако вся информация, получаемая в процессе жизни никуда не пропадает, а в конечном итоге записывается в энергоинформационное поле, которое по Вернадскому называется Ноосферой [11]. Следовательно Ноосфера обладает всей полнотой информации и способна

вероятностным образом прогнозировать будущее, анализируя предполагаемое поведение живых существ и влияя на их уровень сознания через активность мозга.

Как известно все новое проходит через три стадии: этого не может быть; в этом что-то есть и кто же этого не знает. Академик Вернадский указывал «Но еще более резкое изменение сейчас происходит в основной методике науки. Здесь следствия вновь открытых областей научных фактов вызвали одновременное изменение самих основ нашего научного понимания окружающего, частью оставшихся не тронутыми целые тысячелетия, а частью даже совсем впервые выявившихся, совершенно неожиданно, только в наше время».

Таким образом, очень кратко рассмотренная выше концепция иррационального подхода к безопасности жизнедеятельности предполагает глубокие научные исследования по данной тематике, понимание которых и дальнейшая реализация методики реализации на практике могут дать практический результат существенно значимей традиционных подходов, используемых в настоящее время для предотвращения влияния негативного воздействия на человека и окружающую среду. Поэтому с точки зрения актуальности, работы в этой области не имеют аналогов и могут вывести систему управления охраны труда, экологией и безопасностью жизнедеятельности на совершенно новый не достигаемый до этого уровень.

### Библиографический список

1. Левченко, Э. П. Состояние и перспективы повышения безопасности жизнедеятельности человека на основе биологических ритмов [Текст] / Э. П. Левченко // Экология и безопасность жизнедеятельности-2004: материалы международной конференции – Алчевск, 2004. – С. 150–153.
2. Хитренко, В. И. Влияние биоритмов человека на безопасность его жизнедеятельности [Текст] : методические указания к выполнению лабораторно-практического занятия / В. И. Хитренко, Ю. Т. Товстогань. – Алчевск: ДГМИ, 2002. – 12 с.
3. Левченко, Е. П. Сучасна комп'ютеризована оцінка життєдіяльності людини за її індивідуальними біологічними ритмами [Текст] / Е. П. Левченко // Безпека життєдіяльності, 2003. – № 12. – С. 20–21.
4. Левченко, Э. П. Повышение уровня безопасности работоспособности работников на основе анализа биоритмов [Текст] / Э. П. Левченко // Университетская наука – 2015: материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников. — Луганск: изд-во Луганского ун-та им. Даля, 2015. – С. 28.
5. Левченко, Э. П. Актуальные пути развития безопасности жизнедеятельности человека в глобальном мире [Текст] / Э. П. Левченко, Д. А. Вишневецкий // Актуальные вопросы эффективности управления безопасностью труда: тезисы докладов: материалы II Республиканской научно-практической конференции с международным участием. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018. – С. 55– 56.
6. Юнг, К. Г. Психология бессознательного [Текст] / К. Г. Юнг. – М.: Когито-Центр, 2010. – 352 с.
7. Юнг, К. Г. Красная книга [Текст] / К. Г. Юнг. – М.: Клуб Касталия, 2011. – 396 с.
8. Фрейд, Зигмунд. Толкование сновидений [Текст] / Зигмунд Фрейд. – М.: Фирма СТД, 2005. – 680 с.
9. Сонник Феломена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://felomena.com/sonnik/felomena/>.
10. Ученые выяснили какие сны готовят человека к смерти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newizv.ru/news/science/13-03-2019/uchenyeyevyasnili-kakiesnygotovyatcheloveka-k-smerti>.
11. Кастанеда, Карлос. Колесо времени [Текст] / Карлос Кастанеда. – К.: София, 2013. – 288 с.
12. Вернадский, В. И. Биосфера и ноосфера [Текст] / В. И. Вернадский. – М.: Наука, 1989. – 261 с.

## ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрены основные аспекты производственного травматизма на предприятиях отраслей промышленности в Луганской Народной Республике. Выполнена оценка количественных показателей травматизма.

Технологическое и экономическое развитие социума во многом определяется степенью трудоспособности его членов, что, в свою очередь, зависит от комфортности и безопасности рабочего места, а в более широком разрезе – условий труда. Из опыта трудовой деятельности человечества видно, что каждой экономической сфере присуще отсутствие абсолютной безопасности.

Согласно статистических данных Международной Организации Труда, вследствие отрицательного влияния на работников производственных факторов, ежегодно в мире умирает более 2 миллионов человек. Более 150 миллионов человек страдают от заболеваний, связанных с трудовой деятельностью, а общее количество несчастных случаев на производстве оценивается более чем в 250 миллионов в год [1].

Производственный травматизм как социально-экономическое явление стали изучать довольно давно. В настоящее время широко известны и применяются следующие способы исследования производственного травматизма: статистический, топографический, монографический, эргономический, психофизиологический, экономический, анкетирования, экспертных оценок и др. [1]. Каждому способу присущи как отличительные достоинства, так и характерные недостатки. Однако, совершенно справедливо, можно говорить о том, что статистический метод наиболее распространен в среде надзорных и экспертных органов как наиболее информативный.

Если проанализировать динамику производственного травматизма [2], то она, несомненно, возрастает. Рассмотрим пример угольной отрасли. Количество несчастных случаев возросло с 2 в ноябре 2015 г. до 24 в декабре 2017 г. Затем фиксировалось некоторое снижение количества зафиксированных несчастных случаев. Кроме объективных причин такого положения следует отметить и субъективные, а именно изменение списочной численности работников угольной отрасли в меньшую сторону. Т. е., если, к примеру, в 2016 г. при численности работников отрасли 40 000 произошло 18 случаев, то относительная доля несчастных случаев составляет  $18/40\,000=4,5 \cdot 10^{-5}$ . Тогда при численности 32 000 и 17 случаях –  $5,3 \cdot 10^{-5}$ . Таким образом, при уменьшении абсолютного числа случаев относительная численность возрастает. Это отражается коэффициентом частоты несчастных случаев.

Как следует из статистической отчетности Фонда социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний Луганской Народной Республики за 2018-2020 гг. [2-4] к наиболее травмоопасным отраслям относятся: горнодобывающая промышленность (более 58 % всех случаев), государственное управление (5 %) и деятельность лечебных учреждений (3,75 %). Затем следуют производство чугуна, стали и ферросплавов (более 3 %), комплексное обслуживание объектов (2,5 %). Доля других видов экономической деятельности составляет более четверти всех несчастных случаев.

Распределение количества страховых несчастных случаев, произошедших за 2018-2020 гг. в процентном выражении, исходя из степени тяжести последствий, приведено на рисунке 1.

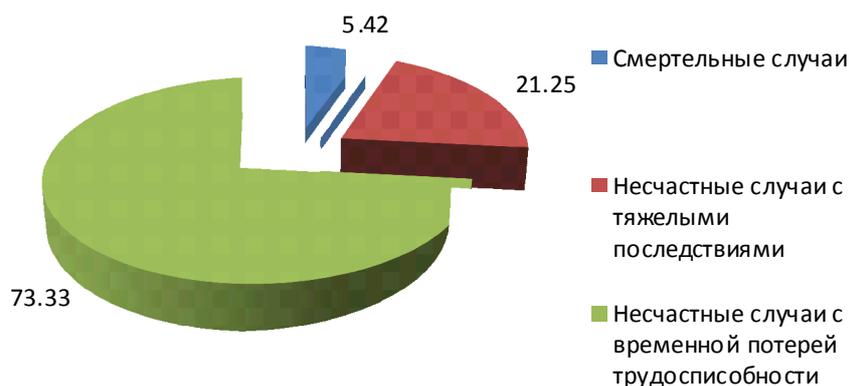


Рисунок 1 — Распределение несчастных случаев за 2018-2020 гг. по степени тяжести

Распределение количества страховых несчастных случаев, произошедших за 2018-2020 гг. в процентном выражении, исходя из установленной группы причин, приведено на рисунке 2.

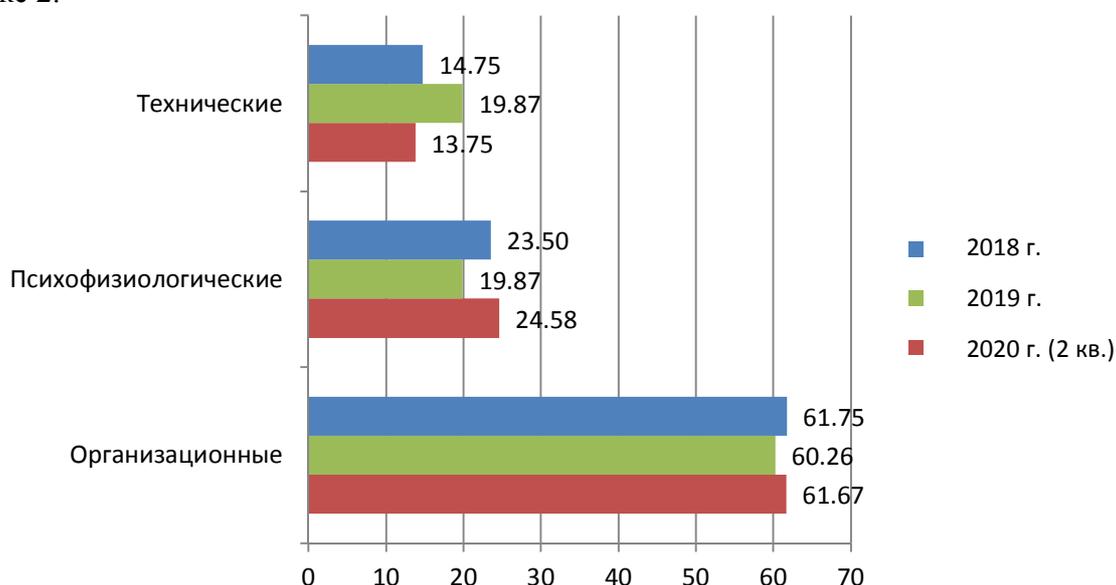


Рисунок 2 — Распределение несчастных случаев по группам за 2018-2020 гг.

Несмотря на колебания значений числа случаев внутри группы общая тенденция остается постоянной – преобладающими являются организационные причины. Их доля в общем числе случаев составляет около 60 %. На втором месте – психофизиологические – более 20 %, на третьем – технические (в среднем более 16 %). В Российской Федерации ситуация несколько иная – на втором месте находятся технические причины несчастных случаев, а на третьем – психофизиологические [5], что говорит о влиянии в т. ч. «военного фактора» в виде обстрелов или их угрозы, социально-экономической обстановки, которые накладывают отпечаток на психологическую устойчивость работников.

Таким образом, преобладающим фактором производственного травматизма в ЛНР и РФ является организационный – в среднем более 60 %, что говорит о необходимости не только нормативными методами формировать культуру в сфере охраны труда и промышленной безопасности, а в большей степени перенести работу «на места», т. е. в непосредственной близости объекта управления охраной труда.

