X МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

X Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

X Международная научно-практическая конференция

Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса

XV Международная научно-техническая конференция

Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование

XXIV Всероссийская научно-техническая конференция

Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых

X Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов

Металлургия XXI столетия глазами молодых

Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДОННТУ)**

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДОННТУ

**ФГБОУ ВО «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

НИЦ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА

**Материалы 10-й Международной научно-
практической конференции
Том 3. Инновационные технологии
проектирования, изготовления и эксплуатации
промышленных машин и агрегатов.**

**г. Донецк
28-30 мая 2024 года**

Донецк – 2024

ББК 65.30
УДК 330.341 (477.61/62)

И 66 Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 28-30 мая 2024 г. – Донецк: ДонНТУ, 2024.
Т. 3: 3. Инновационные технологии проектирования,изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2024. –154 с.

Представлены материалы 10-й Международной научно-практической конференции ―Инновационные перспективы Донбасса‖, состоявшейся 28-30 мая 2024 г. в Донецке на базе ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», включающие доклады ученых и специалистов по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения инновационного развития Донбасса и формирования механизмов повышения социально-экономической эффективности развития региона.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

Ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, ректор ДонГТУ Д.А. Вишневский, директор АНО «НИЦ стратегического партнерства государства и бизнеса» О.Ф. Шахов, проректор ДонНТУ С.В. Борщевский, канд. техн. наук А.Н. Корчевский, канд. техн. наук О.Л. Кизияров, канд. техн. наук А.А. Булгаков, канд.техн.наук Д.И. Морозов, д-р техн. наук С. П. Еронько, канд.техн.наук А.М. Зинченко, канд. хим. наук Ю.Н. Ганнова, канд.фарм.наук В.С. Федорова, канд. техн. наук А.А. Кравченко, д-р экон. наук Я.В. Хоменко, канд. техн. наук И.В. Филатова, канд.техн.наук Д.В. Пронский, председатель Совета молодых ученых ДонНТУ М.П. Руденко.

Под общей редакцией: Шамрай Юлии Александровны

Контактный адрес редакции
НИЧ ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк, 283001
Тел.: +7 (856) 305-35-67. Эл. почта: ipd.donntu.org@gmail.com
Интернет: http://ipd.donntu.ru

© ФГБОУ ВО ―Донецкий национальный технический университет
Министерство образования и науки ДНР, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Э.П. Левченко, О.В. Бревнова, О.А. Левченко, А.А. Бревнов, Л.Э. Кучеренко
Экспериментальное определение крупности фракционного состава готового продукта при измельчении в разгонно-ударной дробилке 5
Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова
К разработке штампов для упрочнения пружин 9
Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Ю.А. Шамрай
Анализ характеристик машин с шагающими балками 13
И.А. Пинахин, М.А. Ягмуров, С.С. Врублевская, М А. Шпак
Исследование механизма метода объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ)..... 17
Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, В.И. Рубежанский, М.Э. Левченко, В.Н. Онопченко
Повышение технических возможностей процесса фрагментирования агломерата в одновалковой зубчатой дробилке 22
А.Н. Тумин, А.М. Зинченко, Э.П. Левченко, В.Н. Онопченко, Ф.А. Грунис, Л.Э. Кучеренко
Усовершенствование привода фрезерного станка на основе гидравлики..... 26
Э.П. Левченко
Перспективы применения дисковых дробильно-измельчительных машин с комбинированным действием на материал 31
К.В. Строгонов, Д.Д. Львов, В.А. Мурашов, А.К. Бастынец
Результаты численного моделирования реактора жидкофазного восстановления железа 35
С.П. Еронько, С.М. Горбатюк, О.А. Кобелев, И.С. Погорелов
Разработка комплекса оборудования для обслуживания ковшовых кассетных затворов 40
С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, В.Э. Серегин, С.В. Дубляков
Моделирование работы установки для вдувания газопорошковой смеси в разливаемую сталь 45
Н.А.Спиридонов, В.Ф. Раков, И.Л. Сидак
Конструкция устройства фотокаталитической очистки воды суспензионным методом 50
А.Н. Рак, В.О. Гутаревич
Обоснование параметров муфт трансмиссии для морских судов..... 55
С.Н.Власов
Качество поверхности поверхностей, полученных внутренним шлифованием..... 61
В. С. Полищук, Ю. А. Алехов, А. Н. Пересадченко, А.Н. Шавшина
Зависимость магнитных свойств магнитно-абразивных порошков от формы зерна и технологических факторов..... 66
В.С. Полищук, И.В. Садовая, Ю.А. Алехов, Ф.Н. Сагдеева
Расчет давления, возникающего при формировании фильтроэлемента из смесей порошков никеля и алюминия под действием центробежных сил 71

О.И.Акимова, Э.П. Левченко
Оценка мощности двигателя роторно-ударного измельчителя для приготовления колотой дроби 76
Н.Н. Подрезов, В.А. Виннийчук, С.А. Томилин
Анализ характеристик программируемого источника питания ион 48-900 для сварки под флюсом 82
М. В. Нищерякова, Е. А. Буленков
Применение облачной САПР для технической подготовки производства..... 86
Е.В. Кобзева
Цифровизация горно-металлургической отрасли в России..... 89
Д.А. Власенко
Анализ эффективности молотковой дробилки при использовании молотков с комбинированными способами подвеса на оси ротора..... 93
А. П. Кононенко, В. А. Панов
Алгоритмизация расчёта критического сечения малопогружного эрлифта 98
А.А. Орлов, Е.В. Крылова, В.М. Щербаков, А.М. Кенжалыев, А.Д. Авдеев
Цифровизация элементов объектов энергетической отрасли на примере лопатки газотурбинного двигателя 103
В.В. Малашенко, Т. И. Малашенко
Специфика твёрдорастворного упрочнения функциональных сплавов в условиях высокоэнергетических внешних воздействий..... 106
В.Г. Нечепаев
Многопараметрическая нелинейная модель напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной выгрузкой…….109
С. А. Гордин, А. Ю. Захаров
Влияния формы магнитопроводящих экранов на стабильность магнитного подвеса …….....116
А.П. Кононенко, Е.Н. Бойко
Новый режущий инструмент. Кинематика режущего инструмента...……... 121
В.Г. Нечепаев
Математическая формализация формирования давления в рабочем пространстве шнековых исполнительных органов очистных комбайнов... 127
Р.С. Мележик, Д.А. Власенко
Исследование режимных параметров загрузки рабочего пространства четырехвалковой дробилки..... 135
Д.О. Прудченко, Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров
Прогнозирование изменения технического состояния транспортно-технологических машин на основе массивов данных..... 140
А.В. Пичахчи, В.А. Сидоров
Особенности вибрационного контроля комбинированных редукторов непрерывных прокатных станоВ..... 145
В.В. Гулин
Анализ взаимодействия элементов при проектировании систем на основе генераторов импульсных струй……...…….……..150

УДК 621.66-9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУПНОСТИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ГОТОВОГО ПРОДУКТА ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ В РАЗГОННО-УДАРНОЙ ДРОБИЛКЕ

Э.П. Левченко, О.В. Бревнова, О.А. Левченко, А.А. Бревнов, Л.Э. Кучеренко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *Приведены результаты экспериментальных исследований разгонно-ударной дробилки при одно- двухступенчатом измельчении материалов по выявлению гранулометрических характеристик готового продукта.*

Annotation. *The results of experimental studies of an accelerating-impact crusher with one-two-stage grinding of materials to identify the granulometric characteristics of the finished product are presented.*

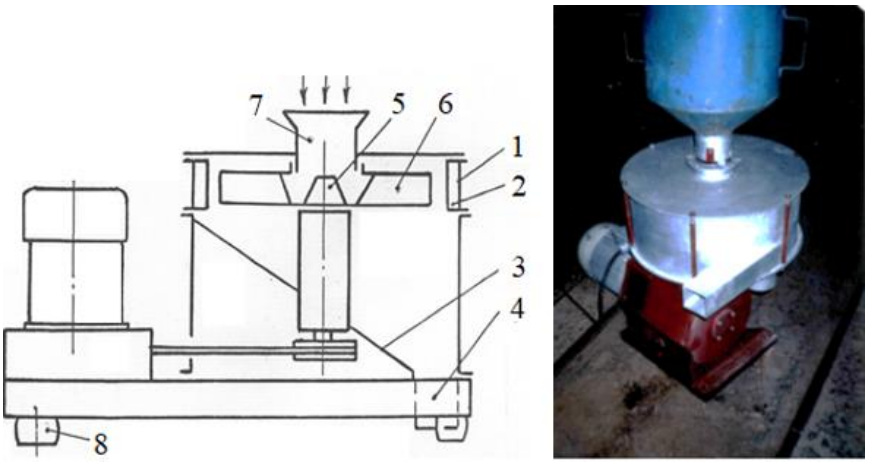
Ключевые слова: *дробление, измельчение, разгонно-ударная дробилка, фракционный состав, графические зависимости.*

Key words: *crushing, grinding, accelerating impact crusher, fractional composition, graphical dependencies.*

Сокращение доли участия рабочих поверхностей в приложении нагрузки к диспергируемому материалу считается одним из резервов повышения эффективности процессов дробления и измельчения, а также повышения работоспособности рабочих органов дробильно-измельчительной техники. Одним из направлений достижения этого является использование и изучение работы разгонно-ударных измельчителей [1, 2]. В таких машинах материал разгоняется лопастями быстровращающегося ротора, куда он подается через центральное отверстие, с последующим выбросом на отбойные элементы измельчительных плит. Активное разрушение достигается путем приложения к частицам высокоэнергетичного ударного импульса [3-5], что приводит к фрагментированию с образованием большого количества остроугольных частиц готового продукта. Применение остроугольных частиц благоприятно сказывается при изготовлении цементно-бетонных смесей, вследствие более надежного их сцепления между собой, что существенно повышает прочность бетонов, как элементов строительных конструкций.

Схема конструктивного устройства одноступенчатой разгонно-ударной дробилки показана на рисунке 1. Её преимуществами

является более полная реализация подводимой энергии и энергоёмкость процесса; мгновенный контакт кусков материала, определяющий низкий износ отбойных поверхностей и их поверхностного упрочнения при изготовлении из материалов, подвергающихся наклепке в процессе удара (например 110Г13Л); простота обслуживания и возможность управления энергией разрушения путем изменения частоты вращения ротора; простота конструкции и относительно малая металлоёмкость относительно иными видами дробильно-измельчительных машин; регулировка крупности готового продукта как частотой вращения, так и многоступенчатой компоновкой; возможность создания эффективного прямого (лобового удара), когда энергия, приложенная к материалу максимально переходит в энергию разрушения.



1 – корпус; 2 – отбойные плиты; 3 – течка; 4 – рама;
5 – распределительный конус; 6 – лопастной ротор; 7 – загрузочная горловина

Рисунок 1 – Конструктивная схема и физическая модель разгонно-ударной дробилки

Абсолютная скорость вылета материала из лопастного ротора, от которой зависит ударным импульс, задаётся выражением:

$$V = \omega R \times \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R^2}} - \frac{r_n}{R} \cdot f}{\sqrt{f^2 + 1} + f} \right)^2} - - \sqrt{\frac{2\left(\sqrt{1 - \frac{r_n^2}{R}} - \frac{r_n}{R} \cdot f \right) \frac{r_n}{R}}{\sqrt{f^2 + 1} + f}} \right.,$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, c^{-1}; f – коэффициент трения; r_n – радиус нормальный к лопасти; R – радиус ротора.

В качестве исходного сырья для питания машины использовались кимберлит, цеолит и щебень начальной крупностью 40–50 мм. Испытания проводились в открытом цикле с имитацией одно- и двухступенчатого измельчения.

На рисунке показаны результаты гранулометрического состава готового продукта при одноступенчатом режиме работы, а на рис. 2 – при двухступенчатом измельчении.

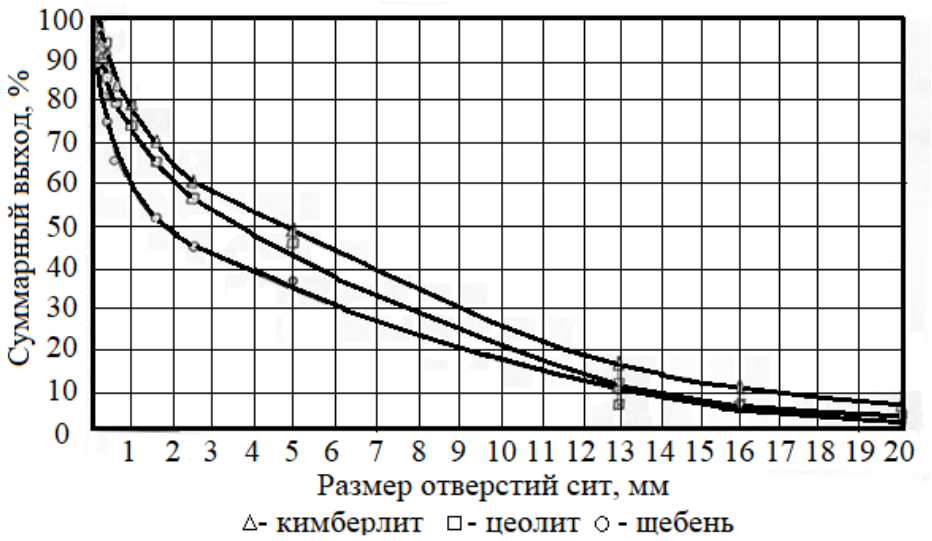


Рисунок 2 – Суммарная характеристика крупности готового продукта при одноступенчатом дроблении

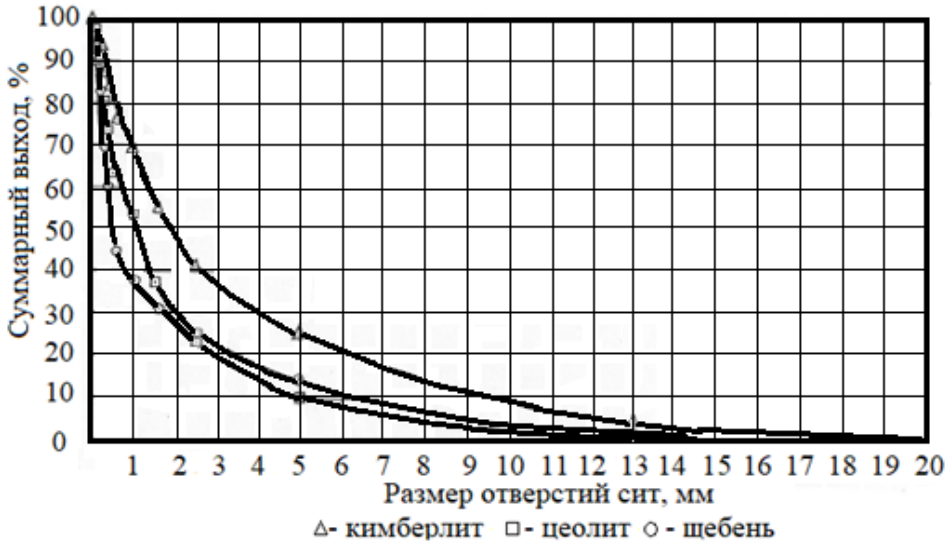


Рисунок 2 – Суммарная характеристика крупности готового продукта при двухступенчатом измельчении

Из приведенных графических зависимостей рисунка 1 видно, что при одноступенчатом дроблении границей крупности готового продукта является размер частиц 15 мм, а количество материала с размерами менее 1 мм достигает 30-40 %. При двухступенчатом дроблении граница крупности готового продукта снижена и достигается величиной 7 мм при содержании классов величиной до 1 мм 30-60 %.

Производительность при одно- и двухступенчатом дроблении являются примерно равными и достигают до 15 т/ч. При заданной крупности исходного питания при одноступенчатом разрушении материала машина работает в режиме дробилки, а при двухступенчатом преимущественно в режиме измельчителя.

Перечень ссылок

1. Левченко Э. П. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах: монография / Левченко Э. П., Левченко О. А., Зинченко А. М. и др. — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — 225 с.

2. Левченко Э. П. Сравнительный анализ условий подачи материала в разгонно-ударную дробилку / Э. П. Левченко, А. А. Бревнов, О. В. Бревнова // Сборник научных трудов ДонГТУ. — № 21 (64). — Алчевск: ДонГТУ, 2020. — С. 88–93.

3. Левченко Э. П. Совершенствование процессов ударного измельчения сырьевых компонентов / Э. П. Левченко, О. В Бревнова, А. А. Бревнов и др. // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы IV Международной науч.-практ. конф. — Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, 2022. — С. 130–134.

4. Левченко Э. П. Сравнительный анализ условий подачи материала в разгонно-ударную дробилку / Э. П. Левченко, А. А. Бревнов, О. В. Бревнова // Сборник научных трудов ДонГТУ. — № 21 (64). — Алчевск: ДонГТУ, 2020. — С. 88–93.

5. Левченко Э. П. Диспергирование материалов в разгонно-ударных машинах / Э. П. Левченко, А. С. Панков, А. А. Бревнов и др. // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк. 2017. — С. 68–71.

УДК 629.083

К РАЗРАБОТКЕ ШТАМПОВ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИН

Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
г. Ставрополь

Аннотация. *Для упрочнения пружин, работающих с контактом витков следует применять контактное заневоливание. Предложены конструкции штампов для упрочнения пружин для серийного и массового производства.*
Annotation. *The contact clamping should be used for strengthening of springs working with coil contact. Designs of stamps for springs strengthening for serial and mass production are proposed.*
Ключевые слова: *контактное заневоливание пружин, штамп для упрочнения пружин*
Keywords: *contact clamping of springs, stamp for strengthening springs*

Важным направлением, позволяющим увеличить ресурс пружин, является совершенствование оснастки для упрочнения пружин в процессе изготовления [1]. Одним из методов повышения ресурса пружин является заневоливание.

При заневоливании [1] пружины в специальном кассетном приспособлении сжимают до контакта витков и выдерживают в приспособлении 24…48 часов. После снятия нагрузки и извлечения из кассетного приспособления пружины получают осадку и сохраняют свою упругость даже при продолжительной эксплуатации.

Для пружин, работающих с контактом витков следует применять контактное заневоливание. Для уменьшения времени выдержки пружин в сжатом состоянии к пружинам дополнительно прикладывают силу, приводящую к сжатию контактирующих витков до возникновения необходимой остаточной деформации. Актуален вопрос механизации процесса упрочнения пружин.

На рисунках 1 и 2 показан штамп для контактного заневоливания пружин [2].

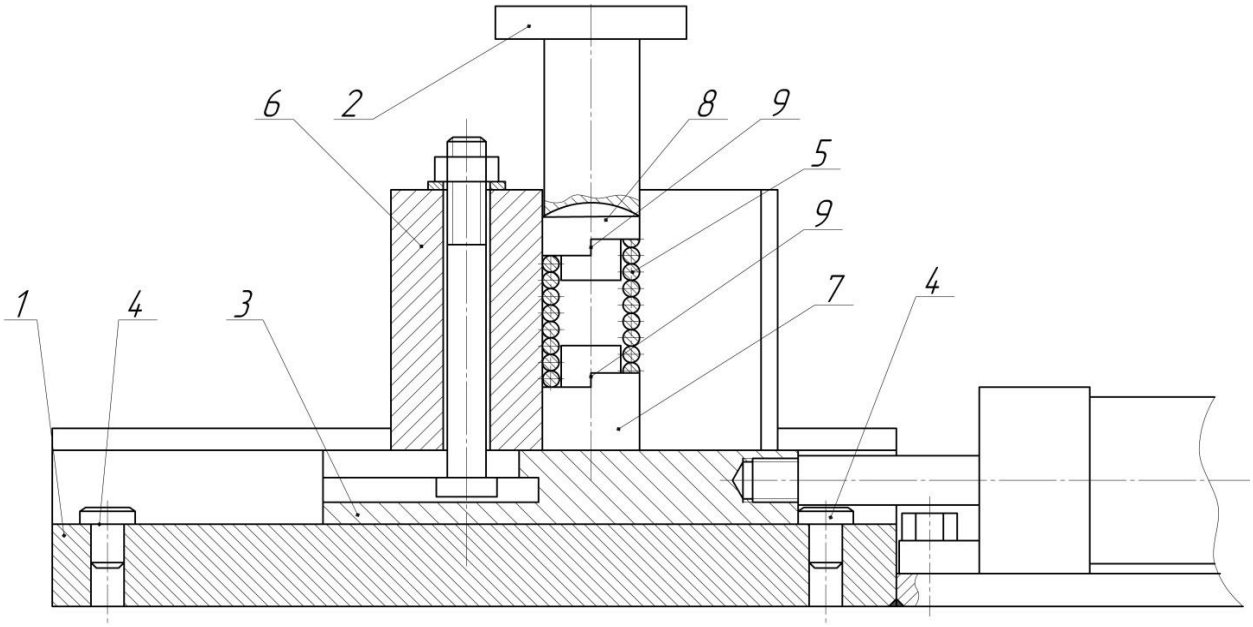


Рисунок 1 — Штамп для заневоливания пружин
(Патент RU 2296968)

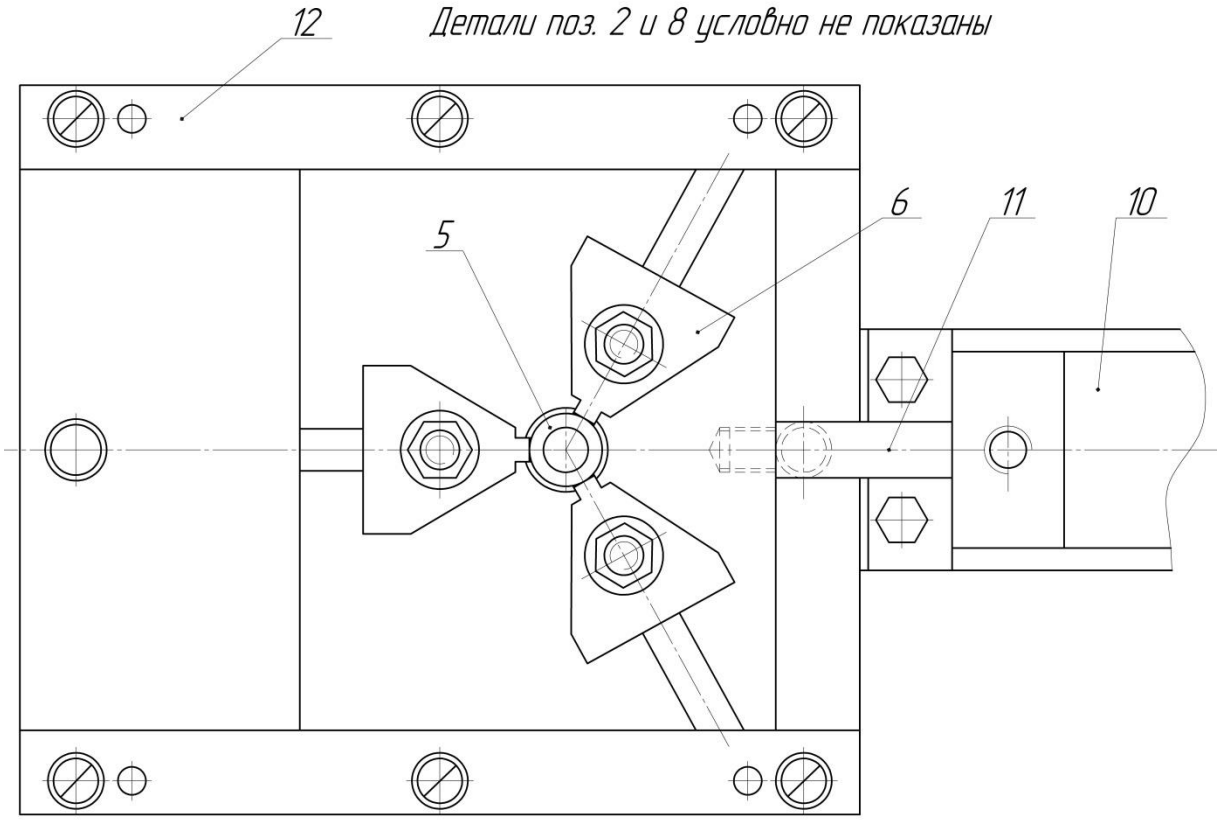


Рисунок 2 — Вид сверху штампа [2]

Функционирует штамп таким образом [2]. Нижнюю плиту 1

прикрепляют к столу пресса, а пуансон 2 — к верхней плите пресса. Подвижная плита 3 до начала эксплуатации соприкасается с упором 4. Пружину 5 вставляют между направляющими 6. Она должна соприкасаться крайними витками с винтовыми поверхностями обоих вкладышей 7 и 8. Она должна упираться торцами крайних витков в упоры 9 вкладышей 7 и 8.

После этого механизм 10 воздействует на шток 11 и перемещает нижнюю подвижную плиту 3 между направляющими планками 12 к упору 4 в рабочую зону пресса. Пуансон 2 сжимает пружину 5. Опорой пружине служат направляющие 6. С целью равномерного распределения усилия пресса по диаметру сжатой пружины необходимо наличие шаровой поверхности на пуансоне 2 и верхнем вкладыше 8.

После выдержки под нагрузкой пуансон 2 поднимают, подвижную плиту 3 перемещают при помощи механизма 10 и штока 11 в нерабочую зону пресса к упору 4. Пружину извлекают.

Для упрочнения пружин с иными размерами наружного диаметра и диаметра проволоки штамп может быть переналажен в нерабочей зоне пресса. С этой целью достаточно заменить направляющие опоры 6 и вкладыши 7 и 8.

Рассмотрим штамп для заневоливания пружин [3] (рис. 3).

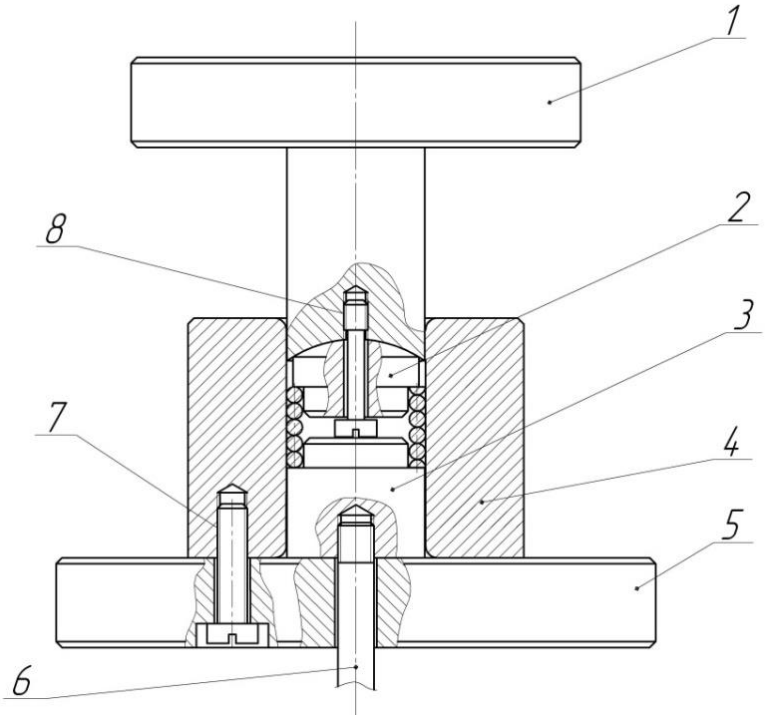


Рисунок 3— Штамп для заневоливания пружин (Патент RU 2481914)

Функционирует штамп таким образом [3]. Нижнюю плиту 5 крепят на неподвижной плите пресса. К верхней подвижной плите пресса крепят пуансон 1. Упрочняемую пружину вставляют в стакан 4. Торцы пружины должны контактировать с кольцевыми проточками или упорами торцов вкладышей 2 и 3. Движением ползуна пресса пуансон 1 опускают, при этом пружина сжимается и увеличивает свой наружный диаметр, все её витки начинают контактировать с внутренней поверхностью стакана 4. Пружина принимает правильную геометрическую форму. Шаровые поверхности на пуансоне 1 и верхнем вкладыше 2 служат для равномерного распределения усилия пресса по диаметру сжатой пружины.

Выдержка пружины под нагрузкой (10…300)F_3 (F_3 – сила сжатия пружины до контакта витков) составляет 1,5…2 секунды. Затем пуансон 1 с вкладышем 2 поднимают, пружина разжимается. Далее пружину выталкивают из стакана ходом нижнего цилиндра пресса посредством штока 6 и нижнего вкладыша 3. При штамповке известны устройства для сталкивания пружины с нижнего вкладыша 3. Пружина направляется дальше по ходу технологического процесса.

Преимущество предложенной конструкции штампа заключается в том, что с целью повышения производительности труда механизирован процесс извлечения пружины из штампа.

Переналаживаемую конструкцию штампа (рис. 1, 2) рекомендуется применять при упрочнении пружин в серийном производстве. Штамп с механизированным извлечением пружин (рис. 3) рекомендуется применять в массовом производстве.

Перечень ссылок

1. Землянушнов, Н.А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия: монография / Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова, А.А. Порохня. — Ставрополь: СКФУ, 2019. — 169 с.

2. Пат. RU 2296968 C2, МПК G01M 13/00, B21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Землянушнова Н. Ю. — № 2005108799/28; заявлено 28.03.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. — 5 с.

3. Пат. RU 2481914 C1, МПК B21F 35/00, B26F1/06. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А. — № 2012107298; заявлено 28.02.2012; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14. — 5 с.

УДК 658. 58

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров, Ю.А. Шамрай
ФГБОУ ВО "Донецкий национальный технический университет", г.Донецк

Аннотация. *Выполнен обзор существующих конструкций и конструктивных особенностей механизмов с шагающими балками, применяемыми на металлургических предприятиях.Рассмотрены виды нагружения, цикл работы, температурный режим.*
Ключевые слова: *шагающие балки, МНЛЗ, гидроцилиндр, силовая нагрузка.*
Annotation. *A review of existing structures and design features of mechanisms with walking beams used at metallurgical enterprises is carried out. Types of loading, operating cycle, and temperature conditions are considered.*
Key words: *walking beams, continuous caster, hydraulic cylinder, power load.*

Механизмы с шагающими балками занимают самую большую площадь в сталеплавильных и прокатных цехах металлургических предприятий. В чёрной металлургии эти механизмы в основном представлены тремя реализациями:

- холодильники машин непрерывного литья заготовки [2];
- холодильники сортопрокатных станов [3];
- механизмы перемещения заготовок в нагревательных печах прокатных станов [4, 5].

Эти механизмы можно классифицировать по следующим признакам [1, 5]:

- по типу привода – электромеханический или гидравлический;
- по схеме движения балок – схема из подвижных и стационарных балок или схема из двух групп шагающих балок;
- по механизмам вертикального перемещения – рычажным, клиновым, эксцентриковым, с уравновешиванием или без уравновешивания;
- по механизмам горизонтального перемещения – рычажные, зубчатые передачи, рычажно-кривошипные и др.

Холодильники сортопрокатных станов наиболее часто выполняют реечными и используют для охлаждения сортового

проката от температуры прокатки до возможности реализации процесса холодной резки. Основное требование – обеспечить прямолинейность охлаждаемого проката реализуется частым расположением реек. При каждом ходе подвижных реек, совершающих качательно-поступательное движение, прокат перемещается с неподвижных реек на расстояние, равное шагу зубьев реек. Подъём и опускание подвижных реек осуществляются при помощи тягового устройства со многими связями (рисунок 1) [3].

Условия работы характеризуются следующими факторами:

- силовая нагрузка – низкая или умеренная, переменная, без динамических составляющих, периодическая (цикл шагания – 4…10с);

- температурные воздействия - наличие остывающего проката в диапазоне температур 900…120^{0}С создаёт условия для отпуска материала реек при прекращении цикла прокатки, что снижает действующие напряжения и препятствует процессу роста термических трещин;

- воздействие окружающей среды – минимальное, связанное с сезонными и суточными колебаниями воздуха;

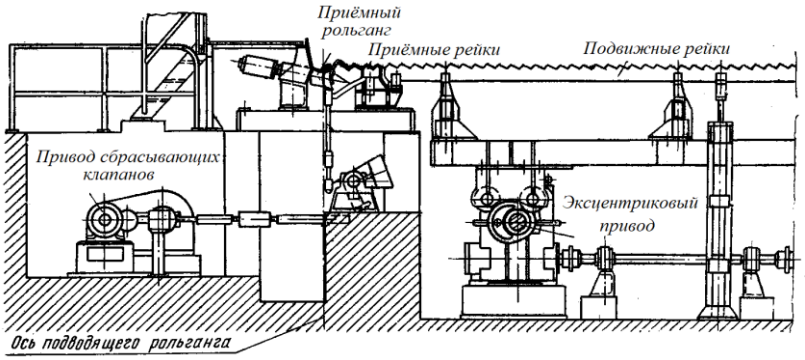


Рисунок 1 - Реечный холодильник мелкосортного стана 250

Высокая температура в печи (1150…1250^{0}С) сочетается с большим весом шагающих конструкций (около 1000 тонн). В печах с тяжёлой садкой при нагреве крупных заготовок для вертикального перемещения применяют гидравлические цилиндры, установленные наклонно в конце или в середине печи и клиновые механизмы. Для горизонтального перемещения используются гидравлические цилиндры, устанавливаемые в середине или начале печи (рисунок 3).