### Библиографический список

1. Зеркалов, Д. В. Безопасность труда в сфере охраны здоровья : справочное пособие. / Д. В. Зеркалов. – [Электронный ресурс] – Электрон. данные. – К.: Основа, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. требования: Pentium; 512 Mb RAM; Windows 98/2000/XP; Acrobat Reader 7.0. – Название с титульного экрана.
2. Анализ травматизма на предприятиях страхователей Луганской Народной Республики за 2018 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fsnslnr.su/docs/exp/Analiz20travm20za202018.pdf>.
3. Анализ травматизма на предприятиях страхователей Луганской Народной Республики за 2019 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fsnslnr.su/docs/exp/Analiz20travm20za202019.pdf>.
4. Анализ травматизма на предприятиях страхователей Луганской Народной Республики за первое полугодие 2020 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fsnslnr.su/docs/exp/Analiz20travm20za202020.pdf>.
5. Князьков, О. В. Исследование превалирующих факторов производственного травматизма промышленных предприятий : научно-технический отчет / О. В. Князьков, А. Т. Чернов, А. Г. Макаревич [и др.]. – Алчевск, 2020. – 92 с.

*ассистент Спорняк В. Г.,  
к.т.н., проф. Левченко Э. П.,  
к.т.н., доц. Левченко О. А.,  
Куценко Е. В.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ РЕЖУЩЕ-УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

В современных условиях обеспечения всесторонних процессов жизнедеятельности человека особую роль занимают процессы связанные с переработкой различных материалов, служащих сырьевой составляющей для всех отраслей промышленности. Так как основной рабочей силой все еще является человек, особую роль уделяется производству продуктов питания с точки зрения обеспечения их потребительской ценности, пищевого разнообразия и наполненности полезными ценными компонентами, особенно белками животного происхождения.

С учетом выпускаемого машиностроительной отраслью большого разнообразия дробильно-измельчительного оборудования по переработке зерновых сельскохозяйственных культур для получения ценных и сбалансированных кормов в животноводства компоновочные решения данной техники пока в своем подавляющем большинстве отражают традиционные конструкторские решения. Главным и общим недостатком такого подхода является повышенная энергоемкость процесса диспергирования материалов, что связано со специализированным назначением и применением изготавливаемых машин. Это непосредственно сказывается на некотором увеличении металлоемкости и затратах электроэнергии.

Однако в настоящее время все большее развитие и применение находят отдельные классы оперативно перенастраиваемых дробильно-измельчительных машин, выполненных по модульному принципу и по сути способные выполнять различные наиболее актуальные функции с учетом широкого типа перерабатываемых материалов и их свойств.

Одним из таких устройств является новая схема обеспечения двухстадийного процесса измельчения при вертикальном исполнении конструкции рабочей камеры машины (рис. 1), сочетающей в себе одновременно режущие и ударные воздействия рабочих органов на сырьевые компоненты, что гарантирует сокращение энергозатрат и металлоемкости [0, 2, 3], а, следовательно, снижения себестоимости продукции.

Основные характеристики данного и близких к нему сравниваемых устройств приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 — Удельная энергоёмкость сравниваемых измельчителей

Модели измельчителей	Производительность, кг/ч	Мощность, кВт	Удельная энергоемкость, кВт/кг
ДЗГ-Г-350×63-1	300	1,5	0,005
ИУ-Ф-10	2500	37,0	0,015
КДУ-2,0	2000	30,0	0,015
Предлагаемая модель	1000	3,00	0,003

Из анализа параметров приведенных в таблице 1 видно, что предлагаемая модель характеризуется значительно высшими технико-экономическими показателями. Так, например, что касается затрат электроэнергии, то их экономия может достигать от 1,5 до 34 кВт на одну тонну перерабатываемого продукта. С учетом известной устойчивой тенденции накопления углекислого газа в атмосфере Земли, как основополагающего фактора, приводящего к глобальному потеплению (рис. 2) [4], актуальным является все большее применение технологий, обеспечивающих минимальные энергозатраты, так как процессы получения электричества напрямую связаны со сжиганием углеродных видов топлива.

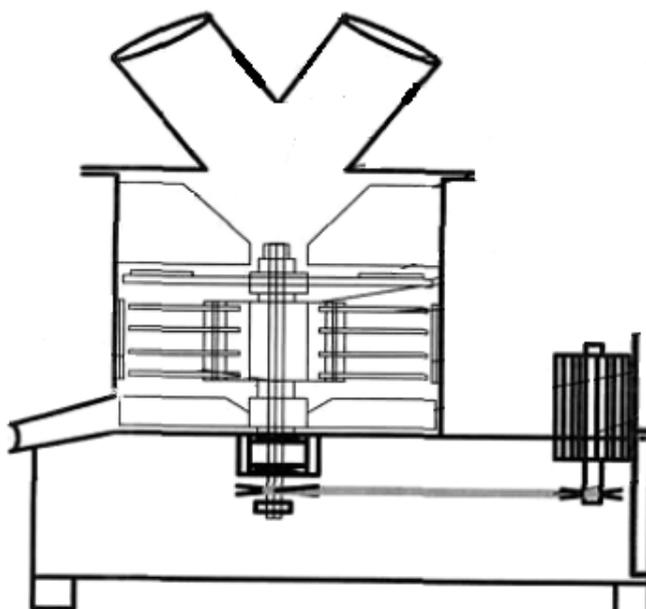


Рисунок 1 — Кинематическая схема двухстадийного модульного измельчителя режуще-ударного действия

Следовательно любая экономия электричества обеспечивает снижение выбросов парниковых газов (табл. 2) [5].

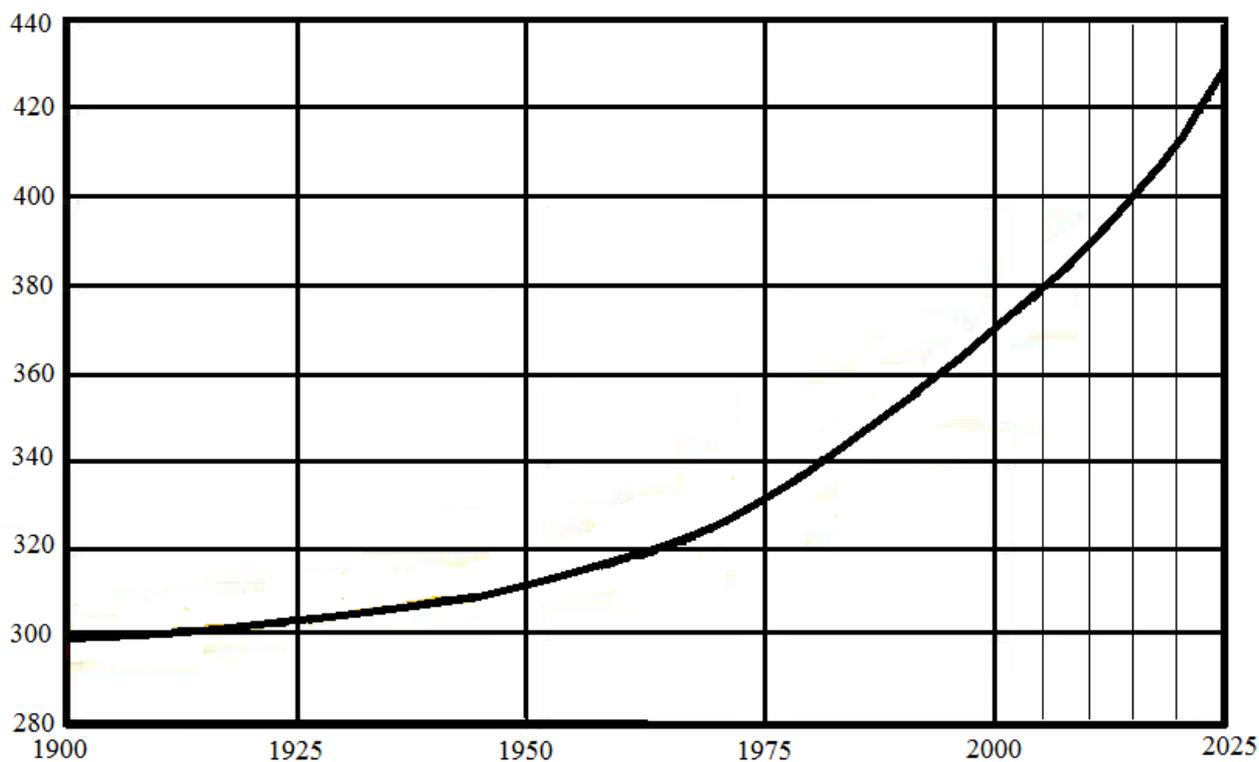


Рисунок 2 — Зависимость накопления углекислого газа в атмосфере Земли (частей на миллион по годам)

Вырабатывающие электричество при сжигании угля современные электростанции при КПД до 47 % для производства 1 кВтч электроэнергии в среднем сжигают около 270 г угля, выбрасывая в атмосферу 700 г углекислого газа [6].

Таблица 2 — Удельные показатели расхода электроэнергии

Вид промышленности	Производство	Единица измерения измерения продукции	Удельный расход электроэнергии на единицу продукции, кВт ч	
			min	max
Топливная промышленность	Каменного угля закрытая	1 т угля	35	70
Топливная промышленность	Каменного угля открытая	1 т угля	7	8
Топливная промышленность	Бурого угля закрытая	1 т угля	10	15
Топливная промышленность	Обогащение угля	1 т угля	5	10
Топливная промышленность	Брикетирование угля	1 т брикетов	15	40
Топливная промышленность	Коксование	1 т кокса	8	10
Топливная промышленность	Фрезерного кокса	1 т	1	5

Таким образом, внедрение нового предлагаемого двухстадийного модульного измельчителя например, в животноводстве обеспечивает при средней экономии электроэнергии 17,75 кВтч обеспечивает сокращение потребления угля около 5 кг за 1 час работы на одно устройство при сокращении выбросов углекислого газа до 12,4 кг в час.

С учетом того, что, например, только в 2018 г. в Российской Федерации было произведено 28,9 млн т. кормов, оценочное сокращение объемов выбросов углекислого газа только за счет экономии электроэнергии на измельчение зерновых культур может быть достигнуто на уровне 0,360 млн тонн [7].

Широкое же внедрение подобной техники в массовых масштабах и ее обоснованное применение создает эффективный задел в деле борьбы с мировым потеплением климата и вытекающими из этого глобальными последствиями.