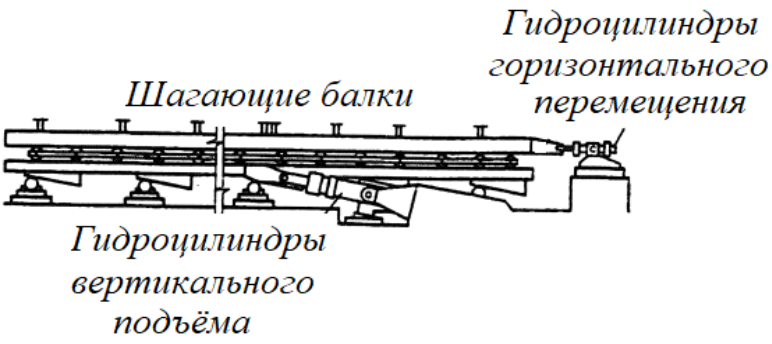


Рисунок 3 – Механизмы печи с шагающими балками

Условия работы характеризуются следующими факторами:

- силовая нагрузка – высокая, переменная, без динамических составляющих, периодическая;
- температурные воздействия для жаропрочных шагающих балок в нагревательной печи соответствуют температуре зон нагрева (600…1200^{0}С), для металлоконструкций механизма шагания – стационарные на уровне 15^{0}С;
- воздействие окружающей среды – повышенная влажность, коррозия.

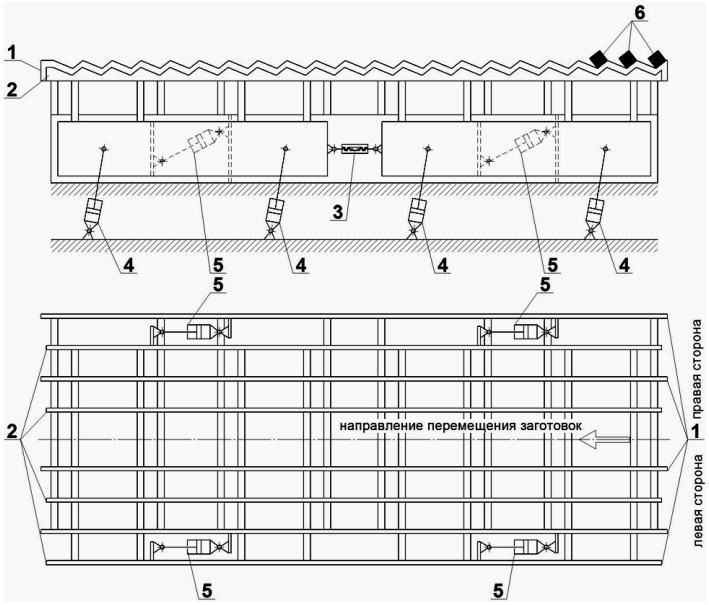


Рисунок 4 – Холодильник МНЛЗ с шагающими балками:

1-неподвижные балки, 2-подвижные балки, 3-форкопф,

4-гидроцилиндры вертикального перемещения подвижных балок, 5-гидроцилиндры горизонтального перемещения подвижных балок.

Вывод. Таким образом, проведенный обзор показывает, что основным методом адаптации известной конструкции шагающего механизма к различным условиям эксплуатации является изменение жёсткости несущих элементов и точек приложения сил. Некоторые отличия в конструкции связаны с температурными режимами. Отмеченное многообразие конструкций холодильников МНЛЗ.

Перечень ссылок.

1. Артоболевский И.И. .В 7 томах. Том 7. Механизмы в современной технике. Артоболевский Москва "Наука" -1567с.

2.Электронныйресурсhttp://www.nkmz.com/fileadmin/data/prospekts/prospect_nkmz_mnlz.pdf – Сортовые машины неприривного литья заготовок.

3. Целиков А.И. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Том 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник, Ф.К. Иванченко, М.А. Тылкин, А.А. Королев, В.П. Лопухин, Д.А. Сторожик, Б.А. Павленко, А.А. Целиков, И.М. Елинсон, В.И. Зюзин. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия. 1988. – 680 с.

4. Шагающий конвейер нагревательных печей (часть 1). Развитие конструкций и областей применения: Учеб. Пособие / С.В. Белодеденко, Ли Юн – цзинь, В.К. Цапко; Под ред. С.В. Белодеденко. – Днепропетровск: НМетАУ, 2001. – 69 с.

5. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики): Справочник / Под ред. А.Б. Усачева. – М.: «Теплотехник», 2007. – 656 с.

УДК 620.181.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА МЕТОДА ОБЪЕМНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ (ОИЛУ)

И. А. Пинахин, М. А. Ягмуров, С. С. Врублевская, М. А. Шпак
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
г. Ставрополь, Россия

Аннотация. *В данной работе представлен метод объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) и сформулированы основные этапы его механизма. Также в работе подтверждена волновая природа метода ОИЛУ с помощью использования тензометрии и системы LabVIEW*

Annotation. *This paper presents the method of volumetric pulsed laser hardening (VPLS) and formulates the main stages of its mechanism. The work also confirmed the wave nature of the VPLS method using strain gauges and the LabVIEW system*

Ключевые слова: *лазерное упрочнение, твердые сплавы, ударная волна, тензометрия*

Keywords: *laser hardening, hard alloys, shock wave, strain gauge*

В настоящее время в промышленности используется большое количество методов упрочнения конструкционных и инструментальных материалов, которые основаны на различных химических, физических, механических подходах и, как правило, имеют свою приоритетную область применения. Одним из подходов, позволяющих повысить эффективность метода упрочнения, является детальное изучение их механизма, в том числе, и для локальных условий.

В данной работе будет проведен анализ механизма метода объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ), который был разработан в Северо-Кавказском федеральном университете. Данный метод основан на воздействии однократного высокоэнергетического лазерного импульса на упрочняемое изделие (рисунок 1) [1, 2].

В ряде работ [3 – 5] сформулировано условие возникновения и распространения ударной волны в твердом теле за счет воздействия на него лазерного импульса, полученного в режиме модулированной добротности, т. е. имеющего длительность порядка 10^{-8} – 10^{-9} секунд (при этом время воздействия импульса и возникновения ударной волны совпадают) (1):

$$\tau < \frac{d}{c^*_{зв}}, \qquad (1)$$

где d – диаметр луча лазера;

τ – продолжительность импульса;

$c^*_{зв}$ – скорость звука в твердом теле.

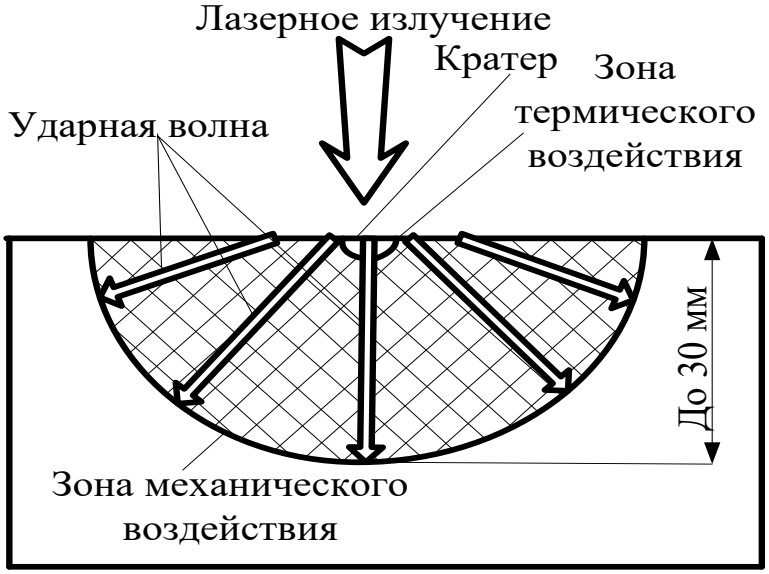


Рисунок 1 – Механизм объемного импульсного лазерного упрочнения

То есть, например, для однокарбидного твердого сплава при диаметре луча лазера d = 2,0 мм и скорости звука в карбиде вольфрама (WC) $c^{*WC}_{зв} = 6220$ м/с продолжительность импульса лазера не должна превышать $3{,}2 \cdot 10^{-7}$ секунд.

В тоже время в литературных источниках мы не обнаружили информации об исследовании возникновения ударной волны в твердом теле при воздействии на него лазерного импульса, созданного в режиме свободной генерации (длительность порядка 10^{-2} – 10^{-3} секунд). Однако, режим свободной генерации позволяет облучать материалы световым импульсом с гораздо большей энергией, чем при режиме модулированной добротности (до 50 раз ли до 20 Дж при модулированной добротности и 1000 Дж при свободной генерации). Следовательно, можно предположить, что возникновение ударной волны в твердом теле при использовании больших энергий светового луча (режим свободной генерации), может происходить за счет перераспределения энергии лазерного импульса в поглощаемую тепловую энергию, которая расходуется на нагрев и испарение материала твердого тела, и избыточную тепловую энергию, которая в свою очередь инициирует возникновение и распространение ударной

волны вглубь твердого тела. При этом время возникновения ударной волны должно происходить с некоторым запаздыванием относительно времени нанесения лазерного импульса. Вышеуказанная величина определялась с помощью тензометрии и синхронизации лабораторной установки по времени с помощью системы LabVIEW. Для проведения эксперимента были использованы образцов с наклеенными на них цепочками тензорезисторов (рисунок 2), которые подвергались лазерному облучению. При определении времени начала распространения ударной волны было установлено, что подтверждается теория о некотором запаздывании возникновения ударной волны (5,0 – 9,0 мс). При этом время запаздывания и характеристики ударной волны зависят от режимов лазерного излучения и на них практически не влияет химический состав материала (рисунок 3).

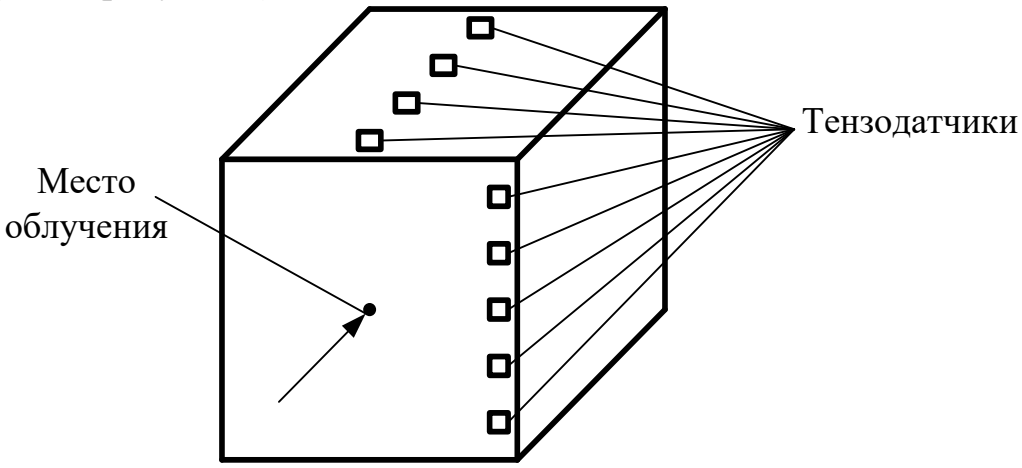


Рисунок 2 – Образец для проведения тензометрии

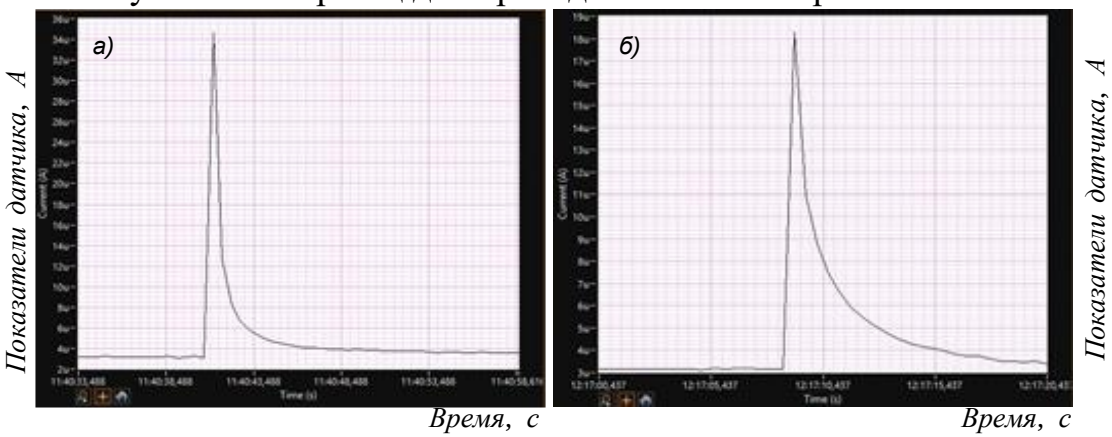


Рисунок 3 – Зависимость распространения ударной волны от времени при ОИЛУ: а – ВК8, E = 380 Дж, d = 8 мм, расстояние от места воздействия лазерного импульса 12 мм; б – Т5К10, E = 200 Дж, d = 2,0 мм, расстояние от места воздействия лазерного импульса 10 мм

Также при помощи эксперимента и системы LabVIEW были определены характеристики ударной затухающей волны для конкретных условий в разных сечениях образцов (рисунок 4).

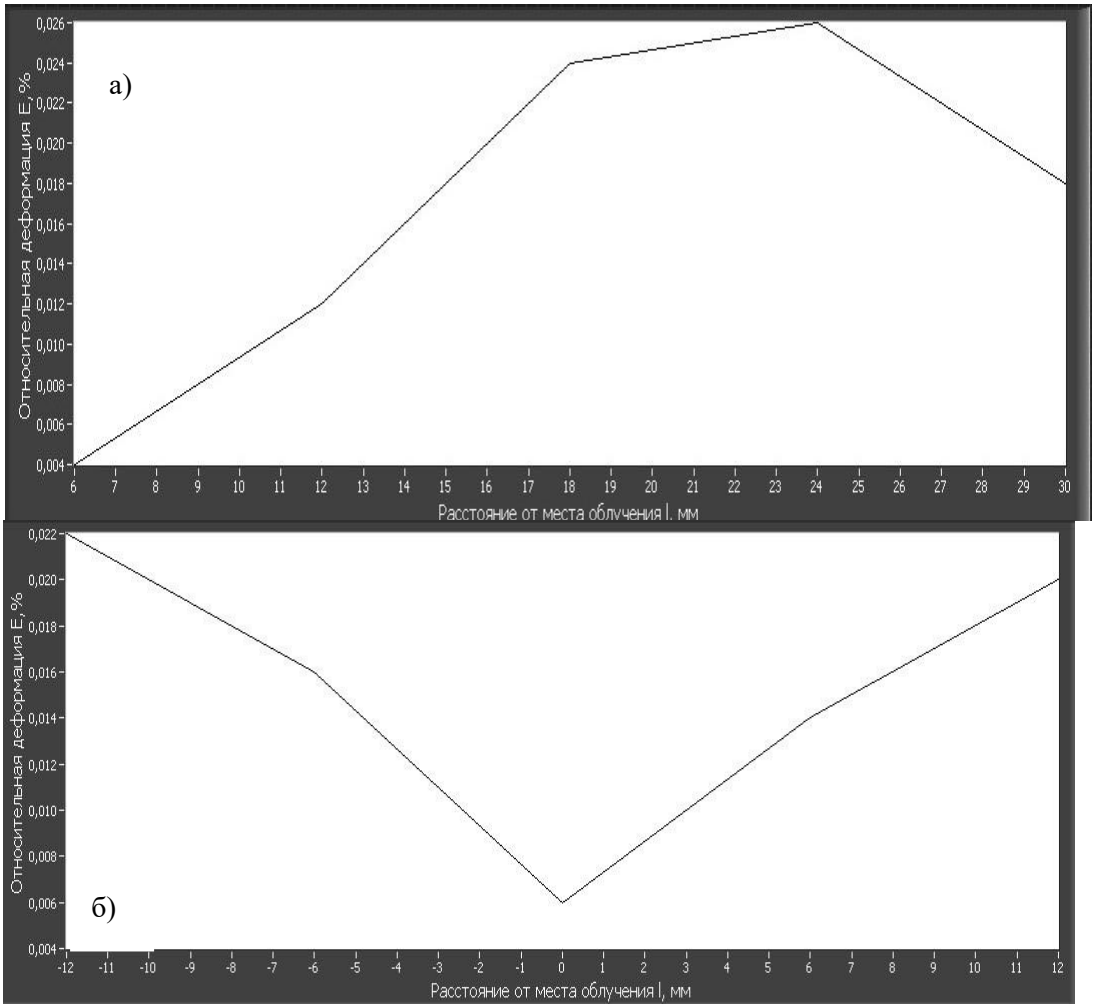


Рисунок 4 – Зависимость величины относительной деформации твердого сплава Т5К10 от расстояния от места облучения (плотность энергии облучения 138 МДж/м^2): а – продольное направление; б – поперечное направление

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в результате воздействия высокоэнергетического лазерного импульса, работающего в режиме свободной генерации, в твердом теле (образцах из твердых сплавов) наблюдается возникновение и распространение ударной волны вглубь этого твердого тела.

2. Выявлено, что наблюдается запаздывание времени начала распространения ударной волны относительно времени нанесения лазерного импульса.

3. Определено, что характеристики и время запаздывания начала распространения ударной волны инициируемой высокоэнергетическим лазерным импульсом в большей мере зависят от режимов лазерного облучения (энергия лазерного облучения, диаметр луча лазера, длительность лазерного импульса) и практически не зависят от химического состава образцов (твердых сплавов).

Перечень ссылок

1. Пинахин И. А., Моради М., Ягмуров М. А., Врублевская С. С., Шпак М. А. Влияние износостойкости твердосплавных режущих инструментов на эффективность технологического процесса при тяжелых условиях резания // Трение и износ. Международный научный журнал. – 2021. – Т. 42, № 6. – С. 717 – 724.

2. Пинахин И. А., Ягмуров М. А., Врублевская С. С., Даржания А. Ю., Шпак М. А. Повышение износостойкости однокарбидных твердых сплавов после объемного импульсного лазерного упрочнения // Трение и износ. Международный научный журнал. – 2020. – Том 41. – №6. – С. 745 – 751.

3. Singh S. P., Singh H., Mahajan P. Interaction of Shock Waves in a Multi-material System // 2022, In book: Recent Advances in Applied Mechanics.

4. Li J., Zhang W., Zhou Yu. The acceleration mechanism of shock wave induced by millisecond-nanosecond combined-pulse laser on silicon // 2021, Plasma Science and Technology, 23(5).

5. Ridoux, J., Lardjane, N., Monasse, L., Coulouvrat, F. Comparison of geometrical shock dynamics and kinematic models for shock-wave propagation. Shock Waves 28, 401 – 416 (2018).

УДК 531.31.15

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ФРАГМЕНТИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, В.И. Рубежанский, М.Э. Левченко, В.Н. Онопченко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *Приведены результаты теоретических исследований возможностей организации многоступенчатого дробления в одновалковой зубчатой дробилке за счёт вертикального развития рабочей зоны камеры дробления.*

Annotation. *The results of theoretical studies of the possibilities of organizing multi-stage crushing in a single-roll gear crusher due to the vertical development of the working area of the crushing chamber are presented.*

Ключевые слова: *дробление, агломерат, одновалковая зубчатая дробилка, консольные колосники.*

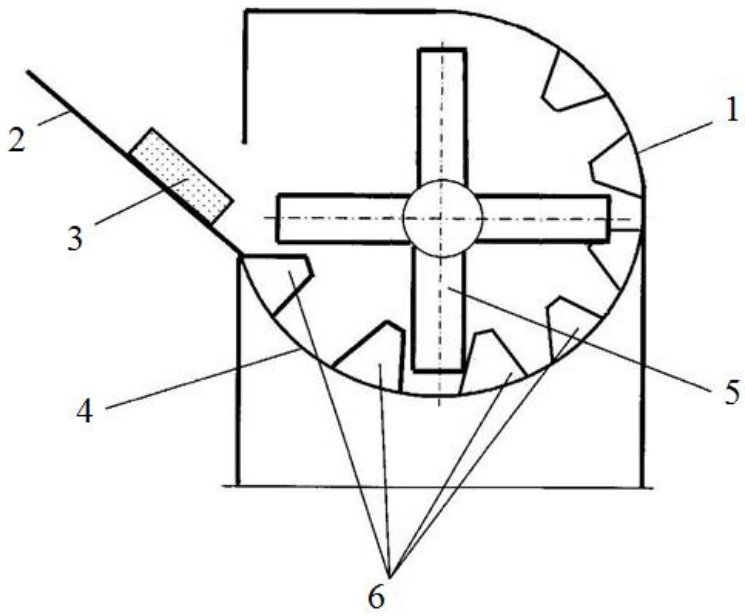
Key words: *crushing, sinter, single-roll gear crusher, cantilever grates.*

Одновалковая зубчатая дробилка, применяемая в агломерационном производстве для получения товарного агломерата, является достаточно распространённым техническим средством фракционирования аглопирога [1]. Наряду со своими основными преимуществами, заключающимися в высокой производительности и относительной простоте конструкции одним из её основных недостатков, является образование кусков сравнительно больших размеров [2]. Поэтому важным направлением совершенствования процесса дробления выступает получение более равномерного гранулометрического состава готового продукта, наилучшим образом удовлетворяющего условиям доменной плавки.

За базовый вариант дробилки принята её типовая конструкция, применяемая в условиях работы агломерационного цеха ООО Южного горно-металлургического комплекса («Алчевский металлургический комбинат».

Исследовалась возможность организации подачи кусков агломерата в верхнюю часть рабочей камеры дробилки применительно к существующим геометрическим размерам консольных колосников, что позволяет организовать в ней процесс

многоступенчатого дробления. Схема многоступенчатой конструкции машины приведена на рисунке 1 [3].



1 – корпус; 2 – направляющая плита; 3 – аглопирог; 4 – колосники-классификаторы; 5 – ротор; 6 – консольные колосники

Рисунок 1 – Многоступенчатая одновалковая зубчатая дробилка

Рассматривалась возможность задействования для организации многоступенчатого дробления консольных колосников верхней части рабочей камеры. При этом подача (подъем) кусков агломерата осуществляется посредством зубьев звёздочек ротора [4].

По результатам математического моделирования такого процесса на основе учёта сил, действующих на кусок и зуб звёздочки в конечном итоге для численных результатов изучения движения куска аглоспека закон движения имеет вид [5]:

$$x = C_1 \cdot e^{(K_1 - b)t} + C_2 \cdot e^{(K_{21} - b)t} + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_1) + B_2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1),$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования; ω – угловая частота вращения ротора; $b = f \cdot \omega$; $K_1 = \omega \cdot \sqrt{1 + f_2}$; $B_1 = \dfrac{q \cdot (1 - f^2)}{2 \cdot \omega^2 \cdot (1 + f^2)}$; $B_1 = \dfrac{q \cdot f}{\omega^2 \cdot (1 + f^2)}$; t – время движения куска по направляющей поверхности зуба звёздочки ротора; f – коэффициент трения агломерата по металлу; α_1 – угол поворота ротора.

В таблице 1 приведены значения координат положения куска агломерата и углов положения плоскости зуба звёздочки ротора в зависимости от времени для различных частот вращения ротора дробилки.

Таблица 1 – Скорости куска и углы положения зуба звёздочки

	n=6 об/мин; *f*=0,5			*n*=12 об/мин; *f*=0,5				*n*=6 об/мин; *f*=0,364		
t, с	*x*, м	*φ*, °	$\dot{x}$, м/с	*t*, с	*x*, м	*φ*, °	$\dot{x}$, м/с	*t*, с	$\dot{x}$, м	*φ*, °
0	0,6	27,799	0	0	0,6	31,518	0	0	0,6	21,302
0,1	0,5577	31,399	-0,8603	0,1	0,5584	38,712	-0,8204	0,1	0,5657	24,902
0,2	0,4299	34,999	-2,2170	0,2	0,4368	45,918	-1,6098	0,2	0,4648	32,102

При базовом варианте работы дробилки угловая скорость вращения ротора ω=0,6283 с$^{-1}$ (частота вращения *n*=6 об/мин).

Выявлено влияние коэффициента трения агломерата о плоскость зуба на процесс дробления. Отметим, что при коэффициенте трения *f*=0,364 (отличном от базового) зона дробления становится равной α=40,004° и рабочая область дробления расширяется из-за более медленного сползания куска агломерата к оси ротора. Это замедление определяется величиной переменной силы инерции $F_{пер}^{ин} = \omega^2 \cdot x$ по отношению к силе трения.

Найдено влияние расположения куска агломерата в начальный момент времени на прогнозируемое его дробление с участием консольных колосников (рис. 1).

Таким образом схему многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки можно представить в виде:

1 – зона, в которой куски агломерата всегда попадут в рабочую область дробления (ширина рабочей области, зависящая от размеров по высоте консольных колосников).

2 – зона относительного покоя куска агломерата на плоскости зубазвездочки.

3 – расширенная зона дробления.

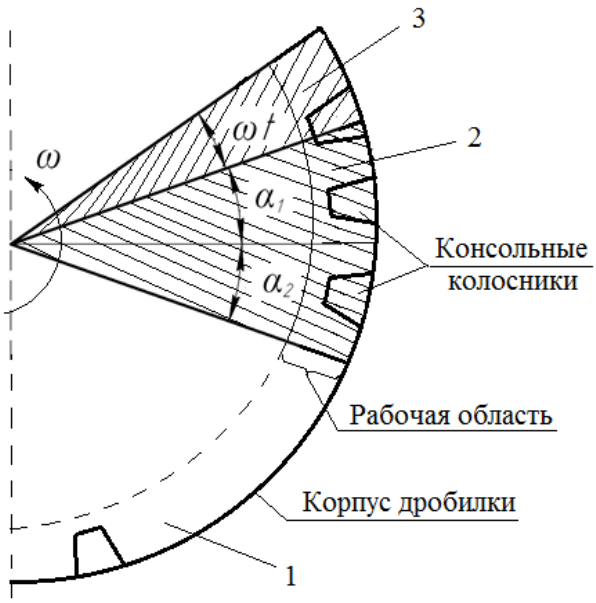


Рисунок 2 – Зоны дробления

При увеличении частототы вращения ротора в два раза n=12 об/мин от базового варианта, зона относительного покоя куска агломерата практически остаётся неизменной и составляет 53,13º, но её положение смещается в сторону вращения ротора. Следовательно, зона дробления расширяется.

Полученные результаты подтверждают возможность организации многоступенчатой схемы дробления агломерата на основе имеющихся конструктивных особенностей одновалковой зубчатой дробилки.

Перечень ссылок

1. Левченко О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата]: монография / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко и др. — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — 190 с.

2. Власенко Д. А. Развитие научных основ и практика повышения эффективности процессов дробления в роторных зубчатых дробилках: монография / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко. — Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2022. — 143 с.

3. Левченко Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-летней изобретательской деятельности) [Текст]: монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — 353 с.

4. Мороз В. В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки / В.В. Мороз, Э. П. Левченко, В. И. Рубежанский // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып 5 (50). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 153–157.

5. Мороз В. В. Оценка и уточнение условий подачи аглоспека в рабочую зону одновалковой зубчатой дробилки / Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 9 (52). —– Алчевск: ДонГТУ, 2018. — С. 142–148.

УДК 531.31.15

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИКИ

А.Н. Тумин, А.М. Зинченко, Э.П. Левченко, В.Н. Онопченко,
Ф.А. Грунис, Л.Э. Кучеренко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *Приведены результаты разработки методики определения основных параметров фрезерных станков для металлообработки различных деталей на основе применения гидропривода.*

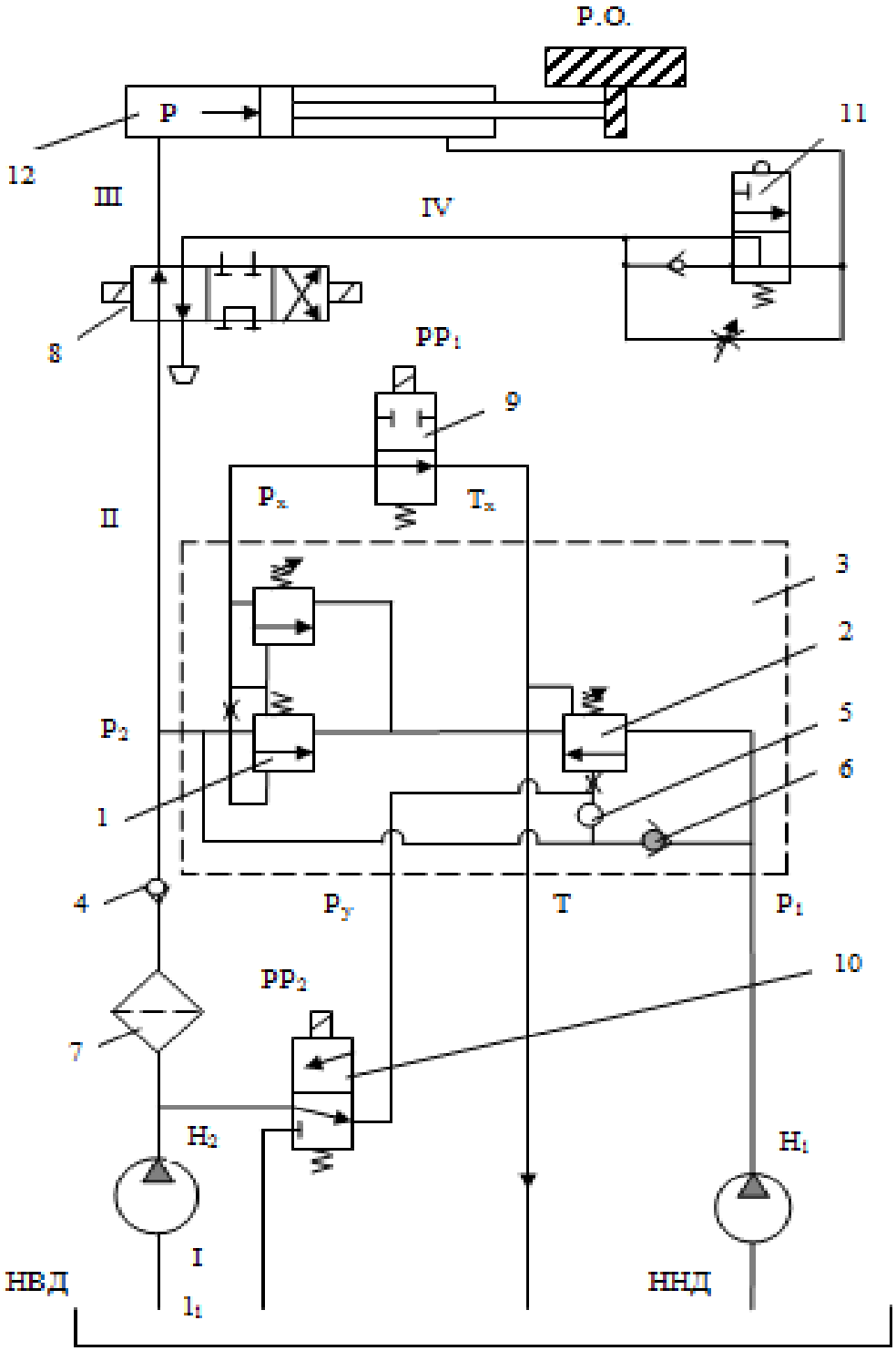
Annotation. *The results of the development of a methodology for determining the main parameters of milling machines for metalworking of various parts based on the use of a hydraulic drive are presented.*

Ключевые слова: *фрезерный станок, металлообработка, гидропривод, повышение эффективности.*

Key words: *crushing, sinter, single-roll gear crusher, cantilever grates.*

В широко используемых металлорежущих станках, в том числе и для фрезерной обработки, гидроприводы в основном служат для осуществления движения механизмам подачи и зажимов. Однако, возможно применение гидропривода и для задания главного движения в качестве поступательного или вращательного движения.

Гидропривод позволяет в большом диапазоне варьировать скорость движения рабочих органов станка, отличается быстротой срабатывания и обеспечивает плавность движения [1]. При этом сравнительно небольшой по размерам гидродвигатель обеспечивает значительные усилия, а также допускает частое реверсирование движений механизмов станка и имеет возможность дистанционного и автоматического управления. Прямолинейное и вращательное движение органов станка совершается непосредственно от гидродвигателя или через простейшие преобразующие механизмы (рейка-шестерня, кривошипно-шатунный механизм). Органы станка с гидродвигателями не испытывают перегрузки, что увеличивает срок их эксплуатации. В современных станках фрезерной группы применяются гидроприводы подач, гидравлические и электрогидравлические копировальные устройства, а также вспомогательных механизмов. Гидравлическая схема вертикально-фрезерного станка показана на рисунке 1.



1 – предохранительный клапан высокого давления; 2 – предохранительный клапан низкого давления; 3 – разделительная панель типа Г53-2; 4, 6 – обратные клапаны; 5 – отверстие для разгрузки насоса H_1; 7 – фильтр; 8 – гидравлический распределитель; 9,10 – распределители разгрузки насосов дистанционно; (PP_1 и PP_2); 11 – регулятор расхода с обратным клапаном типа ПГ55-62

Рисунок 1 – Гидравлическая схема вертикального фрезерного станка

При ускоренных перемещениях рабочих органов масло поступает в систему от двух насосов, а при рабочих подачах от насоса H_1. При необходимости дистанционной нагрузки обоих насосов, линия P_x через срез PP_1 соединяется с линией T_x.

В гидравлической схеме используется разделительная гидропанель типа Т 53-2.

Выходная мощность гидропривода подачи определяется по формуле [2, 3]:

$$N = f_{\max} \cdot V_{\max}, \text{ кВт;} \quad (1)$$

где f_{max} – максимальное усилие на рабочем органе;

V_{max} – максимальная скорость его движения.

Согласно [2] для полученной мощности гидропривода величина номинального рабочего давления равна $P_н$=20 МПа.