### Библиографический список

1. Спорняк, В. Г. Обоснование основных параметров вертикального режуще-ударного измельчителя [Текст] / В. Г. Спорняк, Э. П. Левченко, О. А. Левченко и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 58. – С. 99–105.
2. Спорняк, В. Г. Направления перспективного использования двухступенчатого малогабаритного универсального измельчителя [Текст] / В. Г. Спорняк, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 60. – С. 113–118.
3. Декларационный патент № 16438 Украина, МКИ<sup>6</sup> В 02 С 13/14. Двухступенчатый измельчитель кочанов кукурузы/ Брагинец Н. В., Спорняк В. Г.; – № 200600693; заявл. 26.01.06; опубл. 01.08.06; Бюл. № 8.
4. Кабанова, М. А. Влияние развития ветроэнергетики на решение мировой проблемы глобального потепления климата [Текст] / Кабанова М. А., Левченко Э. П. / Сборник научных работ студентов ДонГТУ. Вып. 11. Ч.1. Алчевск: ДонГТУ, 2018. – С. 417 – 423.
5. Удельные показатели расхода электроэнергии на единицу продукции в промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.online-electric.ru/dbase/wud.php>.
6. Бережливая генерация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/1234982>.

## СЕКЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 626.16.06

*к.т.н., доц. Чебан В. Г.,  
магистр Черненко А. А.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОЧИСТИТЕЛЯ

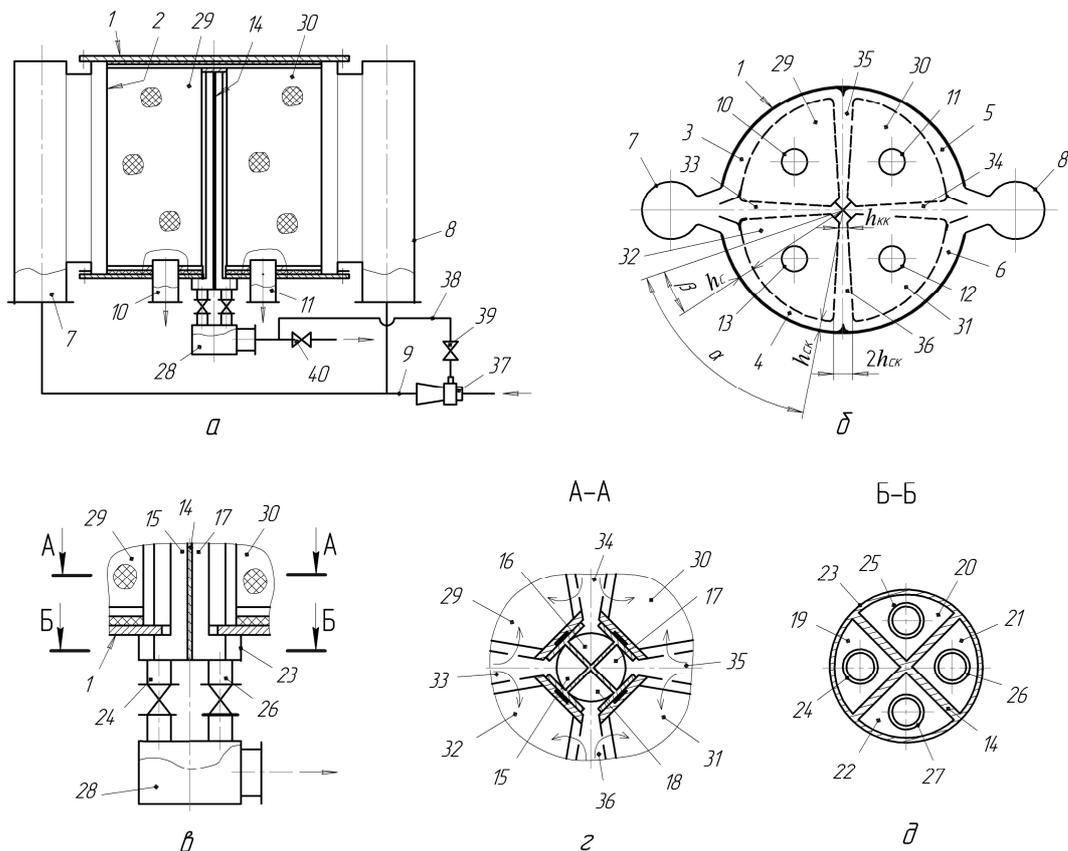
Гидродинамическая очистка жидкостей от твердых загрязнений с каждым годом укрепляет свое лидирующее положение. Особенно очевидным это стало после массового внедрения в последние годы 20-го столетия [1] мембранного разделения жидкостей на фильтрат и концентрат в выносных напорных аппаратах, для осуществления которого требуется специальная подготовка разделяемой жидкости. Для этой цели на практике используются различные способы и средства, но при этом не заслуженно мало уделяется внимания именно гидродинамическим очистителям тонкой очистки жидкости. Поэтому и возникла актуальная задача, направленная на совершенствование конструкции гидродинамических очистителей, в результате применения которой они стали бы более высокопроизводительными, а, следовательно, и конкурентоспособными [2].

Исследования показали, что достижение наибольшей производительности только за счет мер, направленных на увеличение площади проницаемой поверхности без одновременного увеличения габаритов очистителя, является недостаточным, так как при этом возникают проблемы в настройке режима работы очистителя. Но оказалось, что такой недостаток легко устраним.

Анализ последних разработок показал, что имеющие в них место подходы по усовершенствованию конструкции очистителя данного типа оправдывают себя, но при этом следует также обратить внимание и на улучшение конструкции с точки зрения ее изготовления. Известно, что лучшие результаты работы очистителя достигаются тогда, когда очистка происходит в серповидных напорных каналах, для получения которых внутренний проницаемый цилиндр располагают в наружном с эксцентриситетом. Поэтому, даже при значительных производительностях очистителя зазор в этом месте, образованный наружной поверхностью внутреннего проницаемого цилиндра и внутренней поверхностью наружного цилиндра, становится определяющим, как в простоте конструкции, так и в возможности создания очистителя вообще по заданным исходным данным заказчика. Объясняется это тем, что не всегда возможно конструктивно получить рациональное значение его ширины, что с одной стороны повышает потери жидкости со сливом, а с другой – снижает производительность очистителя. Кроме того, эксцентричное расположение внутреннего цилиндра по отношению к наружному значительно усложняет конструкцию и изготовление дна и крышки наружного цилиндра, т. е. корпуса очистителя, а, следовательно, резко повышает стоимость такого очистителя.

Результатом наших исследований стала новая конструкция высокопроизводительного гидродинамического очистителя, представленного на рисунке 1. Очиститель содержит вертикальный цилиндрический корпус 1 правильной формы и фильтроэлемент 2, установленный в нем коаксиально. При этом круговая поверхность корпуса 1 и дугообразные поверхности фильтроэлемента 2 образуют основные 3 и 4 и дополнительные 5 и 6 серпообразные напорные каналы.

Основной 7 и дополнительный 8 подводящие патрубки корпуса 1 расположены на диаметрально противоположных боках его цилиндра и соединены на входе с подводящим коллектором 9. Отводящие патрубки 10-13 подсоединены к его нижнему торцу и соединены с отводящим коллектором фильтрата (на рисунке не показано). Сливной патрубок 14 закреплен к нижнему торцу корпуса 1 и расположен в его центре.



*а* – вертикальный разрез; *б* – поперечный разрез; *в* – узел слива концентрата; *г* – разрез А-А; *д* – разрез Б-Б

Рисунок 1 — Высокпроизводительный гидродинамический очиститель

Его входной конец направлен вдоль вертикальной оси корпуса на всю высоту фильтроэлемента 2. Данный патрубок выполнен в виде четырехканального и квадратного в сечении трубопровода с открытыми для входа жидкости углами и осевыми перегородками в середине, образующими вертикальные сливные каналы 15-18. Все эти каналы через соответствующие полости 19-22 промежуточной емкости 23, также присоединенной к торцу корпуса 1, и ее патрубки 24-27 с регулирующими дросселями сообщены со сливным коллектором 28 концентрата. Фильтроэлемент 2 включает четыре приемные камеры 29-32 фильтрата. Каждая из них имеет одну дугообразную и две плоские проницаемые поверхности, при этом дугообразные поверхности вместе с боковой внутренней поверхностью корпуса 1 образуют серповидные напорные каналы 3-6, а плоские поверхности попарно образуют продольные 33 и 34 и поперечные 35 и 36 щелевые напорные каналы. При этом продольные каналы 33 и 34 своими выходами сообщены со сливными каналами 15 и 17 сливного патрубка 14, соответственно, а входами – с основным 7 и дополнительным 8 подводящими патрубками, соответственно. Поперечные каналы 35 и 36 своими выходами сообщены со сливными каналами 16 и 18 сливного патрубка 14, соответственно, а входами через серповидные напорные каналы 3 и 4 и 5 и 6 – с основным 7 и дополнительным 8 подводящими патрубками, соответственно. Известно, что для достижения наилучших условий очистки жидкости в напорных каналах, средняя скорость ее вдоль них должна быть одинаковой и не меньше определенного заранее значения. Равномерность скорости возможна, если напорные каналы 3-6 и 33-36 постоянной высоты будут иметь линейно уменьшающуюся в направлении движения жидкости в них ширину. Поэтому, щелевые напорные каналы 33-36 в плане (рис. 1, *б*) выполнены клинообразными в сторону сливного патрубка 14, а серповидные напорные каналы 3 – 6 от входа к выходу из них выполнены с линейно уменьшающейся шириной, определяемой по формуле

$$h_c = (1,1 \div 1,5) \cdot d_{\max} \cdot \frac{1}{2 \cdot n_k \cdot n_c} \cdot \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} \cdot (1 - n_c) \right), \text{ м} \quad (1)$$

где  $d_{\max}$  – максимально допустимый диаметр частички загрязнения, м;  $n_k$  – доля сливной части жидкости из клинообразного напорного канала от количества жидкости в его начале;  $n_c$  – доля сливной части жидкости из серповидного напорного канала от количества жидкости в его начале;  $\alpha$  – угол, определяющий длину серповидного канала с линейно уменьшающейся шириной, град;  $\beta$  – угол, изменяющийся от 0 до  $\alpha$  в направлении от начала серповидного канала до его конца и определяющий текущее расположение промежуточного сечения, для которого рассчитывается значение ширины, град.

В формуле (1) все составляющие известны. Одни из них задаются в исходных требованиях на разработку очистителя, а другие устанавливаются разработчиком на основании проведенных исследований и имеющегося опыта проектирования, о чем более подробно изложено в работе [3].

Кроме того, очиститель перед входом в подводящий коллектор 9 дополнительно оборудован эжектором 37, камера пониженного давления которого циркуляционным трубопроводом 38 с дросселем 39 сообщена со сливным коллектором 28, оборудованным на выходе дросселем 40. Наличие дополнительного подводящего патрубка 8 уменьшает вдвое площадь поперечного сечения, как свою, так и основного подводящего патрубка 7, что обеспечивает расположение первого из них без снижения площади боковой поверхности фильтроэлемента 2 за счет уменьшения длины ее непроницаемых участков, расположенных напротив этих патрубков. Расположение сливного патрубка 14 в центре корпуса 1 вместе с наличием дополнительного патрубка 8 обеспечивают коаксиальное расположение фильтроэлемента 2 в корпусе 1, что упрощает изготовление торцевых крышек корпуса очистителя и снижает его стоимость. Выполнение фильтроэлемента 2 в виде четырех приемных камер 29-32 позволяет получить в сравнении с прототипом четыре дополнительные плоские проницаемые поверхности, которые попарно образуют два дополнительных поперечных напорных канала 35 и 36, что обеспечивает значительное повышение производительности очистителя.