Действительное давление в гидроцилиндре составит:

$$P_д = \frac{4 f_{\max}}{\pi\left(D^2 - d_{шт}^2\right)\eta_{гу}}, \text{ МПа,} \quad (2)$$

где D – рабочий диаметр гидроцилиндра:

$d_{шт}$ – диаметр штока;

$\eta_{гу}$ – коэффициент полезного действия гидроусилителя.

Максимальный расход, потребляемый гидроцилиндром:

$$Q_{\max} = \frac{\pi\left(D^2 - d_{шт}^2\right)}{4} \cdot \frac{V_{\max}}{\eta_{гу}}, \text{ л/мин.} \quad (3)$$

Мощность, потребляемая гидроцилиндром:

$$N_{вх} = \frac{N_{вых}}{\eta_{гу}}, \text{ кВт,} \quad (4)$$

где $N_{вых}$ – выходная мощность гидроцилиндра;

Полезная мощность насоса:

$$N_н = K_c \cdot K_y \cdot N_{вх}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где K_c=2,3 – коэффициент запаса на скорости;
K_y=1,2 – коэффициент запаса на усиление.

Полезная мощность насоса определяется гидравлической мощностью насоса потока рабочей жидкости на его выходе:

$$N_п = p \cdot Q, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где: Q – подача насоса, м^3/с;
P – давление на выходе из насоса, Па.

На практике удобно определять полезную мощность насоса по следующим формулам:

$$N_п = 10^{-3} \cdot P \cdot Q, \text{ кВт}. \quad (7)$$

Предпочтительным является применение пластинчатого насоса типа 12БГ [3], основными параметрами которого являются рабочий объем $q_н$ (см^3/об); номинальная подача Q (мин); номинальное давление $P_{н.ном}$ (МПа); номинальная мощность $N_{н.ном}$ (кВт); полный КПД; объёмный КПД $\eta_{но}$.

Таким образом, приведенная методика позволяет определить основополагающие параметры гидравлического привода фрезерного станка и может быть использована по аналогии для расчёта иных видов станков различной мощности. Замена электропривода на гидропривод позволяет существенно улучшить силовые и кинематические возможности фрезерных станков.

Управление гидроусилителем (золотником) осуществляется электромеханическим преобразователем электродинамического типа. Преобразователь электродинамического типа имеет две степени свободы: движение управляющей катушки в воздушном зазоре и изменение тока в её обмотках. Для первой степени свободы уравнение сил, действующих на подвижную систему:

$$m \cdot \frac{d^2 x_y}{dt^2} + h \cdot \frac{dx_y}{dt} + cx_y = k_1 \cdot i_y. \quad (8)$$

где m – масса подвижной системы;

h – коэффициент вязкого трения подвижных частей преобразователя;

с – жёсткость центрирующих пружин;

k_i – крутизна тяговой характеристики преобразователя;

i_y – ток управления.

Для второй степени свободы справедливо уравнение:

$$L \cdot \frac{di_y}{dt} + R \cdot i_y = U \,, \tag{9}$$

где L – коэффициент самоиндукции катушки управления;

R – сопротивление обмотки;

U – входное напряжение.

Таким образом, приведенная схема позволяет определить основополагающие параметры гидравлического привода фрезерного станка и может быть использована по аналогии для расчёта иных видов станков различной мощности. Замена электропривода на гидропривод позволяет существенно улучшить силовые и кинематические возможности лезвийной обработки металлов.

Перечень ссылок

1. Ватулин И.А. Определение основных параметров гидропривода фрезерного станка / И. А. Ватклин, Н. Ф. Брожко, Э. П. Левченко // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. — Вып. 10. Ч.1.. — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 133–136.

2. Полякова Л.Е. Гидравлический расчёт объёмного гидропривода / Л.Е. Полякова, С.С. Ямпилов, В.Г. Блекус и др. — Улан-Уде: Изд-во ВСГТУ, 2002. — 20 с.

3. Левченко Э. П. Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин: учебник: учебник / Э. П. Левченко, А. Т. Тумин, В. Г. Чебан и др. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2022. — 316 с.

4. Зайченко И.З. Пластинчатые насосы и гидромоторы / И.З. Зайченко, Л.М. Мышлевский. — М.: Машиностроение, 1970. — 229 с.

УДК 669.06

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКОВЫХ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИН С КОМБИНИРОВАННЫМ ДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛ

Э.П. Левченко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *Рассмотрены перспективы применения дисковых дробильных машин комбинированного действия в металлургической отрасли для переработки отходов огнеупорного сырья с последующим использованием для собственных нужд.*

Annotation. *The prospects for the use of combined-action disc crushing machines in the metallurgical industry for processing waste refractory raw materials with subsequent use for their own needs are considered.*

Ключевые слова: *дробление, измельчение, дисковая машина, комбинированное действие на материал, фракционный состав, энергозатраты, производительность.*

Key words: *crushing, grinding, disk machine, combined effect on the material, fractional composition, energy consumption, productivity*

Общеизвестно, что в целом на диспергирование (дробление и измельчение) различных полезных ископаемых в мировых масштабах затрачивается примерно 10 % электрической энергии, вырабатываемой на земном шаре. Это является существенным резервом совершенствования парка дробильно-измельчительного оборудования с целью дальнейшего повышения его эффективности и снижения энергозатрат [1].

Основополагающими техническими характеристиками проектируемых дробильно-измельчительных машин являются крупность исходного и готового продуктов, степень измельчения, энергозатраты и производительность. Ввиду того, что зачастую необходимо получать готовый продукт мелких фракций при высокой степени измельчения, энергозатраты при этом резко возрастают, а производительность наоборот падает.

Как правило для уменьшения степени дробления необходимо последовательное применение различных машин для предварительно дробления и последующего измельчения, когда дробление происходит, если готовый продукт имеет крупность больше 5 мм, а измельчение – меньше 5 мм [2].

Одним из вариантов совмещения в одной машине обоих процессов фракционирования сырья могут выступать дробильно-измельчительные машины комбинированного действия, характеризующиеся удельными энергозатрами от 3 до 10–12 кВтч/т [3].

Ориентировочный диапазон рассматриваемых процессов путём сравнения различных машин, применяемых в металлургической отрасти показан на рисунке 1.

Рисунок 1 – Сравнительный диапазон процессов диспергирования в различных дробильно-измельчительных машинах

Характерный удельных расход электроэнергии на тонну перерабатываемого материала (степени измельчения) этими машинами приведен в таблице 1.

Таким образом дисковые машины комбинированного действия обеспечивают расширенный диапазон снижения крупности и могут заменить последовательную переработку материалов в нескольких машинах иных типов одновременно обеспечивая экономию энергии, т.к. оба процесса здесь осуществляются одномоментно. Это способствует увеличению производительности, повышению качества готового продукта и снижению себестоимости получаемых материалов [4, 5].

Таблица 1 – Удельные энергозатраты электроэнергии (степень измельчения)

Вид машины	Удельные энергозатраты, кВтч/т (степень измельчения)					
	0(5)	10(25)	20(50)	30(75)	40(100)	50,0(>100)
Щековая						
Одновалковая зубчатя						
Гладковлковая						
Разгонно-ударная						
Молотковая						
Барабанная						
Дисковая						
ДИМ комбинированного действия						

Это способствует увеличению производительности, повышению качества готового продукта и снижению себестоимости получаемых материалов.

Промышленные испытания опытного образца ДИМ–2250 на Алчевском металлургическом комбинате показали, что крупность готового продукта характеризуется аппроксимируемыми уравнениями:

для железной руды:

$$y_{жр}^{2250} = 19{,}4 \cdot \lg x + 56{,}95$$

$$R_{жр}^{2250} = 0{,}86 \quad ;$$

для известняка:

$$y_{из}^{2250} = 16{,}0 \cdot \lg x + 67{,}90$$

$$R_{из}^{2250} = 0{,}849;$$

для хромомагнезита:

$$y_{из}^{2250} = 19{,}37 \cdot \lg x + 67{,}0$$

$$R_{из}^{2250} = 0{,}96.$$

Методом микроскопии установлено, что форма зёрен частиц готового продукта представляет собой многогранниками с острыми краями, характерными для раскалывающих усилий и очень низком

воздействии истирания. Косвенным путём это подтверждается и незначительным количеством мелких (до 0,16 мм) фракций, при этом удельные энергозатраты составляют от 7 до 9 кВт/ч т. В условиях металлургического производства применение таких машин позволяет перерабатывать отходы огнеупорных материалов для их вторичного использования при производительности около 12 т/ч и диаметре рабочего органа (диска) 2250 мм.

Перечень ссылок

1. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И. А. Тангаев. — М.: Недра, 1986. — 231 с.

2. Власенко Д. А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, А.П. Жильцов и др. — Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2023. — 142 с.

3. Левченко Э.П. Исследования принципа комбинированного воздействия на материал в дисковых дробильно-измельчительных машинах /Э.П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 73. — Алчевск: ДонГТУ, 2023. — С. 99–104.

4. Левченко Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-летней изобретательской деятельности): монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — 353 с.

5. Левченко, О. А. Комбинированные дробильно-измельчительные машины и возможности их применения для измельчения отходов шамотного кирпича / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 33. — Алчевск, 2011. — С. 171–179.

УДК 669

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

К.В. Строгонов, Д.Д. Львов, В.А. Мурашов, А.К. Бастынец
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва

Аннотация. *Работа посвящена актуальному вопросу внедоменного восстановления железа, представлены модели и результаты численного моделирования отдельных элементов разрабатываемого реактора жидкофазного восстановления и вакууматора для создания сталеплавильного агрегата непрерывного действия.*
Annotation. *The work is devoted to the topical issue of non-domain iron reduction, models and results of numerical modeling of individual elements of a liquid-phase reduction reactor and a vacuum cleaner under development to create a continuous steelmaking unit are presented.*
Ключевые слова: *восстановление железа, барботаж, вакуумирование стали*
Keywords: *iron recovery, bubbling, steel vacuuming*

Актуальность создания новых процессов внедоменного восстановления железа и сталеплавильных агрегатов непрерывного действия обосновывается в ряде работ [1-3].

Восстановлениерасплава железа предлагается осуществлять углеродводородной смесью, которая образуется в расплаве восстанавливаемого железа [4]. Предварительный нагрев метана и попадание его в расплав с температурой 1600°С без доступа кислорода, обеспечивает процесс пиролиза.

Важным является подготовка метана к пиролизу, его подогрев и этот процесс предлагается выполнять, пропуская метан через перфорированное ограждение реактора.

Созданы физическая и численные модели для исследования процессов теплообмена в перфорированном поду (рисунок 1), верификация численной модели проводилась по результатам исследований на физической модели.

Для выполнения экспериментов и фиксации температур к установке были подключены термопары, показания с которых фиксировались компьютером. На рисунке 1 представлен внешний вид работающей установки, в период проведения эксперимента.

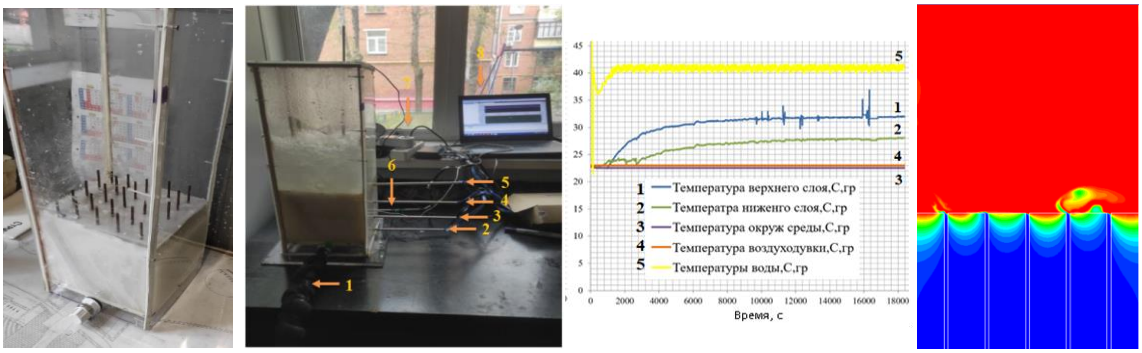


Рисунок 1– Модели для исследования теплообмена в перфорированном поду

Термопарами обозначенными номерами 3, 4, 5 измерялась температура перфорированного пода по высоте. Измерение температуры воздуха осуществлялось термопарой, обозначенной цифрой 6. Терморегулятор (цифра 7) и подключенный через него нагревательный элемент, обеспечивает поддержание температуры воды благодаря термопаре, расположенной в моделирующей расплав воде. Цифрой 8 обозначен компьютер с подключенными термопарами через прибор ADVANTECH, который в реальном времени производил фиксацию измерений.

Для исследований теплообмена в проектируемой установки применялся метод VOF (volumeoffluid), который описывается дифференциальными уравнениями сохранения энергии, импульса и массы:

$$\frac{a_q^{n+1}\cdot\rho_q^{n+1}-a_q^{n}\cdot\rho_q^{n}}{\Delta t}\cdot V+\sum_f\left(\rho_q^{n+1}\cdot U_f^{n+1}\cdot a_{q,f}^{n+1}\right)=0;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\cdot\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\cdot\vec{v}\cdot\vec{v})=-\nabla\cdot p+\nabla\cdot[\mu\cdot(\nabla\vec{v}+\nabla\vec{v}^T)]+\rho\cdot\bar{g}+\bar{F};$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\cdot E)+\nabla\cdot\left(\vec{v}\cdot(\rho\cdot E+p)\right)=\nabla\cdot\left(k_{eff}\cdot\nabla T\right)+S_h;$$

где a_q – объемная доля среды в ячейке; ρ_q – плотность среды q, кг/м^3; $\vec{v}_q$ – скорость среды q, м/с; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения, м/с^2; $\vec{R}_{pq}$ – сила поверхностного натяжения между фазами, Н; $\vec{F}_q$ – сила внешнего воздействия, Н; $\vec{F}_{lift,q}$ – сила Архимеда, Н; $\vec{F}_{td,q}$ – сила турбулентного рассеивания, Н; h_q – энтальпия среды q, Дж/кг; $\overline{q_q}$ – тепловой поток, Вт/м^2; Q_{pq} – теплоотдача между фазами p и q, Вт/(м^2·К);U_f^{n+1} – объемный расход через ячейку, м^3/с; V –объем ячейки, м^3; E – усредненная по массе энергия, Дж; k_{eff} – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; S_h –энергия излучения, Дж.

По результатам моделирования (рисунок 2) определено, что

необходимая скорость подачи природного газа на входе в канал должна быть равна 5 м/с, в данном случае наблюдается допустимая температура метана на выходе из канала, которая не превышает 480°С, что обеспечивает безопасную работу перфорированного пода.

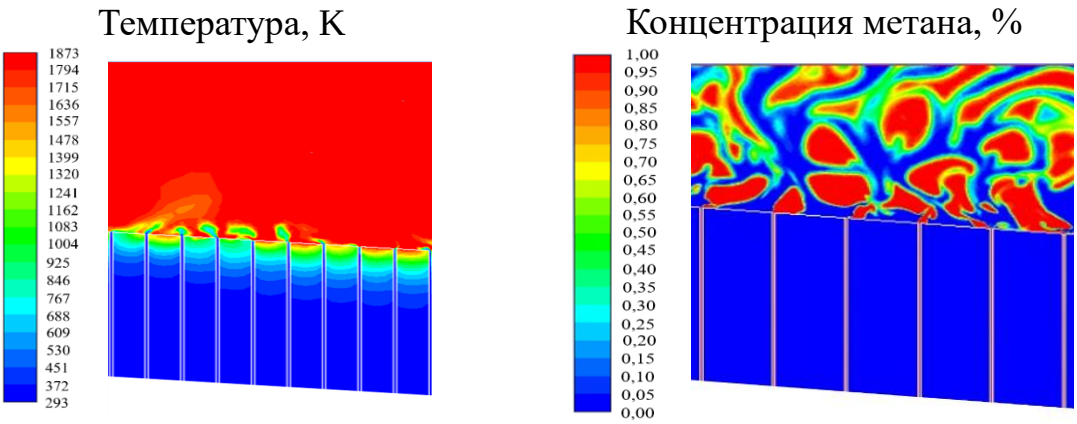
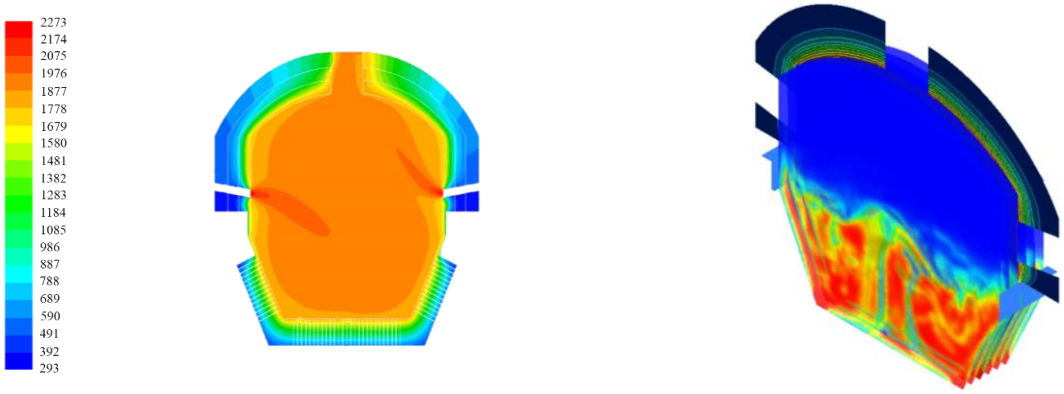


Рисунок 2– Модели для исследования теплообмена в перфорированном поду

Исследования показали, что перфорированный под, выполненный из периклазохромита, имеет среднюю по толщине температуру 280°С, при этом температура на поверхности со стороны расплава не превышает 1315°С, что существенно ниже температуры размягчения огнеупорного материала, равной 1550°С, и значительно ниже температуры плавления, равной 2800°С. Такие условия работы огнеупорного ограждения должны обеспечить высокую стойкость перфорированного пода.



а) в двумерной постановке б) в 3-х мерной постановке

Рисунок 3 – Результаты численного моделирования рабочего пространства реактора жидкофазного восстановления: а – распределение температуры; б – распределение жидкой и газовой фазы в реакторе и температур в многослойной футеровке

Для прогнозирования распределения расплава в реакторе при различных расходах подачи метана и окислителя, а также для определения температур в огнеупорных ограждениях в программном комплексе ANSYS создана модель в двумерной и трехмерной постановке. Результаты численного моделирования процесса барботажа и распределения температур в реакторе жидкофазного восстановления представлены на рисунке 3.

Проведенные аналитические расчеты позволили определить время дегазации расплава (рисунок 4) при различных давлениях (разряжениях, наиболее часто применяемых на производстве), что позволяет определять габариты вакууматора в зависимости от заданной производительности. Представлены результаты численного моделирования предлагаемого вакууматора (рисунок 5), модель позволяет рассчитывать снижение температуры расплава в процессе вакуумирования и определять тепловой поток с поверхности вакууматора.

В непрерывно выпускаемый расплав железа предполагается подача легирующих материалов для получения заданной марки стали, при этом технологическое решение подразумевает стопроцентное вакуумирование стали в П-образном вакууматоре [5]. Проведенные аналитические расчеты позволили определить время дегазации расплава (рисунок 4) при различных давлениях (разряжениях, наиболее часто применяемых на производстве), что позволяет определять габариты вакууматора в зависимости от заданной производительности. Представлены результаты численного моделирования предлагаемого вакууматора (рисунок 5), модель позволяет рассчитывать снижение температуры расплава в процессе вакуумирования и определять тепловой поток с поверхности вакууматора.

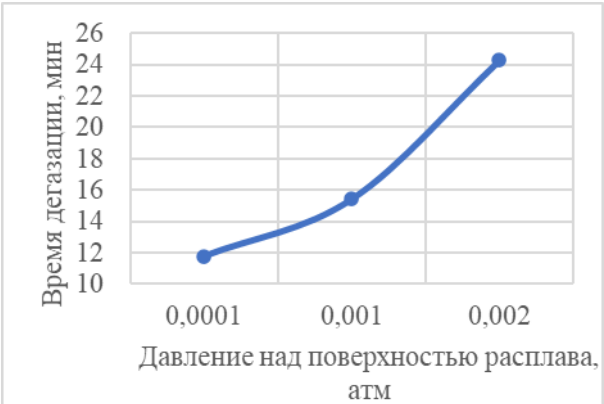


Рисунок 4 – Время дегазации от давления над расплавом

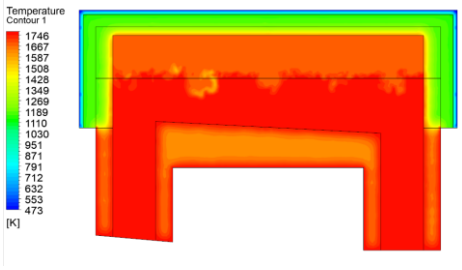


Рисунок 5 – Температурное поле в П-образном вакууматоре

Результаты расчетов в стационарной постановке:

- снижение температуры расплава в процессе вакуумирования менее 5 °С;
- тепловой поток с поверхности вакууматора 1612 Вт/м^2.

Разработанные модели являются этапом к созданию сталеплавильного агрегата непрерывного действия.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование конструктивных решений для использования водорода и повышения эффективности процесса восстановления железа при производстве стали» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022-2024 гг.

Выводы

Создана физическая модель перфорированного пода, позволившая верифицировать математическую модель и получить результаты по подбору скорости движения метана в каналах перфорированного пода, разрабатываемого реактора.

Созданы численные модели реактора жидкофазного восстановления, позволяющие оценить процесс барботажа и распределение температуры в высокотемпературных ограждениях.

Создана численная модель П-образного вакууматора, позволяющая оценить снижение температуры расплава во время вакуумирования.

Перечень ссылок

1. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы получения металла (металлургия железа): Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1994. – 320 с.
2. Непрерывные сталеплавильные процессы / А.М. Бигеев. – М.: Металлургия, 1986. – 136 с.
3. Непрерывный сталеплавильный процесс / Иванцов Г.П., Василивицкий А.В., Смирнов В.И. – М.: Металлургия, 1967. – 146 с.
4. Жидкофазное восстановление железных руд углеродводородной смесью и водородом / К.В. Строгонов, А.Л. Петелин, А.Ю. Терехова, Д.Д. Львов, В.А. Мурашов, А.А. Борисов // Промышленная энергетика. – 2023. – No 8. – С. 43 – 49.
5. Мурашов, В.А. Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия / В.А. Мурашов, К.В. Строгонов, А.А. Борисов, Д.Д. Львов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринггеоресурсов. – 2024. – Т. 335. – No 1. – С. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4154.

УДК 669.14

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ КОВШОВЫХ КАССЕТНЫХ ЗАТВОРОВ

С.П. Еронько[1], С.М. Горбатюк[2], О.А. Кобелев[2], И.С. Погорелов[2]
[1] ФГБОУ ВО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР
[2] ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва, РФ

Аннотация. *Приведено описание конструкций и результаты модельных исследований вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения операций, связанных с подготовкой к работе и обслуживанием шиберных ковшовых затворов. Применение разработки позволит улучшить условия труда рабочих разливочных участков сталеплавильных цехов.*

Annotation. *A description of the designs and the results of model studies of auxiliary devices designed to perform operations related to the preparation for operation and maintenance of bucket gate valves are given. The use of the development will improve the working conditions of workers in the casting sections of steelmaking shops.*

Ключевые слова: *сталеразливочный ковш, шиберный кассетный затвор, огнеупорные изделия, стартовая смесь, защитная труба.*

Keywords: *steel-casting ladle, slide cassette gate, refractory products, starter mixture, protective pipe.*

Применение сталеразливочных ковшей, оборудованных шиберными затворами, предполагает выполнение ряда операций, связанных с их обслуживанием и эксплуатацией (периодическая замена отработанного комплекта огнеупорных изделий самого затвора; заполнение канала разливочного стакана специальной порошковой смесью при каждой подготовке ковша к приему жидкой стали очередной плавки; перемещение в пространстве и пристыковка к стакану-коллектору затвора в процессе разливки огнеупорной трубы, предназначенной для защиты металла от вторичного окисления).

Для облегчения условий работы персонала, обслуживающего сталеразливочные ковши и их шиберные затворы, начаты работы по созданию комплекса вспомогательного оборудования отечественного производства.

С учетом имеющегося опыта в данной области исследований, авторами предложена конструкция модернизированного манипулятора для механизированной замены огнеупорных элементов разливочной системы ковша, которая схематично показана на рис. 1.

Он включает основание в виде квадратной металлической пластины с массивной цилиндрической тумбой 2, удерживающей опорный шарикоподшипник 3 и жестко закрепленный соосно с ним вертикальный стержень 4. На подшипник опирается диск 5 с наружным зубчатым венцом, несущий четырехгранную пустотелую колонну 7, центрируемую относительно стержня 4 и имеющую возможность вращения на нем совместно с диском благодаря наличию двух подшипников скольжения 6. Вращательное движение колонны совместно с диском обеспечивается приводом 1, включающим гидродвигатель, понижающий редуктор с закрепленной на хвостовике его тихоходного вала зубчатой шестерней, которая находится в зацеплении с венцом диска 5. На верхней части пустотелой колонны с помощью шарниров закреплены две пары несущих рычагов 9 и 11, удерживающих на осях вертикальную подшипниковую обойму 12 и образующих совместно с нею параллелограммный механизм, позволяющий реализовать ее плоскопараллельное перемещений в вертикальной плоскости. Поворот рычагов 9 и 11 на требуемый угол обеспечивает гидроцилиндр 8, нижняя часть корпуса которого посредством проушины шарнирно закреплена на колонне, а шток с помощью оси связан с нижней парой рычагов 9 параллелограммного механизма. Для снижения нагрузки, преодолеваемой гидроцилиндром 8, рычажный механизм манипулятора уравновешен за счет контргруза 10, закрепленного на горизонтальной оси, которая соединяет задние концы нижней пары рычагов 9. В вертикальной обойме 12 в двух подшипниках скольжения установлена ось, к нижней части которой жестко прикреплен задний конец консоли 13. На своем переднем конце консоль несет шарнирную опору 14 с поворотной осью, удерживающей нижней частью подвеску 15, внутри которой размещен гидравлический механизм 16, предназначенный для извлечения отработанного разливочного стакана из гнездового блока ковша [1].

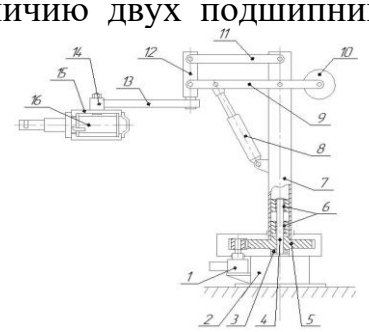
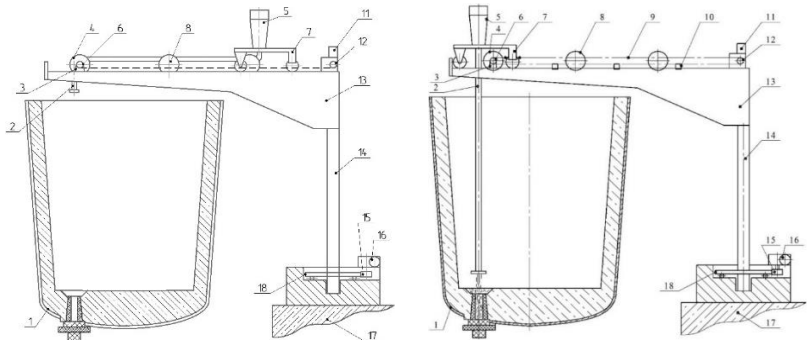


Рисунок 1 - Модернизированный манипулятор для обслуживания кассетных ковшовых затворов

Как известно, с целью предотвращения попадания жидкой стали в канал разливочного стакана и верхней огнеупорной плиты во время заполнения ковша металлом при выпуске плавки, перед каждой

разливкой осуществляют засыпку канала специальной (стартовой) смесью - порошкообразным или мелкозернистым материалом. Подачу стартовой смеси в канал разливочного стакана после завершения подготовки к работе ковшового затвора в настоящее время, как правило, осуществляют вручную снизу или сверху с использованием специальных приспособлений и устройств. С учетом этого была разработана система (рис. 2), позволяющая не только механизировать процесс заполнения канала разливочного стакана



а *б*

Рисунок 2 – Предложенная система механизированной подачи стартовой смеси в выпускной канал сталеразливочного ковша в исходном (*а*) и рабочем (*б*) положениях

стартовой смесью, но и устранить ее потери. В ее состав входит поворотная колонна 14, установленная на основании 17 и несущая консоль, выполненную из двух балок 13, жестко связанных поперечиной 3. Вдоль балок расположены направляющие для колесных пар подвижной тележки 7, поддерживающей бункер 5 с прикрепленным к его нижней части гибким металлорукавом 2. Привод перемещения тележки, состоящий из реверсивного червячного мотор-редуктора 11 с закрепленной на его выходном валу ведущей звездочкой 12, посредством пластинчатой цепи 9 передает через ведомую звездочку 6 вращение валу, установленному в подшипниковых опорах на поперечине 3. При этом пластинчатая цепь, обвивающая звездочки 6 и 12, своими концами связана с рамой тележки с помощью натяжных винтов и сообщает ей поступательное движение по направляющим вдоль консоли. Для поворота всей системы относительно сталеразливочного ковша 1 служит электромеханический привод, состоящий из червячного мотор-редуктора 16 с вертикальным валом, на хвостовике которого закреплена прямозубая шестерня 15, находящаяся в зацеплении с зубчатым венцом опорного диска 18, удерживающего поворотную

колонну 14. Система размещается на участке обслуживания сталеразливочных ковшей и функционирует следующим образом. Сталеразливочный ковш устанавливают краном в обозначенном месте возле поворотной колонны при отведенной в сторону консоли и находящейся в исходном положении тележки с заполненным бункером. Затем колонну поворачивают на требуемый угол и останавливают с таким расчетом, чтобы продольная ось симметрии консоли проходила над центром выпускного канала ковша (рис. 2 *а*). Далее с помощью цепного привода тележку переводят в рабочую позицию. Во время поступательного движения тележки синхронно с нею перемещается гибкий металлорукав и в момент ее перехода в рабочую позицию он выпрямится и займет вертикальное положение, образуя вертикальный подающий тракт (рис. 2 *б*), по которому стартовая смесь, обладающая высокой текучестью, самотеком поступает из бункера в канал разливочного стакана [2, 3].

Для прижатия защитной трубы к нижней части стакана-коллектора шиберного затвора, надежного удержания в рабочей позиции и периодической ее замены в условиях серийной разливки применяют специальные манипуляторы различного конструктивного исполнения. На рис. 3 схематично показана разработанная авторами

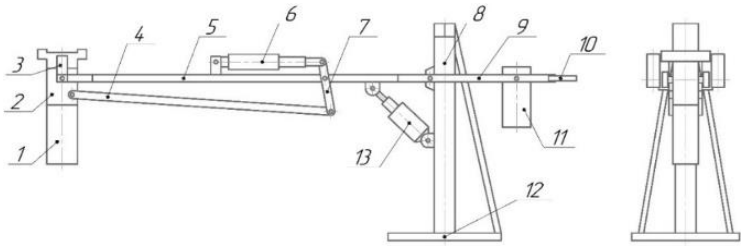


Рисунок 3 – Конструктивное исполнение модернизированного манипулятора

конструкция манипулятора, при эксплуатации которого обеспечивается возможность снижения интенсивности процесса зарастания канала удерживаемой им защитной огнеупорной трубы путем воздействия на нее вибрации. Манипулятор включает установленную на монтажной плите 12 поворотную колонну 8, несущую консольную штангу 5, которая может поворачиваться в вертикальной плоскости с помощью пневмоцилиндра 13. Штанга снабжена вилкой, на цапфах которой размещена гильза 2 для удержания огнеупорной трубы 1. Гильза посредством тяги 4 и двуплечего рычага 7 с помощью второго пневмоцилиндра 6 имеет возможность поворота в вертикальной плоскости относительно штанги на угол 90°, т.е. занимать горизонтальное положение. С

целью снижения нагрузки на пневмоцилиндр 13, осуществляющего поворот в вертикальной плоскости консольной штанги 5, применили ее уравновешивание за счет крепления к ней двух рычагов 9, снабженных рукоятками 10 и удерживающих на цапфах цилиндрическую подвеску 11, несущую комплект грузов [4, 5]. Для обеспечения во время разливки стали внешнего вибрационного воздействия на защитную огнеупорную трубу 1 на цапфах, удерживающих гильзу 2, жестко закреплены два пневматических вибратора направленного действия поршневого типа 3. В качестве энергоносителя, обеспечивающего функционирование вибраторов, используется сжатый воздух, который затем обеспечивает охлаждение пружинных элементов ковшового затвора.

Выводы

Промышленное использование разработанного комплекса вспомогательного оборудования позволит повысить культуру труда персонала, занятого обслуживанием и эксплуатацией ковшовых шиберных затворов кассетного типа, и решить задачу импортозамещения в условиях действия запретов на поставку таких систем зарубежными компаниями.

Список литературы

1. Модернизированный манипулятор для обслуживания кассетных затворов сталеразливочных ковшей / С.П. Еронько [и др.] // Металлург.- 2022.- № 6.- С. 90 – 95.

2. Разработка системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и эконом. информ. / ОАО «Черметинформация». – 2017. – № 3. – С. 54–59.

3. Еронько, С.П. Система механизированной подачи стартовой смеси в канал сталеразливочного ковша / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, П.М. Матеко // Вестник ДонНТУ.- 2019.- № 1 (15).- С. 59 – 65.

4. Модернизация и модельные исследования манипулятора для замены защитной огнеупорной трубы при непрерывной разливке стали / С.П. Еронько [и др.] // Металлург.- 2020.- № 4.- С. 30 - 35.