Выполнение входа сливного патрубка 14 в виде четырехканального и квадратного в сечении трубопровода с осевыми перегородками в середине позволяет уменьшить в четыре раза количество сливных патрубков, которые отдельно выступали бы в полость корпуса 1. За счет этого удалось увеличить площадь проницаемых боковых поверхностей приемных камер 29-32 и выполнить два дополнительных поперечных напорных канала 35 и 36, наличие которых обеспечивает уменьшение длины всех остальных напорных каналов. Это, в конечном счете, значительно уменьшает потери давления при движении жидкости в них и улучшает условия ее очистки.

Выполнение всех напорных каналов с линейно уменьшающейся от входа к выходу шириной обеспечивает равномерность потока жидкости в них, что дополнительно снижает потери давления и повышает качество фильтрата за счет равномерной фильтрации жидкости по всей проницаемой поверхности приемных камер 29-32. Наличие эжектора 37 с циркуляционным трубопроводом 38 обеспечивает снижение потерь жидкости со сливом, что повышает производительность очистителя по фильтрату.

Таким образом, предложенное усовершенствование высокопроизводительного гидродинамического очистителя жидкости является целесообразным, так как повышает его производительность, обеспечивает стабильную очистку, снижает потери давления и стоимость очистителя. Данные преимущества значительно расширяют возможности эффективного использования такого очистителя в различных отраслях промышленности.

### **Библиографический список**

1. Список внедренных установок по водоподготовке и очистке воды. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.epcs.ru/works>.
2. Чебан В. Г. Повышение конкурентоспособности очистителя жидкости типа «Цилиндр в цилиндре» // Сборник научных трудов ДонГТУ. Вып. 36 – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – С.258–268.
3. Чебан В.Г. Практический расчет фильтроэлемента с грушеобразным профилем фильтрующей поверхности очистителя маловязких жидкостей // Сборник научных трудов ДонГТУ. Вып. 31 – Алчевск: ДонГТУ, 2010. – С.115–126.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Водоснабжение городов Луганской Народной Республики качественной питьевой водой представляет серьезную научную и практическую задачу [1].

Все большее внимание в настоящее время уделяется поиску перспективных, новых, более компактных, дешевых и простых в эксплуатации способов очистки воды. К числу таких способов подготовки питьевой воды относится мембранная очистка.

Интересным направлением в мембранных технологиях, которое получило широкое развитие в Российской Федерации, является ультрафильтрационный способ очистки.

Интерес к этому направлению вызван, прежде всего, неудовлетворительным качеством питьевой воды в населенных пунктах Луганской Народной Республики. Песчаные зернистые фильтры, входящие в состав практически всех станций водоподготовки, часто не в состоянии задержать очень мелкие частички, болезнетворные бактерии и вирусы (обычно и развивающиеся в этих фильтрах), поэтому именно на ультрафильтрационные мембраны «возложили» обязанность доочистки воды.

Ультрафильтрационный способ очистки по сравнению с альтернативными технологиями очистки имеет массу преимуществ [2]:

1. Установки ультрафильтрации не требуют создания высокого рабочего давления (для нормальной работы, необходимо создание давления до 10 атм).

2. Мобильность установок ультрафильтрации позволяет максимально сократить расстояние от системы очистки до потребителя.

3. Площадь, занимаемая установками ультрафильтрации гораздо меньше площади занимаемой известными системами фильтрации аналогичной производственной мощности, соответственно энергозатраты и себестоимость готовой продукции будут в разы ниже при выборе этого способа очистки.

4. Используемые в модулях этих установок ультрафильтрационные мембранные элементы имеют поры размером от 5 нм до 0,1 мкм и, по сути, являются 100 процентным барьером для коллоидных частиц, бактерий и вирусов.

5. При эксплуатации ультрафильтрационных мембран удаление загрязнений с поверхности мембран производится «прямыми и обратными промывками», как у фильтров с зернистой загрузкой, поэтому безреагентная технология ультрафильтрации считается за рубежом технологией будущего.

Стоит отметить также, что широкое распространение ультрафильтрационный способ очистки получил и на промышленных предприятиях, так как они являются огромными потребителями технической воды. Для примера, как известно, на ФИЛИАЛЕ № 12 ЗАО «ВТС», в структурном подразделении «ЭкоЭнергия» предочистка воды для работы паро-газовой турбины электростанции мощностью 303 МВт осуществляется непосредственно установками ультрафильтрации [3].

Применение малогабаритных мембранных установок непосредственно вблизи потребителей значительно повысит качество водоснабжения городов Луганской Народной Республики.

### Библиографический список

1. Программа «НАШ ВЫБОР» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://lug-info.com/news/one/lnr-po-programme-nash-vybor-pro-vedet-masshtabnyi-remont-sistem-vodosnabzheniya-pasechnik-35118>.
2. Тумин, А. Н. Анализ существующих ультрафильтрационных методов очистки воды / А. Н. Тумин, В. Г. Чебан // Сб. научн. тр. ДГМИ (ДонГТУ) Вып. 39 – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – С. 116–124.
3. Тумин, А. Н. Образование слоя осадка и его влияние на снижение производительности ультрафильтрационного модуля // Технологический аудит и резервы производства – 2014. – № 3/5 (17). С.53 – 55.

## СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

Мембранные технологии представляют собой новые наукоемкие перспективные технологии, ориентированные на активное практическое использование в XXI веке.

Известно, что при работе ультрафильтрационного модуля происходит постепенное снижение его производительности, обусловленное загрязнением мембранного элемента, образовавшимися на поверхности отложениями малорастворимых солей и микрочастиц (концентрационная поляризация). Концентрационная поляризация – это важное явление, которое оказывает существенное влияние на снижение производительности в ультрафильтрационных мембранных модулях. Особенно это явление наблюдается при нарушении расчетного режима эксплуатации ультрафильтрационного мембранного модуля или систем предочистки. Одним из основных факторов оказывающим влияние на загрязнение поверхности ультрафильтрационного мембранного элемента является гидродинамическая характеристика потока в его напорном канале [1 – 2].

На данный момент существуют такие способы снижения влияния концентрационной поляризации: турбулизация потока жидкости в напорном канале мембранного элемента, применение турбулизирующих вставок, повышение температуры очищаемой жидкости.

Так же, концентрационную поляризацию можно снизить, создав пульсирующий поток в напорном канале мембранного элемента. Некоторые эксперименты показывают, что при частоте пульсации 1 Гц проницаемость трубчатых ультрафильтрационных мембранных модулей увеличилась на 70 % [3]. Для такого увеличения производительности ультрафильтрационных мембран при стационарном режиме движения жидкости необходимо повышение скорости потока жидкости в напорном канале мембранного элемента примерно в 6 раз. Особенность пульсирующего потока состоит в том, что при достаточно большой частоте пульсации максимальная скорость потока очищаемой жидкости находится не на оси напорного канала ультрафильтрационного мембранного элемента, а в пристенных (на поверхности мембраны) слоях очищаемой жидкости.

С повышением температуры очищаемой жидкости уменьшается её вязкость, увеличивается коэффициент диффузии растворенного вещества, и, как следствие, снижается концентрационная поляризация. Однако следует учитывать то, что повышение температуры очищаемой жидкости сокращает срок службы полимерных мембран, а на нагрев очищаемой жидкости расходуется дополнительная энергия [3].

Применение турбулизирующих вставок приводит к значительному увеличению проницаемости ультрафильтрационных мембран, снижению скорости подачи очищаемой жидкости, уменьшению рабочего давления, снижению концентрационной поляризации. Как правило, эти вставки состоят из центрального опорного стержня, на котором закреплены диски, лопасти, шары или различные проволочные спирали. Так, спиральные вставки, изготовленные из проволоки разного диаметра, позволяют на 50 % снизить скорость подачи разделяемой смеси и на 35 % уменьшить рабочее давление [3]. Однако применение турбулизирующих вставок снижает рабочую поверхность ультрафильтрационных мембран на 15-20 % и значительно увеличивает гидравлическое сопротивление потоку очищаемой жидкости.

Создание развитого турбулентного режима движения очищаемой жидкости в напорном канале ультрафильтрационного мембранного модуля приводит к увеличению проницаемости и селективности ультрафильтрационной мембраны, вследствие снижения концентрации рас-

творённых веществ в пограничном слое. Однако для создания турбулентного режима необходимо прокачивать жидкость в напорном канале мембранного элемента со скоростью 3-5 м/с, что влечет за собой перерасход энергии на циркуляцию.

Проанализировав выше сказанное, можно выделить два основных способа снижения влияния концентрационной поляризации при ультрафильтрации: регулирование величины удельной производительности и изменение коэффициента массопереноса, а выбор того или иного способа в конечном итоге будет влиять на себестоимость полученного в процессе фильтрации продукта.

### **Библиографический список**

1. Тумин, А. Н. Образование слоя осадка и его влияние на снижение производительности ультрафильтрационного модуля // Технологический аудит и резервы производства – 2014. – № 3/5 (17). С.53 – 55.

2. Тумин, А. Н. Теоретическое исследование процесса образования и разрушения слоя осадка с поверхности ультрафильтрационной мембраны // ВОДА и ЭКОЛОГИЯ – 2015. – №2. С. 49 – 56.

3. Дытнерский, Ю. И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1986. – 272 с. – (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПОДВЕСКИ

В настоящее время предъявляются высокие требования к безопасности и комфортабельности автотранспорта. Традиционно конструирование автомобильной подвески связано с компромиссом между тремя противоречащими между собой основными критериями: управляемостью автомобиля в целом, устойчивостью и комфортом пассажиров. Автомобильная подвеска обязана «помогать» автомобилю, производить «поддержку» при маневрировании и максимально «изолировать» пассажиров от влияния дорожных неровностей.

Уже давно предпринимались попытки конструирования подвесок, которые позволяли бы управлять их характеристиками вручную или автоматически [1 – 2].

В настоящей работе рассматривается модель вертикального перемещения автомобиля. Объектом исследования является гидропневматическая подвеска, которая меняет собственный дорожный просвет за счет аккумулятора (рис. 1). Показанный на рисунке 1 гидроаккумулятор используется в качестве элемента подвески, заменяющий механические пружины автомобиля.