5. Еронько, С.П. Совершенствование опорного узла манипулятора для замены защитных огнеупорных труб при непрерывном литье заготовок / С.П. Еронько, Е.С. Цыхмистро. Д.В. Попов // Материалы ВУЗовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов по направлению «Машиноведение» . - Донецк: ДонНТУ, 2020.- С. 16 – 19.

УДК 669.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВДУВАНИЯ ГАЗОПОРОШКОВОЙ СМЕСИ В РАЗЛИВАЕМУЮ СТАЛЬ

С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, В.Э. Серегин, С.В. Дубляков
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Представлены конструкция и результаты модельных исследований установки, обеспечивающей подачу газопорошковой смеси через огнеупорный стопор-моноблок в струю металла, истекающую из промежуточного ковша в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок. Промышленное применение разработки позволит повысить эффективность технологий модифицирования и микролегирования стали.*

Annotation. *The design and results of model studies of a unit that provides the supply of a gas powder mixture through a refractory stopper-monoblock into a metal jet flowing from an intermediate ladle into the mold of a continuous casting machine are presented. The industrial application of the development will increase the efficiency of steel inoculation and microalloying technologies.*

Ключевые слова: *промежуточный ковш, стопор-моноблок, кристаллизатор, бункер, газопорошковая смесь*

Keywords: *intermediate ladle, monoblock stopper, mold, hopper, gas powder mixture*

В последние годы наблюдается тенденция к переносу в промежуточный ковш машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) выполнения технологических операций, включая легирование, модифицирование, плазменный нагрев и перемешивание, что позволяет его отнести к многофункциональному агрегату [1].

С учетом того, что легкоокисляющиеся модифицирующие добавки целесообразно вводить как можно ближе к месту кристаллизации разливаемой стали [2, 3], предложен способ продувки жидкого металла газопорошковыми смесями, предусматривающий их подачу в струе инертного газа через центральный канал огнеупорного блока стопорного узла промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок, т.е. в струю расплава, непосредственно истекающего в кристаллизатор. Конструктивная схема установки, предназначенной для реализации такого способа инжекционной обработки стали по ходу ее непрерывной разливки, показана на рис. 1. Она включает

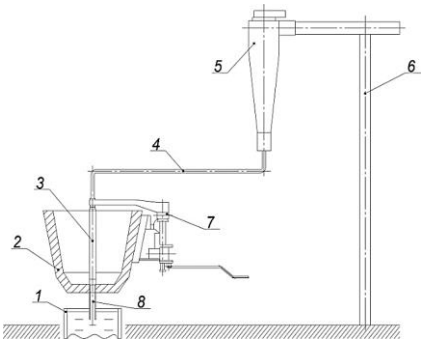
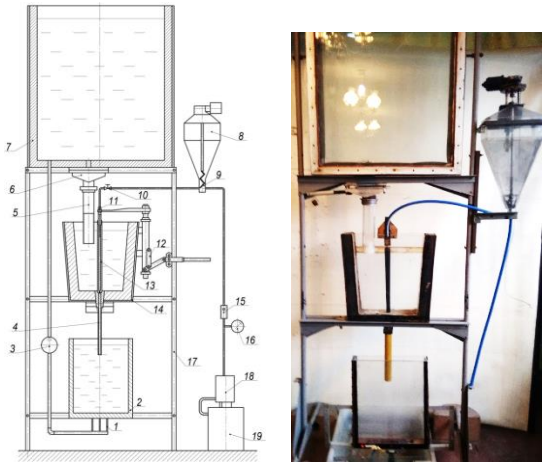


Рисунок 1 – Конструктивная схема установки для вдувания газопорошковых смесей через стопорный разливочный узел промежуточного ковша МНЛЗ

бункер 5 с порошкообразным материалом, размещенный на металлоконструкции 6 вблизи промежуточного ковша 2, снабженного стопорным разливочным устройством 7. Внутри бункера установлен вертикальный шнековый питатель, приводимый в действие мотором-редуктором. К нижней части бункера примыкает камера, связанная со смесителем, который соединен посредством гибкого трубопровода 4 со штуцером полого стержня огнеупорного стопора 3, снабженного в нижней своей части пробкой с центральным соплом. Пробка перекрывает входное тверстие канала стакана 8, погруженного в жидкий металл в полости кристаллизатора 1.

Эффективность функционирования такой установки будет определяться надежностью ее структурных механизмов и их способностью обеспечить плавное регулирование в заданных пределах расходов порошкообразных реагентов и жидкого металла в зоне их смешения. Для расчета и конструирования промышленного образца предлагаемой установки необходима предварительная проверка правильности заложенных в нее технических решений, а также исходная информация, позволяющая обосновать рациональные рабочие параметры входящих в ее состав механизмов. С целью снижения временных и материальных затрат при решении поставленных задач целесообразно использовать метод физического моделирования. В связи с этим на основании практических рекомендаций, приведенных в работах [4, 5], подготовили лабораторный комплекс (рис. 2), включавший выполненные масштабе 1:5 прозрачные модели сталерзливочного ковша 7, промежуточного ковша 14 и кристаллизатора 2, закрепленные на металлоконструкции 17. Разливочная система модели промежуточного ковша состоит из механихма управления 12 положением стопора-моноблока 13, обеспечивающего регулированный перелив жидкости, симулирующей расплав, в модель

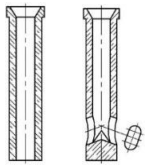


а б

Рисунок 2 – Схема (а) и натурная модель (б) установки для инжекционной обработки стали по ходу ее непрерывной разливки

кристаллизатора через погружной стакан 4. Конструктивной особенностью модели кристаллизатора слябовой МНЛЗ является то, что отток из нее жидкости происходил через многочисленные отверстия малого диаметра, равномерно распредленные в ее днище, благодаря чему устранялось возможное искажение картины потоков, формиремой в зоне расположения модели погружного стакана. Модельная жидкость, собираемая с помощью штуцеров 1 в общую емкость, затем по трубопроводу подается насосом 3 в модель сталеразливочного ковша 7, снабженного шиберным затвором 6 с защитной трубой 5. Для вдувания воздуха, имитирующего аргон, транспортирующий выдаваемый дозатором 9 из питающего бункера 8 порошкообразный материал к стопору-моноблоку модели промежуточного ковша служит компрессор 19 и ресивер 18. Контроль параметров подачи воздуха, имитировавшего инертный газ, осуществляется с использованием комплекта специальной измерительной аппаратуры, в состав которого входит: манометр 16, ротаметр 15 и регулирующий вентиль 10.

В соответствии с планом эксперимента, в ходе его проведения моделировали процессы вдувания порошкообразных реагентов и их распределения в объеме кристаллизатора для различных вариантов подачи модельной жидкости. С этой целью использованы два типа моделей погружных стаканов, схематично показанных на рис. 3. Первый из них относился к прямоточному типу, а второй - к безнапорному типу с двумя боковыми отверстиями, расположенными в нижней части и разделенными рассекателем.



а б

Рисунок 3 – Схемы использовавшихся моделей погружных стаканов

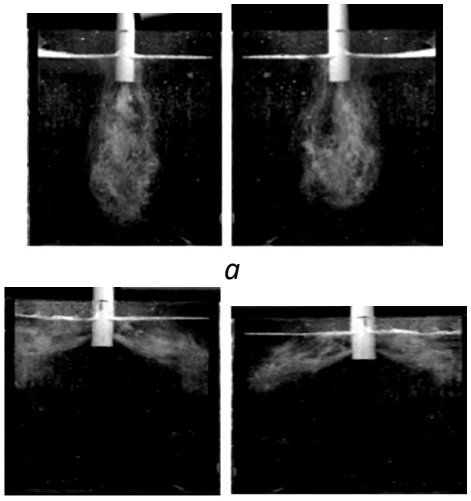
Опыты на гидравлической модели проводили в следующей последовательности. Предварительно при опущенном в нижнее положение стопоре-моноблоке 13 и выключенном насосе 3 модели стале-

разливочного ковша 7, промежуточного ковша 14 и кристаллизатора 2 заполняли водой до заданных уровней. После одновременного поднятия с помощью механизма 12 стопора-моноблока 13 и пуска насоса 3 путем регулирования его производительности добивались поддержания постоянства уровней жидкости в моделях промежуточного ковша 14 и кристаллизатора 2. Затем включали компрессор 19, закачивающий воздух в ресивер 18, из которого он по трубопроводу нагнетался в смеситель питающего бункера 8. Туда же шнековым питателем 9 подавался порошкообразный материал. Образующаяся в смесителе газопорошковая смесь под избыточным давлением по гибкому трубопроводу поступала в полость стержня стопора-моноблока 13 и далее увлекалась потоком жидкости, истекающей через погружной стакан 4 в модель кристаллизатора 2. Расход газопорошковой смеси регулировали вентилем 10, одновременно контролируя расход и давление транспортирующего воздуха соответственно по показаниям ротаметра 15 и манометра 16. Благодаря тому, что при попадании вдуваемого воздуха в струе жидкости в модели кристаллизатора происходило образование мельчайших пузырьков, обеспечивалась визуализация траекторий движения частичек порошкообразного материала, увлекавшихся циркуляционными потоками воды, имитирующей сталь.

Наблюдаемые картины зон циркуляции потоков (фото на рис. 4) позволили установить, что при разливке с использованием прямоточного стакана (рис. 4 *а*) основной нисходящий поток каплевидной формы имел глубину проникновения 300 – 400 мм, а восходящие вдоль стенок модели кристаллизатора потоки изменяли направление к погружному стакану при достижении свободной поверхности модельной жидкости.

В случае использования безнапорных погружных стаканов с боковыми отверстиями наблюдается иная структура потоков, обусловленная наличием выше и ниже выходных отверстий вихрей с однонаправленной обратной друг к другу циркуляцией вдоль образующей цилиндрической поверхности стакана и восходящими потоками вдоль узких стенок модели кристаллизатора (рис. 4 *б*).

Результаты тестовых испытаний, проведенных на лабораторном комплексе, свидетельствовали о том, что устойчивая работа моделируемой системы подачи порошкообразных реагентов обеспечивалась только при определенном соотношении расходов жидкости и газопорошковой смеси, одновременно подаваемых в выпускной канал модели промежуточного ковша. Это требует



а

б

Рисунок 4 – Картины потоков в модели кристаллизатора при использовании прямоточного (*а*) и с двумя выходными отверстиями (*б*) погружных стаканов

проведения дополнительных исследований, связанных с установлением указанного соотношения для различных вариантов реализации непрерывной разливки стали.

Выводы. Предлагаемая натурная модель установки и методика проведения лабораторных экспериментов с ее использованием позволили получить исходную информацию, необходимую для проектирования промышленного образца системы, обеспечивающей реализацию технологии модифицирования и микролегирования стали в процессе ее непрерывной разливки. Подача модифицирующих и легирующих элементов в металл непосредственно перед началом его кристаллизации позволит повысить эффективность их использования и сократить расход.

Список литературы

1. Промежуточный ковш – ключевое функциональное звено для получения высококачественной продукции / О.Б. Исаев [и др.] // Сталь. – 2001. – № 7. – С. 20 - 23.

2. Оборудование для внепечной обработки стали / А.В. Протасов [и др.].- Интернет Инжиниринг, 2010.- 413 с.

3. Внепечное рафинирование и микролегирование стали – реальный путь повышения эффективности сталеплавильного производства / Я.Л. Кац [и др.] // И.П. Бардин и металлургическая наука: сборник.- М.: Металлургиздат, 2003.- С. 70 – 87.

4. Еронько, С.П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских.- К.: Техніка, 1998.- 136 с.

5. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства: учебное пособие / С.П. Еронько [и др.].- Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021,- 324 с.

УДК 628.168 + 544.526.5

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ СУСПЕНЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Н.А. Спиридонов, В.Ф. Раков, И.Л. Сидак
ФГБНУ «Научно-исследовательский институт РЕАКТИВЭЛЕКТРОН», г. Донецк, ДНР

Аннотация. *В работе выполнен сравнительный анализ конструкций устройств фотокаталитической очистки воды суспензионным методом. Представлена конструкция, в которой исключена фильтрация фотокаталитического порошка и его возврат в реакционную зону.*
Annotation. *The paper presents a comparative analysis of the designs of photocatalytic water purification devices by the suspension method. A design is presented in which filtration of the photocatalytic powder and its return to the reaction zone are excluded.*
Ключевые слова: *анализ конструкций, фотокатализатор, очистка воды.*
Key words*: structural analysis, photocatalyst, water purification.*

Введение

Использование эффективного фотокатализатора, каким является диоксид титана, позволяет значительно повысить качество очищаемой питьевой воды для сохранения здоровья населения Донбасса. В суспензионном методе порошок фотокатализатора диспергирован в воде и эффективно используется освещаемая площадь поверхности частиц порошка [1]. В процессе фотокаталитической очистки воды поверхность фотокатализатора в контакте с водой под действием полученной энергии от ультрафиолетового (далее УФ) излучения выделяет электрические частицы – электроны(-) и «дырки(+)», которые воздействуют на молекулы воды, образуя сильные окислители, т.н. гидроксильные радикалы, а они уже «сжигают» вредную органику, микроорганизмы и вирусы.

Основная часть

В устройствах, использующих суспензионный метод очистки воды, необходимо выполнять следующие операции [1, 2]:
– фильтрацию очищаемой воды от частиц фотокатализатора и возврат их в реакционную зону;

– процесс поддержания в воде частиц фотокатализатора во взвешенном состоянии, (как правило, концентрация частиц ~5 г/л).

Размеры диспергированных в воде частиц диоксида титана составляют 10-20 нм, что значительно меньше размера отверстий в мембранах фильтров. Фильтрация наночастиц очень длительная и трудоемкая операция, значительно повышающая эксплуатационные затраты. Возможно, именно поэтому информация о внедрении и использовании таких устройств отсутствует.

Устройство фотокаталитической очистки воды суспензионным методом разработано в НИИ «Реактивэлектрон», ДНР г. Донецк. Его схема представлена на рисунке 1, а экспериментальный образец на рисунке 2.

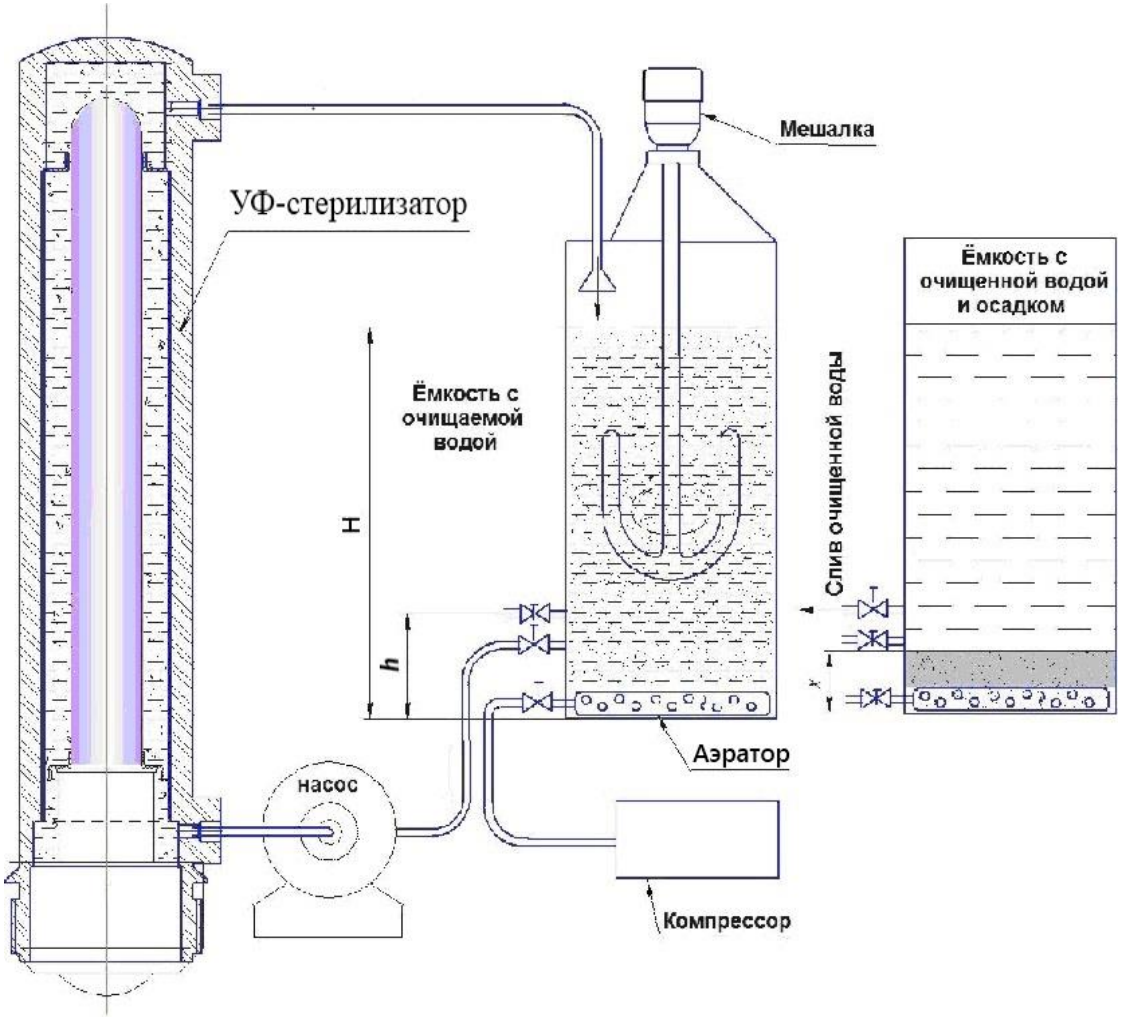


Рисунок 1 – Схема устройства фотокаталитической очистки воды суспензионным методом