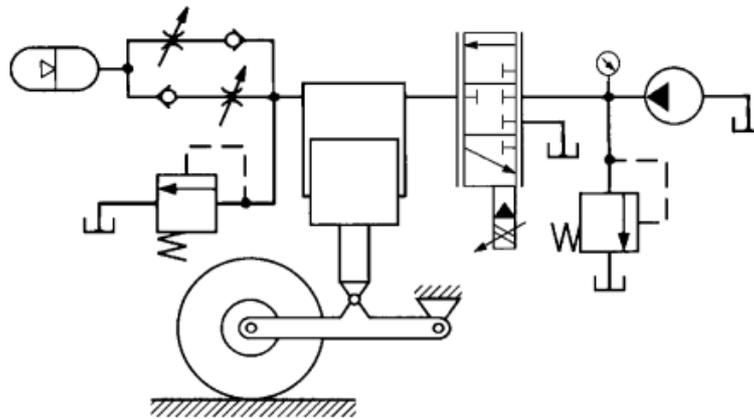


Рисунок 1 — Гидропневматическая система подвески колес автомобиля

Задачей исследований является демпфирование колебаний автомобильной подвески с целью выбора наилучшей стратегии ее управления. С помощью известных подходов в теории автоматического управления выполнен анализ работы подвески в частотной области.

На основе второго закона Ньютона [3] динамика подвески по вертикальному смещению для одного колеса (четвертинная модель) описывается следующими уравнениями

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= -k_1(x - r) - k_2(x_1 - x_2) - b_2 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= -k_2(x_1 - x_2) - b_2 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right). \end{aligned}$$

где  $x_1$  – перемещение колеса и стойки;  $x_2$  – перемещение кузова автомобиля;  $k_1$  – жесткость покрышки, 190000 Н/м;  $k_2$  – жесткость гидравлической пружины, Н/м;  $b_2$  – демпфер,

$1000 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$ ;  $m_1$  – масса колеса и стойки, 28 кг;  $m_2$  – масса кузова автомобиля, 345 кг;  $r$  – возмущение (неровности дорожного покрытия).

В результате расчета в программе MATLAB были получены частотные характеристики четвертинной модели подвески автомобиля (рис. 2)

Анализ частотных характеристик показывает, что модель с малым объемом аккумулятора ( $V_0 = 1 \text{ дм}^3$ ) обладает меньшей чувствительностью (–92 дБ) к возмущениям на низких частотах в диапазоне от 0 до 1 рад/с (рис. 2). Однако на средних частотах от 1 рад/с до 11 рад/с (что соответствует большой скорости движения автомобиля по неровной поверхности) проявляется явление резонанса. Амплитуда колебаний подвески и автомобиля увеличивается почти в 4,5 раза (или на 13 дБ).

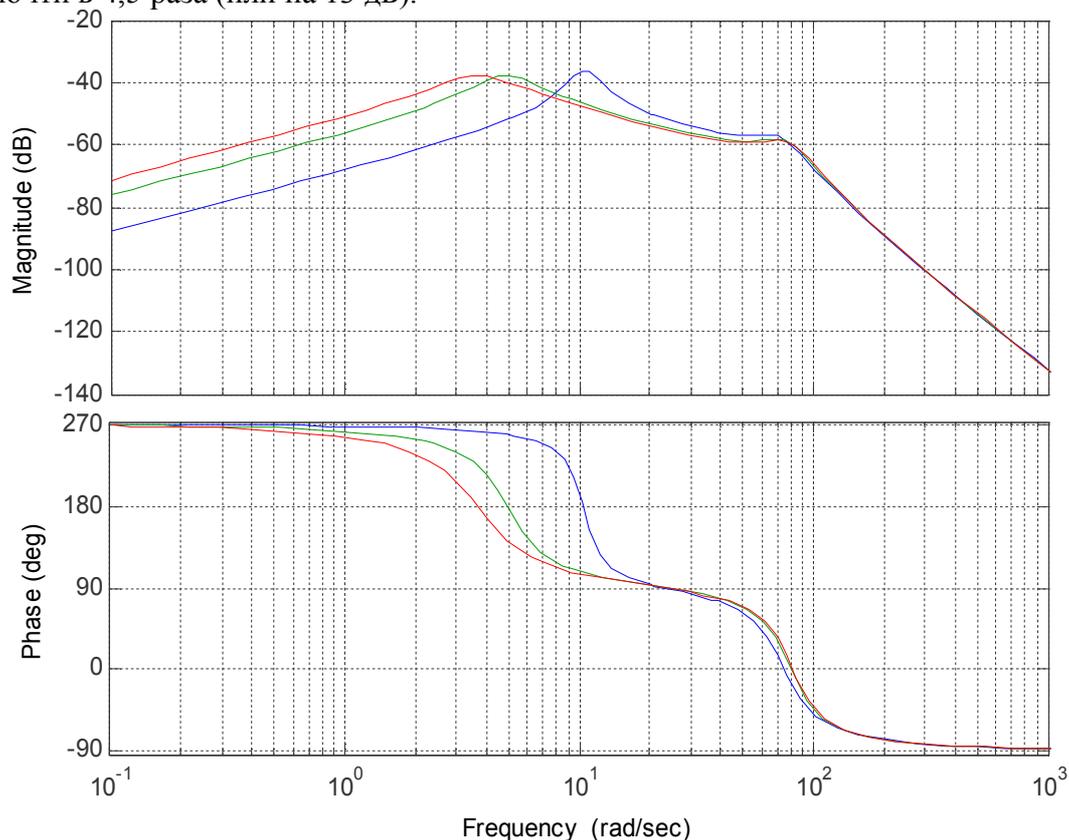


Рисунок 2 — Графики частотных характеристик изменения положения кузова автомобиля относительно возмущения  $r$

Такое явление может привести к потере устойчивого движения автомобиля и работоспособности подвески в целом. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что преодолеть неровности дорожного покрытия необходимо при малых скоростях перемещения автомобиля, чтобы не вызывать резонансных явлений в подвеске.

### Библиографический список

1. H. Imine, Y. Delanne, N.K. M'Sirdi. Road profile input estimation in vehicle dynamics simulation // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2006, 44:4, P. 285–303.
2. Simulation And Analysis Of Passive And Active Suspension System Using Quarter Car Model For Non Uniform Road Profile // Abdolvahab Agharkakli, Chavan U. S. Dr. Phvithran S. / International Journal of Engineering Vol. 2, Issue 5, September – October 2012, pp.900–906.
3. Второй закон Ньютона [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.eduspb.com/node/1723>.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАРЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ ВСАСЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА  
ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
РЕЗОНАНСНО-АКУСТИЧЕСКОГО НАДДУВА

Влиянию колебаний давления на производительность поршневых машин посвящено много работ [1 – 2], однако достоверных сведений о влиянии колебаний давления на потери энергии при всасывании в резонансных режимах пока не имеется, что ограничивает применение резонансно-акустического наддува на действующих и проектируемых компрессорах [2]. Явление снижения удельной мощности в резонансной области всасывающей системы объясняется тем, что при переходе системы через резонанс происходит сдвиг фазы колебания на  $90^\circ$  [2], в результате чего происходит не только перераспределение давления по ходу поршня, но и, как показали расчеты, уменьшаются затраты мощности на всасывание.

На экспериментально полученном графике зависимости затрат мощности при всасывании в компрессоре ВП-50/8М (рис. 1) видно, что затраты мощности в резонансной зоне (6,2 кВт) значительно меньше затрат в режиме резонанса (17 кВт), т. е. снижение в 2,74 раза.

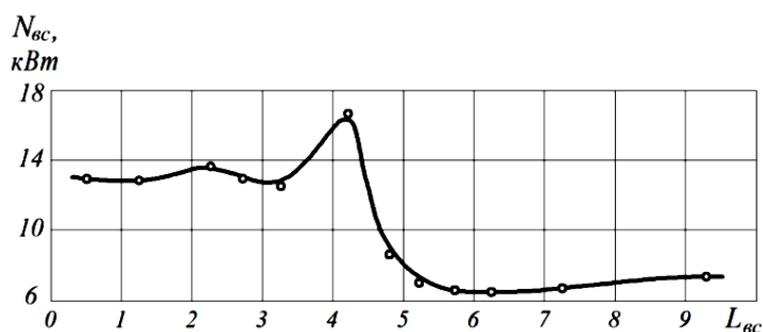


Рисунок 1 — Влияние длины  $L_{вс}$  всасывающего трубопровода компрессора ВП-50/8М на потери мощности на всасывание  $N_{ном.вс}$  при использовании кольцевых клапанов

Анализ индикаторных диаграмм показал, что наполнение цилиндра воздухом в резонансной зоне продолжается при обратном движении поршня, так как самодействующие всасывающие клапаны при сдвиге фазы колебания давления относительно мертвых точек не могут закрыться из-за нарастающего давления в акустической волне (рис. 2).

Это явление способствует наполнению цилиндра воздухом, увеличивая дополнительно производительность компрессора, что отражается на удельной мощности. Подобное явление имеет место для всех испытанных компрессоров.

Расчеты показывают, что затраты работы компрессора при всасывании в случае сдвига фазы колебания (площадь заштрихованной области  $B-C-D-B$  на рисунке 2) составят:

$$\Delta L_{вс} = 0,333AV_n, \text{ Дж},$$

где  $A$  – амплитуда колебания давления;  $V_n$  – объем, описываемый поршнем.

В случае отсутствия сдвига фазы колебания, затраты работы будут в 1,77 раза больше.

Аналитические и экспериментальные исследования показали, что сдвиг фазы колебаний давления во всасывающей системе при резонансе 2-й гармоники приводит к уменьшению затрат энергии в процессе всасывания, что отражается на снижении удельной мощности компрессора. Зарезонансная зона явилась наиболее экономичной по затратам энергии.

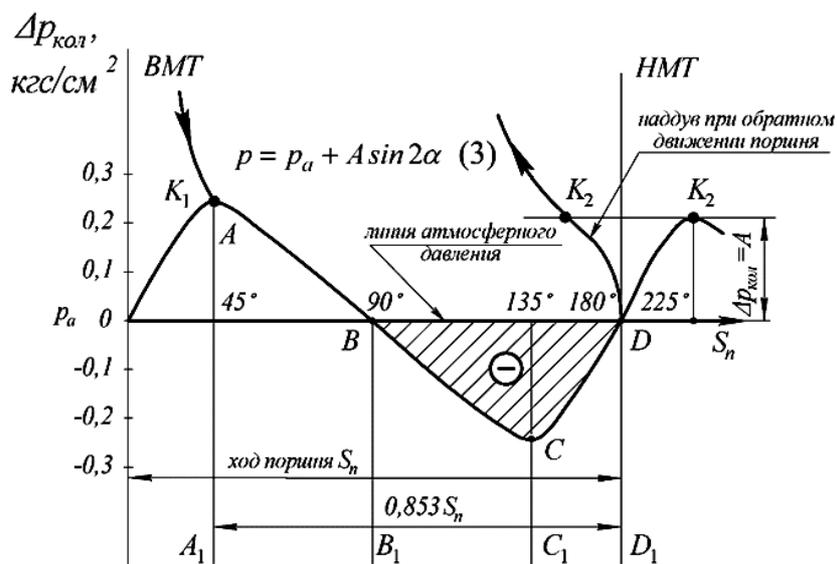


Рисунок 2 — Процесс всасывания при резонансе 2-й гармоники колебаний давления со сдвигом фазы

Направлением дальнейших исследований является анализ влияния резонансных колебаний давлений на потери энергии при всасывании с учетом сопротивления всасывающих клапанов, а также получение резонансно-акустических характеристик с целью внедрения на их основе оптимальных режимов в действующих и проектируемых поршневых воздушных и газовых компрессорах.

### Библиографический список

1. Френкель, М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования [Текст] / М. И. Френкель. – Л.: Машиностроение, 1969. – 743 с.
2. Пластинин, П. И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет [Текст] / П. И. Пластинин. – М.: Колос, 2000. – 456 с.

## СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ

В настоящее время в России и за рубежом разработан и используется на действующих и проектируемых МНЛЗ ряд модификаций систем автоматической стабилизации уровня металла в кристаллизаторе с воздействием на стопор промежуточной емкости. По своей структуре эти системы довольно схожи и отличаются они лишь особенностями аппаратного выполнения [1]. В подавляющем большинстве в структуре этих систем используется гидравлический исполнительный механизм (ГИМ), который регулирует положение стопорного клапана.

Традиционно система управления ГИМ выполняется по схеме «золотник – гидроцилиндр». Функциональная схема системы управления стопорным механизмом представлена на рисунке 1.

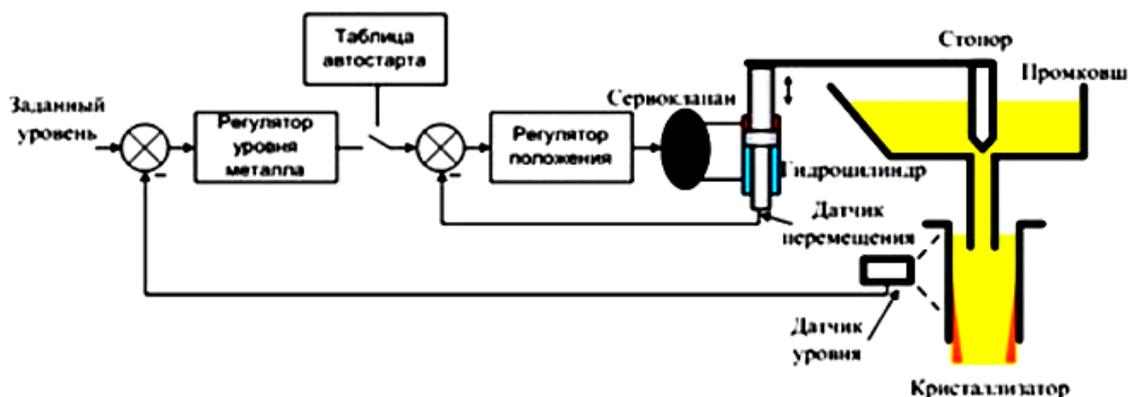


Рисунок 1 — Функциональная схема системы управления

Система состоит из двух контуров регулирования: внутреннего контура регулирования положения стопора и контура регулирования уровня металла в кристаллизаторе. Информация о положении стопора снимается с датчика линейного перемещения штока цилиндра, а сигнал об уровне металла в кристаллизаторе поступает от изотопного датчика.

При всех достоинствах использования ГИМ, такая система имеет и ряд недостатков выраженных в:

- повышенном требовании к качеству жидкости из-за чувствительности золотника к загрязнениям;
- утечках через щели золотника;
- наличие нелинейностей типа сухого трения и насыщение.

Кроме этих ограничений системы регулирования также ограничиваются минимальными перемещениями ГИМ. Минимальные перемещения ГИМ часто связываются с эффектами трения, когда исполнительный элемент (золотник) – заливает. Если исполнительный механизм находится в таком состоянии, интегральные составляющие (и у объекта, и у регулятора) будут накапливать выходную величину, пока не сформируется достаточное усилие, чтобы преодолеть статическое трение. Обычно проявляется эта проблема с возникновением ав-

токолебаний, так например, исполнительный элемент – золотник проходит цикл: залипания, перемещения, залипания и т. д.

Еще одним существенным недостатком является потеря мощности (до 50%) вследствие дросселирования золотником потока рабочей жидкости.

Пропорциональное положение или регулирование скорости гидравлических приводов представляет собой сложную проблему из-за плохой доступности золотников, а также их дорогостоящести при наличии интегрированной электроники [2]. Высокая цена частично вызвана небольшим количеством производимых золотников, а также из-за особых требований, вызванных спецификой характеристик рабочей жидкости (износ и коррозия, сопротивление, жесткие допуски и т. д.).

С экономической точки зрения предпочтительными, на наш взгляд, являются дискретные двухлинейные-двухпозиционные или, как еще их называют, двухходовые (2/2) распределители имеющие всего два состояния – включен и выключен. Данные распределители представляют собой интересную альтернативу сервоклапанам и пропорциональным клапанам из-за более низкой стоимости, высокой надежности и меньшей чувствительности к загрязнениям рабочей жидкости.

Одним из способов достижения пропорциональности потока с помощью двухходовых клапанов работающих в режиме быстрого включения/выключения, это использование импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) сигнала управления [3]. При подключении клапанов параллельно друг другу, обеспечивается ступенчатое регулирование потока. Если пропускная способность клапанов находится в соотношениях 1: 2: 4: 8: 16 и т. д., можно достичь  $2N$  шагов потока с  $N$  клапанами. Такие наборы двухходовых клапанов называются дискретными блоками управления расходом (ДБУР) [4].

Независимо от кодировки ДБУР имеет две комбинации величины площади открытия, состояний ДБУР. Таким образом, общая схема системы управления положением стопорного клапана будет иметь вид, приведенный на рисунке 2.

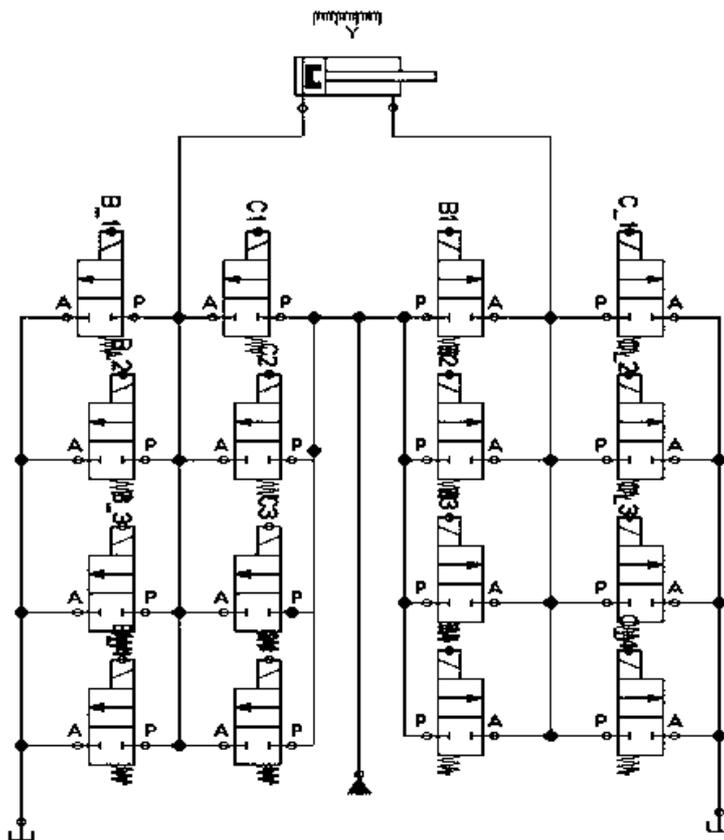


Рисунок 2 — Схема управление гидроцилиндром с помощью ДБУР

По результатам математического моделирования, был проведен сравнительный анализ переходных процессов в системах управления уровнем металла в кристаллизаторе с «традиционным» аппаратным исполнением и с использованием ДБУР, который показал преимущества предлагаемой реализации системы в точности позиционирования стопорного клапана, его перемещения с большим быстродействием, отсутствием колебаний давления и утечек в гидросистеме.

Важными преимуществами применения ДБУР является то, что хорошие результаты в управлении могут быть достигнуты даже при использовании довольно «медленных» 2/2 распределителей и при этом отсутствии необходимости в их непрерывном высокочастотном переключении.

### **Библиографический список**

1. Столяров А. М. Селиванов В. Н. Непрерывная разливка стали – Магнитогорск : МГТУ, 2007. – 154 с.
2. Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок / Цупрун А. Ю., Кубкин Д. А., Редько Г. А., Колоколов А. В., Онух Д. А. Пильгаев В. М. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>
- 3 Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
4. Linjama M. Digital fluid power – state of the art In Proceedings of the 12th Scandinavian international conference on fluid power, SICFP' 11, Tampere, Finland, 18–20 May 2011, pp.331–353.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Сложно переоценить значимость регулируемых электроприводов и в то же время их долю в энергобалансе отдельно взятого, например, металлургического предприятия, что более ощутимо в масштабах любой металлургической компании или государства с развитой промышленной политикой. Учитывая, что даже в США на 2019 год при производстве электроэнергии в никуда расходуется около 65,4 % затраченных на это энергоресурсов в силу несовершенства и дешевизны отдельно взятых технологий преобразования энергии, а из оставшейся доли совместно с отдаваемыми в промышленность, населению и коммерческим организациям энергоресурсами – 43,9 % невозможные потери, более чем актуальными оказываются вопросы их рационального потребления. Очевидно, объём потреблённой электроэнергии в энергоёмких установках напрямую зависит и от качества управления динамикой приводимых в движение машин и механизмов.

Впервые представлены алгоритмы оптимизации времени  $\Delta t$  протекания тока  $I$ , установившейся скорости движения  $V_y$  и формы тахограммы скорости во времени  $V(t)$  при отработке позиционным электроприводом заданных перемещений  $s_i, i = \overline{1, n}$ . Показано, что потери энергии при отработке одного и того же заданного перемещения в пуско-тормозных режимах могут быть снижены на величину, пропорциональную кубу отношения допустимых времён  $(\Delta t_2 / \Delta t_1)^3$ . Так, например, если по технологии допустимо  $\Delta t_2 = 2\Delta t_1$ , потери в динамических режимах позиционного электропривода будут снижены в 8 раз! Это положение и является определяющим для возможности энергосбережения в механизмах, работающих в повторно-кратковременных режимах [1 – 7].

На примере механизма установки верхних валков прокатной клетки показана возможность снижения потерь электроэнергии при вариативном изменении ускорения  $a_i$  исполнительного органа и установившейся скорости движения  $V_y$  при отработке технологических перемещений  $s_i, \forall i = \overline{1, n}$  в пределах цикла работы механизма. Окно возможностей для минимизации потерь электроэнергии в механизмах установки верхних валков прокатных клеток открывается, если предметно рассмотреть ведение технологических режимов прокатного стана. На рисунке 1 представлена диаграмма работы электроприводов черновой клетки толстолистового стана 3000 ЗАО «АМК»: скорость перемещения нажимных винтов (красный), зазор между прокатными валками (зелёный), сигнал наличия металла в валках черновой клетки (синий). Пунктирными линиями выделена часть технологического процесса от выброса металла из валков до его захвата с меньшим установленным зазором. После анализа скоростных диаграмм как черновой, так и чистой клетей (анализировался месячный архив) можно сказать, что от момента выброса металла из валков до его захвата проходит  $4,5 \div 6,0$  с.

За это время прокатный стан реверсируется до скорости захвата, слиток при необходимости кантуется и прижимается по правой кромке, выставляется необходимый зазор между прокатными валками и подаётся в клеть. Так вот именно это время и предлагается использовать в качестве допустимого для отработки программных перемещений верхнего валка электромеханическим нажимным устройством.

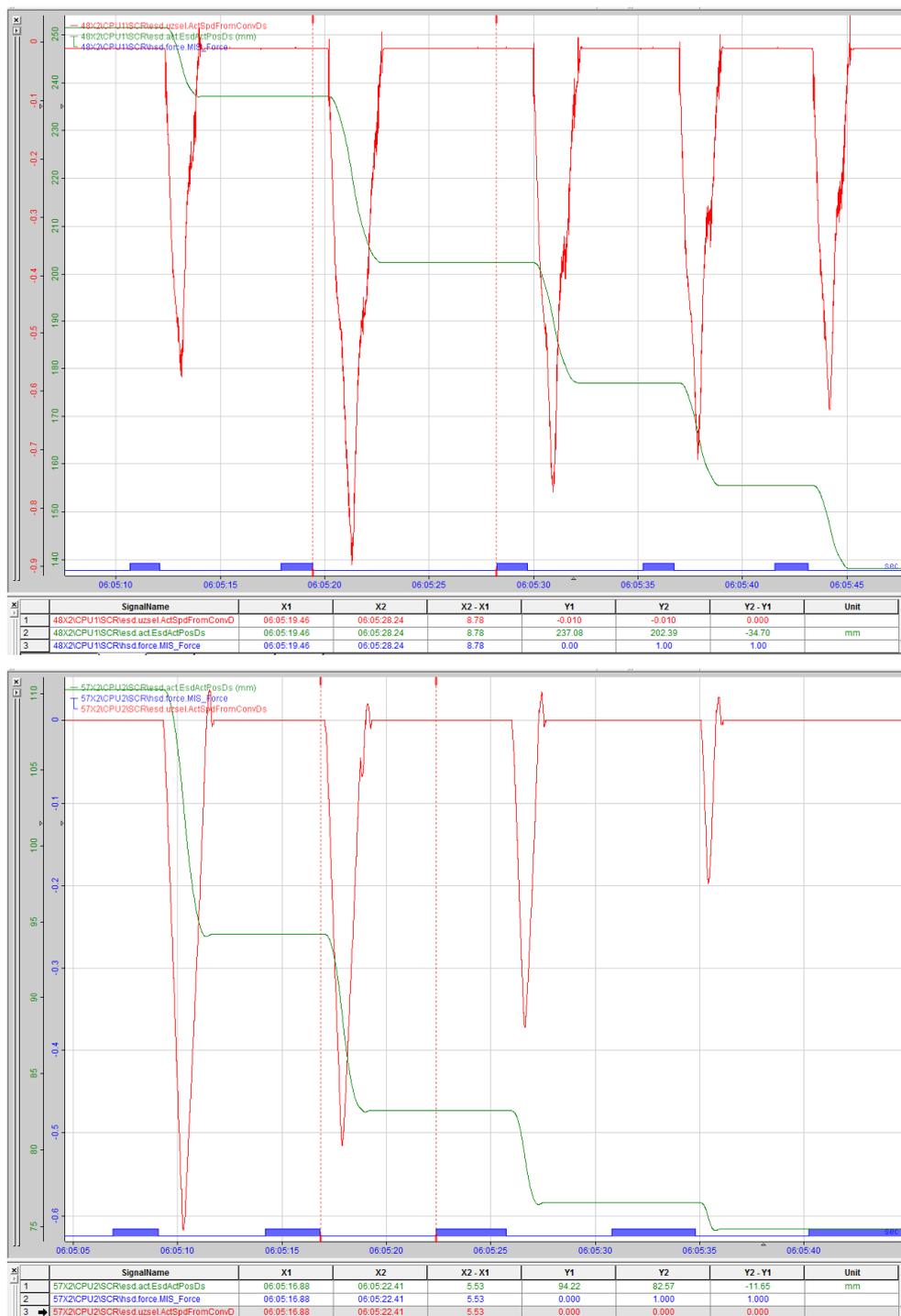


Рисунок 1 — Работа черновой и чистовой клетей, стан 3000

Оптимизация траекторий движения  $s_i(t)$ ,  $V_i(t)$ ,  $a_i(t)$  исполнительных механизмов как многокритериальных функций технологических параметров реализована программно на C++ в виде библиотеки и дополняет вычислительную часть действующих АСУ ТП листопркатных станов. В реальном масштабе времени происходит генерация энергооптимальных траекторий движения исполнительных механизмов. В алгоритмах помимо оптимизационных процедур использованы и нейросетевые технологии для прогнозирования допустимого времени  $\Delta t_i$  в каждом перемещении.

Таким образом, мощность приводных электродвигателей оказывается избыточной. Точнее, если локальная АСУ ТП обеспечит обработку некой «оптимальной» траектории дви-

жения  $s_{onm}(t)$ ,  $V_{onm}(t)$ ,  $a_{onm}(t)$  каждого программного перемещения  $s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  в пределах допустимого технологического времени  $\Delta t_{i, доп}$ , это позволит: во-первых, снизить загрузку существующего электрооборудования (образуется практически двух-трехкратный резерв установленной мощности электродвигателей, а значит и силовых преобразователей, кабельной продукции, трансформаторов и т.п.) или же заменить перечисленные элементы электрооборудованием меньшей мощности; во-вторых, многократно снижаются потери энергии, за счет чего появляется возможность экономии значительных объемов потребляемой электроэнергии; в-третьих, существенно снижаются динамические нагрузки на элементы механических элементов привода, что продлевает срок его эксплуатации.

Оптимизация движения машин и механизмов широкополосных станов горячей прокатки позволяет существенно экономить объем потребляемой электроэнергии за счёт снижения потерь практически в 5-8 раз! В случае реализации предлагаемой стратегии лишь для одного механизма установки верхних валков прокатного стана экономия электроэнергии составляет в среднем около 40-50 тыс. евро в год. Если учесть, что в состав каждого металлургического комбината входит, как правило, 3-5 прокатных цехов с двумя прокатными клетями в каждом, то в пределах одного предприятия появляется возможность экономии электроэнергии на сумму приблизительно 300-500 тыс. евро в год. Для электроприводов ножниц широкополосных станов ожидаемый экономический эффект существенно больший.

Мы предлагаем рассматривать и электропривод главного движения прокатных клетей реверсивных широкополосных станов как позиционный. На первый взгляд это утверждение может вызвать удивление. Действительно, никакого контура позиционирования в АСУ ТП тут нет. Но, если детально рассмотреть технологический процесс прокатки, можно увидеть,

что площадь  $s = \int_{t_{зах}}^{t_{выб}} V(t) dt$  под графиком линейной скорости прокатки  $V(t)$  от момента захва-

та  $t_{зах}$  до момента выброса  $t_{выб}$  металла из клетки и есть длина листа  $L_i$ , а по сути – виртуальное программное перемещение  $s_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  во время каждого обжатия. Более того, закон изменения скорости прокатки  $V(t)$  задают контроллеры верхнего уровня АСУ ТП, образуя неявный разомкнутый контур позиционирования. Таким образом, если при проектировании энергосиловых режимов электроприводов главного движения прокатных клетей широкополосных станов использовать предлагаемую стратегию оптимизации траекторий движения  $s_i(t)$ ,  $V_i(t)$  и  $a_i(t)$ , это позволит получить экономический эффект на порядок больший, поскольку мощности электродвигателей механизмов отличаются на порядок. Потери электроэнергии будут уменьшены и в целом ансамбле механизмов, непосредственно задействованных в технологическом процессе – рабочих, раскатных рольгангах, станинных роликах и т. п.).

### Библиографический список

1. Полилов Е. В. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск «Проблем и автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – К.: Техніка, 2006. – С. 315–319.
2. Полилов Е. В. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах (часть 2) [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). Частина 2. – С. 82–87.
3. Полилов Е. В. Алгоритм расчёта мощности двигателей позиционных электроприводов. Верификация уточнённого метода предельно-допустимого времени работы механизма [Текст] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ. – 2007. Вип. 2/2007. – С. 21–27.

4. Полилов Е. В. Уточнённый метод предельно допустимого времени работы механизма, предназначенный для расчёта мощности двигателей позиционных электроприводов [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 22–26.
5. Полилов Е. В. Минимизация мощности двигателей позиционных электроприводов путём вариации пуско-тормозных токов в соответствии с требуемой программой перемещений [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – Вип. 45. – С. 103–107.
6. Полилов Е. В. Потребление реактивной энергии тиристорными позиционными электроприводами постоянного тока [Текст] / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). Частина 1. – С. 76–78.
7. Полилов Е. В. Оптимизация диаграммы позиционного электропривода по минимуму потерь при неизменных динамических моментах [Текст] / Е. В. Полилов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Зб-к наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу» / Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 205–206.

*к.т.н., доц. Калюжный С. В.*

*ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР*

*государственный инспектор Мартынов С. А.*

*Госгорпромнадзор, г. Луганск, ЛНР*

*зам. главного механика Бондарь И. А.*

*Филиал №12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», г. Алчевск, ЛНР*

## НОВЫЙ ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПОДЪЁМА КРАНА

Предлагается строить механизмы подъёма кранов с применением моментных систем электропривода, позволяющих значительно увеличить ресурс эксплуатации механического оборудования.

Механизмы подъёма всех кранов, выпущенных заводами подъёмно-транспортного оборудования ранее и выпускаемых в настоящее время, работают в режиме дискретного управления, при котором необходимая высота поднятия груза, висящего на крюке, подбирается оператором исключительно интуитивно, за счет, как правило, многократных включений и отключений подъёмной лебёдки, расположенной на тележке, например, мостового крана. При каждом включении и последующем отключении электропривода (ЭП) механизма подъёма выполняются снятие и наложение тормозных колодок на приводной вал, в соответствии с инструкцией по безопасной эксплуатации подъёмного механизма того или иного крана. Как известно, при механическом торможении привода неизбежно наблюдаются рывки и удары в кинематических узлах механизма подъёма, что снижает его ресурс эксплуатации, а также приводит к дополнительному раскачиванию поднимаемого груза.

Указанные неприятные явления происходят из-за того, что механизмы подъёма кранов, традиционно, снабжаются системами ЭП, имеющими так называемые скоростные механические характеристики, при которых линейная скорость подъёма или опускания груза задаётся принудительно той или иной системой применяемого ЭП. Для старых кранов – это различного вида системы релейно-контакторного управления с двигателями переменного или постоянного тока, а для новых – как правило, системы частотного питания асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.



Рисунок 1 — Физическая модель механизма подъёма крана с ЭП, который имеет ММХ

Любой ЭП, имеющий скоростную механическую характеристику, естественным образом стабилизирует скорость движения приводимого им механизма, независимо от момента нагрузки приведенного к валу двигателя. Для механизмов подъёма кранов момент нагрузки носит потенциальный характер, зависящий только от массы поднимаемого груза, является величиной постоянной, так как масса груза, подвешенного на крюк крана, в процессе заданного цикла подъёма изменяться не может. Из сказанного следует, что при постоянном моменте подъёма применение ЭП-дов с моментными механическими характеристиками (ММХ) для крановых лебёдок является безальтернативным.

Применение указанной механической характеристики позволяет принципиально иначе организовать работу механизма подъёма крана. Для поднятия груза на заданную высоту оператору (особенно малоопытному) не требуется несколько раз включать и выключать привод с наложением при каждом включении механических тормозов. При новом принципе управления необходимая высота поднятия груза может обеспечиваться за одно включение привода, и если даже произойдёт переподъём груза, то последний останавливают и, удерживая лебёдкой, медленно опускают до нужной высоты. Затем накладывают механические тормоза и далее дают разрешение на включение привода тележки или моста крана. Системы питания двигателей постоянного тока, формирующие ММХ, известны с конца прошлого столетия из работ сотрудников Института электродинамики (ИЭД) НАН Украины [1], а также кафедры Автоматизированного электропривода Московского энергетического института (МЭИ) [2]. Системы питания для ЭП-дов переменного тока с ММХ были разработаны значительно позже в ДонГТУ [3; 4]. Авторами настоящей статьи была построена в 2019 году на кафедре Автоматизированных электромеханических систем имени проф. Зеленова А.Б. физическая модель подъёмной установки крана, приведенная на рисунке 1, с электроприводом, имеющим ММХ. Функционирование модели с новым принципом управления механизмом подъёма крана можно посмотреть в Интернете по адресу [5].

### Библиографический список

1. А.с. 194168 СССР, МПК H02P 59/01. Электропривод постоянного тока / А. Н. Милях, Б. Е. Кубышин, И. В. Волков. – Оpubл. 1967, Бюл. № 8.
2. Ильинский Н. Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергия, 1979. – 144 с.
3. Калюжный В. В. Электропривод по системе токопараметрический асинхронно-вентильный каскад / В. В. Калюжный, С. В. Калюжный // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. – Харьков: ХПИ. – 2008. – Вып. 30. – С. 201–203.
4. Калюжный С. В. Снижение динамических нагрузок мостовых кранов [Текст] / С. В. Калюжный, В. В. Калюжный, И. А. Бондарь, С. С. Луковка, В. К. Роменский. – Одесса: журнал „Подъёмные сооружения. Специальная техника”. – 2013. – № 11. – С. 12 – 13.
5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.youtube.com/watch?v=l\\_wiaCn9mMQ](https://www.youtube.com/watch?v=l_wiaCn9mMQ).

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ  
ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРООБЪЕМНЫХ ПЕРЕДАЧ

Традиционные способы технической диагностики гидроприводов основаны на применении в качестве тестового диагностического режима работы переходного процесса давления в гидромагистралях. Переходный процесс в гидрообъемной передаче (ГОП) обычно вызывается скачком момента сопротивления на валу гидромотора, создаваемым устройством статического нагружения ГОП. При этом в качестве диагностируемого показателя технического состояния, как правило, принимается скорость нарастания давления в гидролиниях при заданном скачке нагрузки [1, 2]. Недостатком такого способа диагностики и устройств, реализующих его, является возможность измерения параметров лишь начального участка переходного процесса. Здесь по измеренным показателям переходного процесса может быть косвенно определен только один параметр технического состояния гидропривода – его объемный КПД.

Предлагаемый способ диагностики основан на определении параметров математической модели объекта  $q'_i$  по числовым характеристикам переходного процесса изменения давления в ГОП. Последний в регулируемых ГОП с инерционной нагрузкой согласно [3] вызывают скачком скорости линейного изменения параметра регулирования. Под этим параметром понимается относительный рабочий объем регулируемого гидронасоса/гидромотора

$$e = \frac{q'_M}{q_M}, \quad (1)$$

где  $q'_M$  – текущее значение объема гидронасоса.

На первом этапе диагностики в ходе эксперимента или реальной эксплуатации производится идентификация параметров математической модели объекта. Затем по значениям идентифицируемых параметров с помощью известных соотношений [4] определяются диагностируемые показатели технического состояния ГОП коэффициент утечки  $C_y$ , коэффициент жесткости  $\theta$  и объемный КПД  $\eta_0$ .

Получение модели строго эквивалентной объекту на основе ряда значений выходной переменной и входного воздействия в дискретные моменты времени может быть осуществлено с помощью модифицированного метода В. Висковатова [4]. Данный метод заключается в том, что на основе дискретных данных формируется идентифицирующая матрица. Первые две строки этой матрицы образуют последовательные измерения входной и выходной переменных, а остальные элементы рассчитываются рекуррентным соотношением до тех пор, пока не появляется строка с нулевыми элементами. Первый столбец до нулевой строки используется для получения дискретной передаточной функции модели на основе непрерывной дроби. В результате получают ДПФ объекта вида

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n \cdot z^{-n}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_n \cdot z^{-n}} \cdot z^{-d} = \frac{P_n(z)}{Q_n(z)} \cdot z^{-d}, \quad (2)$$

где  $n$  – порядок модели, определенный размерностью матрицы;  $d$  – дискретное значение транспортного запаздывания.

Исходя из строгой эквивалентности дискретной модели непрерывному объекту, можно восстановить нули и полюса непрерывного объекта с помощью согласованного обратного  $Z$ -преобразования:

$$s = \frac{\ln(z)}{T}, \quad (1)$$

где  $T$  – период дискретизации, с.

Зная нули и полюсы  $s_i$  на основании теоремы Безу можно восстановить непрерывную передаточную функцию. В результате структурно-параметрической идентификации модели ГОП определены передаточные функции, связывающие входные и выходные переменные линеаризованной динамической системы ГОП – инерционная нагрузка.

В качестве входных переменных рассматривались управляющие  $\gamma$  (угол поворота валика люльки) и нагружающие  $M_n$  воздействия, а в качестве выходных – частота вращения вала гидромотора  $n_M$  и перепад давления в силовых магистралях ГОП  $\Delta p$ .

Линейная модель системы ГОП-нагрузка является звеном второго порядка

$$W(s) = \frac{n_M(s)}{\gamma(s)} = \frac{K_1}{(d_2 s^2 + d_1 s + 1)}, \quad (4)$$

$$W(s) = \frac{n_M(s)}{M_n(s)} = \frac{K_2(1 + d_3 s)}{(d_2 s^2 + d_1 s + 1)}, \quad (5)$$

где  $K_1, K_2, d_1, d_2, d_3$  – параметры технического состояния системы, которые зависят как от искомым величин  $C_y, \theta$  и  $\eta_0$ , так и от других параметров. В частности

$$K_1 = n_M \cdot K_{гy}, \quad K_2 = \frac{C_y}{q_M^2}, \quad d_1 = J \frac{C_y}{q_M^2}, \quad d_2 = J \frac{\theta}{q_M^2}, \quad d_3 = \frac{\theta}{C_y}, \quad (6)$$

где  $K_{гy}$  – коэффициент передачи гидроусилителя;  $n_M$  – частота вращения вала гидромотора,  $s^{-1}$ ;  $q_M$  – характерный объем гидромотора,  $см^3$ ;  $J$  – момент инерции объекта нагружения, приведенный к валу гидромотора,  $кг \cdot м^2$ .

Учитывая, что коэффициенты  $d_1$  и  $d_2$  характеристических полиномов передаточных функций (4) и (5) одинаковы, то это позволяет дублировать их оценку при различном сочетании входов и выходов систем и тем самым повысить точность результатов идентификации.

Из приведенных в (6) выражений для коэффициентов  $d_1$  и  $d_2$  следуют расчетные формулы определения искомым показателей диагностируемой ГОП

$$C_y = \frac{q_M^2}{J} d_1; \quad \theta = \frac{q_M^2}{J} d_2 \quad (7)$$

По найденным значениям коэффициента утечек  $C_y$ , можно рассчитать, соответствующие оценки объемного КПД  $\eta_0$  диагностируемого гидропривода [3]

$$\eta_0 = 1 - \frac{C_y \cdot \Delta p}{q_n \cdot e \cdot n_M} \quad (8)$$

где  $\Delta p, n_M$  – задаваемые расчетные параметры статических режимов работы ГОП.

По сравнению с известными способами диагностики предлагаемый подход определения коэффициентов передаточных функций (4) и (5) не содержит сложных вычислительных

процедур, как например в [3], где переходные характеристики дополнительно подвергаются разложению в ряд по функциям Лаггера.

### **Библиографический список**

1. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта и др.; Под общ. ред. Т. М. Башты. — М.: Машиностроение. 1989. — 264 с.
2. А. с. 615260 СССР. Способ диагностики гидропривода / В. И. Стожков, А. М. Харазов, Т. Ф. Боева // БИ. 1978. Бюл. №25.
3. А. с. SU 1288388. Устройство для диагностики технического состояния объемного гидропривода / Бабаев О. М., Загашвили Ю. В., Игнатов Л. Н., Маркелов А. С. и др. // МПК F15B 19/00. 1987. Бюл. №5.
4. Овдей В. С. Структурно-параметрическая идентификация объектов управления на основе дискретных вход-выходных данных / В. С. Овдей, Р. Ю. Ткачев // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных (19 – 22 мая 2020 г.) / Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020. — С. 229 – 235.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Сборник материалов  
V международной научно-технической конференции  
15 октября 2020 г.

В авторской редакции

Художественное оформление обложки

Н. В. Чернышова

---

Заказ № 381.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офс. Печать RISO.  
Усл. печат. л. 11,3. Уч.-изд. л. 9,75.  
Издательство не несет ответственности за содержание  
материала, предоставленного автором к печати.  
Издатель и изготовитель:  
Донбасский государственный технический институт  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР, 94204  
(ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР, ауд. 2113, т/факс 2-58-59)  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя  
и распространителя средства массовой информации  
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016.