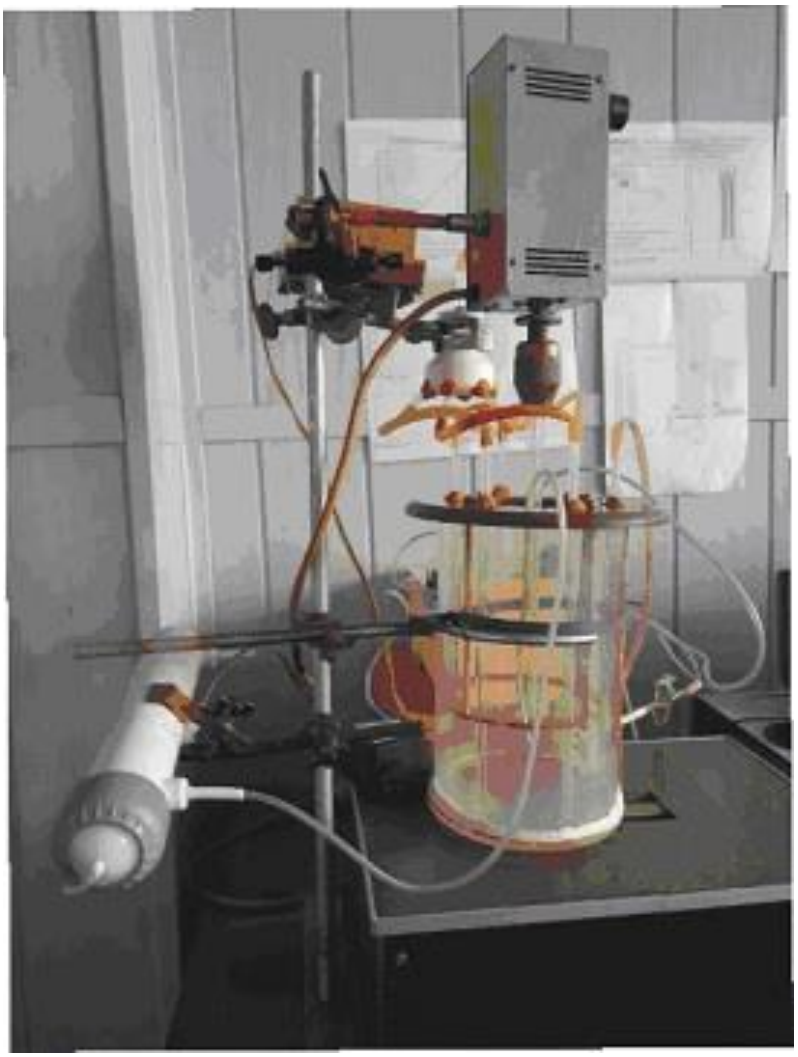


Рисунок 2 – Экспериментальный образец устройства

В устройстве используется серийно изготавливаемый УФ стерилизатор в качестве фотокаталитического реактора. Чтобы исключить фильтрацию порошка, его отделение и возврат в реакционную зону, предусмотрена специальная конструкция емкости с очищаемой водой.

Для каждой новой порции фотокаталитического порошка и очищаемой воды экспериментально определяется количество порошка, вносимого для очистки ограниченного количества воды в течение необходимого времени. Одновременно определяется степень очистки воды от загрязнителя и соответственно время очистки.

Устройство работает следующим образом. В емкость заливают необходимое количество очищаемой воды и засыпают требуемое количество фотокаталитического порошка. Включают мешалку и компрессор, потоки воздуха из аэратора и мешалка равномерно

перемешивают порошок в воде. Затем включают насос и лампу в УФ стерилизаторе, вода с порошком фотокатализатора подается в реакционную зону стерилизатора. Через экспериментально установленный промежуток времени необходимый для очистки воды до требуемого качества все выключают. В емкости перекрывают краны подачи воды из емкости и воздуха из аэратора. Воду оставляют на некоторое время в спокойном состоянии, частицы порошка диоксида титана оседают в нижнюю часть емкости. При этом в конструкции емкости должно выполняться условие $x \leq ½h$ (см. рисунок 1). После слива очищенной воды внизу емкости остается осадок с порошком фотокатализатора. Устройство готово к следующему циклу очистки воды, но без извлечения и внесения порошка фотокатализатора.

В данном устройстве не требуется фильтрация нанопорошка. Количество рабочих циклов будет определяться качеством фотокатализатора, т.е. процедуру можно повторять до тех пор, пока вода будет очищаться до требуемой степени очистки от загрязнителей. После снижения фотокаталитических свойств весь осадок с порошком из емкости удаляют. Емкость и УФ лампу в стерилизаторе очищают, и установка готовится к следующей серии циклов очистки воды. Очистка и восстановление свойств порошка катализатора из извлеченного осадка позволят, чтобы весь эксплуатационный процесс фотокаталитической очистки воды сделать безотходным.

В представленной конструкции также учтены основные требования к устройствам фотокаталитической очистки питьевой воды, определенные на основе анализа конструктивных решений в патентах и действующих опытных установках на основе диоксида титана, [3]:

– устройства фотокаталитической очистки воды работают с ограниченными объемами очищаемой воды, многократно пропуская воду через фотокаталитический реактор;

– в конструкции устройств необходимо обеспечить максимальный доступ УФ излучения к поверхности частиц катализатора, а также многократный контакт очищаемой воды с фотокатализатором.

Выводы

Анализ конструкций устройств фотокаталитической очистки воды суспензионным методом показывает, что наиболее трудно реализуемым в них является процесс фильтрации порошка с его возвратом в реакционную зону. Это вероятно определяет отсутствие информации об их внедрении в эксплуатацию.

Представленное устройство фотокаталитической очистки питьевой воды суспензионным методом лишено этого недостатка и может быть приемлемым по экономическим и эксплуатационным показателям.

Перечень ссылок

1. Раков, В.Ф. Сравнительный анализ конструкций устройств фотокаталитической очистки питьевой воды / В.Ф. Раков, Н.А. Спиридонов, Ю.А. Пасечник, И.Л. Сидак // Материалы 8-й Международной научно-практическая конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 24-26 мая 2022 – Донецк: ДОННТУ, 2022. – Том 3: 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2022. – С. 37-41.

2. Раков, В.Ф. Фотокаталитический суспензионный метод очистки воды / В.Ф. Раков, В.М. Погибко. // VI Международный Научный форум Донецкой Народной Республики. - Том 4: Перспективные направления развития экологии и химической технологии, 26-28 мая 2020. – Донецк: «Донецкая политехника», 2020. – С. 25-29.

3. Раков, В.Ф. Основные требования к конструкции устройств фотокаталитической очистки питьевой воды / В.Ф. Раков, Н.А. Спиридонов, И.Л. Сидак // 7-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 24-26 мая 2021 – Донецк: ДОННТУ, 2021. – Том 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2021. – С. 77-81.

УДК 621.01

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МУФТ ТРАНСМИССИИ ДЛЯ МОРСКИХ СУДОВ

А.Н. Рак, В.О. Гутаревич
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Аннотация. *Рассмотрены конструктивные особенности соединительных муфт для трансмиссии морских судов, обеспечивающие необходимые режимы работы энергетических установок. Представлены методики выбора параметров соединительных и гибких муфт, учитывающие эксплуатационные факторы судовых механизмов.*
Ключевые слова: *морское судно, генератор, двигатель, вал, редуктор, вибрация, муфта*
Annotation. *The structural features of connecting couplings for the transmission of marine vessels, ensuring the necessary operating modes of power plants, are considered. Methodologies for selecting parameters of connecting and flexible couplings are presented, taking into account the operational factors of ship mechanisms.*
Key words: *motor vessel ship, generator, motor, shaft, gear box, vibration, coupling*

В настоящее время для соответствия требований по энергоэффективности, многие суда оснащают дополнительными синхронными электрическими машинами (СМ), которые в силу свойства обратимости могут работать генератором или двигателем (Г/Д) [1, 2]. При этом, для передачи вращательного движения от главного двигателя (ГД) на гребной вал и винт, а, соответственно и Г/Д применяются соединительные муфты с различными способами включения.

Включение/отключение муфт может осуществляться вручную или дистанционно. Если для включения/отключения муфт с ручным управлением кто-то из членов машинной команды должен находиться непосредственно в машинном отделении, при дистанционном – члены экипажа могут отсутствовать в машинном отделении, а контроль осуществляется непосредственно с центрального поста управления.

В комбинированной дизель-электрической системе с Г/Д устанавливается непосредственно в линию гребного вала, а в схеме Г/Д подключается к системе через редуктор.

Соединительные муфты могут обеспечить передачу вращающего момента с ГД на гребной винт напрямую или через туннельный редуктор.

Здесь следует отметить, что обе системы позволяет осуществить несколько режимов работы СМ:

- генераторный;
- двигательный для усиления работы;
- двигательный вспомогательный или аварийный при (работающем или неработающем) ГД.

В генераторном режиме:

- рабочий диапазон частот вращения ГД 70 - 100%;
- соединительная муфта гребного вала включена дистанционно;
- СМ приводится в действие от вала отбора мощности туннельного редуктора;
- преобразователь частоты, обеспечивает требуемую мощность при постоянном напряжении и частоте в указанном диапазоне частот вращения.

В двигательном (усилительном режиме):

- соединительная муфта дистанционно включена;
- дизельные генераторы, обеспечивают питание СМ, которая оказывает дополнительное тяговое усилие через туннельный редуктор на гребной вал с винтом, приводимый в действие ГД.

В двигательном (вспомогательном или аварийном) режиме:

- соединительная муфта дистанционно отключена;
- дизельные генераторы, обеспечивают питание СМ, приводящей в действие через туннельный редуктор гребной вал с винтом.

Принципиальная разница в организации вспомогательного и аварийного движения отсутствует. Вспомогательный режим позволяет осуществлять электрическое движение судна при работающем ГД, который еще не достиг минимально устойчивой частоты вращения, установленной для конкретного типа ГД. При достижении данного значения ГД подключается к гребному валу посредством муфты сцепления и судно приводится в действие дизель-механическим движителем. После этого СМ может перейти в режим работы генератором.

В аварийном режиме ГД отключен с помощью муфты от гребного вала. При этом, выбранная муфта должна соответствовать

требованиям класса для вала гребного винта, диаметр фланца муфты регулируется в зависимости от типа ГД и гребного вала.

Еще одним из видов соединительных муфт фирмы RENK являются муфты с электрическим приводом [3]. Такие муфты

становятся все более популярным вариантом судовых силовых установок для морских судов, военных кораблей, мега-яхт и исследовательских судов. Они, по сути, являются альтернативой электрическим системам прямого привода с их большими, громоздкими и тяжелыми двигателями, работающими на скорости гребного винта.

В данной концепции электродвигатель и редуктор установлены на общем основании и упруго закреплены. Преимуществом таких систем являются: компактность, простота монтажа, меньший вес и работа с меньшим уровнем шума. Данные системы могут применяться как самостоятельно, так и в комплексе с редукторами.

В процессе эксплуатации различных механизмов с вращательным движением на морских судах происходит износ подшипниковых узлов, деформации поверхностей на которых установлено оборудование. При этом, возникают различные вибрации, которые регламентируются в соответствующих нормативно-технических документах. Они предназначены для оценки допустимости фактических уровней вибрации механизмов и оборудования судов при постройке или после ремонта, а также судов, находящихся в эксплуатации по результатам измерений параметров их вибрации. В соответствии с таким подходом различают три категории технического состояния механизмов и оборудования судов: А – состояние механизмов и оборудования после постройки судна или ремонта при вводе в эксплуатацию; В – состояние механизмов и оборудования во время нормальной эксплуатации; С – состояние механизмов и оборудования, при котором оно требует проведения технического обслуживания или ремонта. Нормы, которые определяют верхние границы категорий А и В представлены в [4].

Устройствами, позволяющими снизить вибрации являются гибкие муфты, которые предназначены для целенаправленного воздействия на вибрационные характеристики приводных систем при вращении. Их использование может значительно снизить амплитуды напряжений и частоту пиков перегрузки во время нерегулярных фаз работы в передающих крутящий момент частях приводных устройств. На современных морских судах также широкое распространение получили муфты фирмы RENK [5]. При их выборе следует учитывать ряд особенностей.

Типовые применения гибких муфт фирмы RENK на морских судах с учетом типоразмеров представлены в табл.1.

Таблица 1 – Типовые применения гибких муфт фирмы RENK на морских судах

Механизм	Размер муфты	Частота вращения, мин$^{-1}$	Мощность, кВт
Компрессор	149	2000	15
Центробежный насос	271	1475	730
Генератор	454	585	7100
Машина постоянного тока	149	5000	17
Преобразователь	247	1480	132
Судовой турбогенератор	335	1800	2500
Реверсивный судовой редуктор	231	3600	410

При выборе гибких муфт, определяющей величиной будет вращающий момент, создаваемый первичным двигателем (электрическим, двигателем внутреннего сгорания (ДВС) или паровым):

$$M = \frac{9550 \cdot P_H}{n_H},$$

где $P_н$ – номинальная мощность двигателя, кВт; $n_н$ – номинальная частота вращения, об/мин.

Значение комплексного коэффициента, влияющего на выбор гибкой муфты с учетом различных факторов, определяется:

$$K = K_H \cdot K_T \cdot K_B \cdot K_Д, \quad (2)$$

где $K_н$ – коэффициент нагрузки; $K_т$ – температурный коэффициент; $K_в$ – коэффициент включения; $K_д$ – коэффициент, учитывающий тип первичного двигателя.

При этом, момент в муфте, соответствующие ему напряжения или температура в материале упругого элемента, обусловленные крутильными колебаниями, при длительной работе и при быстром проходе не должны превышать допускаемых значений, установленных изготовителем для указанных режимов [5].

С учетом указанных коэффициентов, момент в муфте составит:

$$M_M = M \cdot K .$$

Гибкие муфты, указанных выше типов и типоразмеров, могут применяться при различных видах угловых и радиальных смещений, возникающих в процессе эксплуатации судовых механизмов. При этом, допустимое радиальное или угловое смещение задается как измеренный линейный размер.

В процессе эксплуатации может возникнуть и несоосность сопряженных валов, что приводит к динамическим деформациям компрессионных втулок, которые имеют частоту вращения трансмиссии.

Силы реакции, возникающие из-за радиального смещения, противодействуют направлению смещения и оказывают влияние на нагрузку соседних подшипников.

Значение статической силы реакции опоры F_r может быть рассчитано:

$$F_r = \frac{C_{Tstat} \cdot 10^3}{\left[0{,}5 \cdot D_L\right]^2} \cdot \Delta_r .$$

$$C_{Tstat} = C_{Tustat} \cdot \left[\frac{C_{Tostat}}{C_{Tustat}}\right]^{\frac{M}{M_M}} ,$$

где C_{Tstat} - эффективная статическая жесткость при кручении, Н·м/рад; C_{Tostat} - статическая жесткость на кручение при моменте со смещением $M_м$, Н·м/рад; C_{Tustat} - статическая жесткость на кручение без смещения М, Н·м/рад; D_L – диаметр муфты, мм; Δ_r – радиальное смещение, мм; F_r – сила реакции, Н.

Помимо характерного поведения материала втулок сжатия, на величину силы F_r, также оказывает влияние и отношение параметров M/M_M. При этом, также должны учитываться и другие технические характеристики муфт, например, габаритные размеры и статические жесткости муфт.

Выводы:

1. Рассмотрены варианты применения различных типов муфт фирмы Renk на морских судах.

2. Представлены упрощенные методики и примеры, позволяющие выбирать: соединительные муфты для передачи вращательного движения от ГД на гребной винт, обеспечивающие заданные режимы работы, а также упругие муфты для наиболее распространенных судовых механизмов с учетом образовавшихся износов.

3. Применение гибких муфт, например, при соединении поршневых машин с приводимыми в действие механизмами позволяет обеспечить более тихую работу за счет смещения областей критического крутящего момента. Благодаря их общим характеристикам упругости радиальные, осевые и угловые смещения вала могут быть компенсированы, что устраняет необходимость в обычно дорогостоящих фундаментах машин.

Перечень ссылок

1. Shaft generators for low speed main engines. http://www.mandieselturbo.com.

2. Рак, А.Н. Оценка устойчивости системы автоматического управления подруливающим устройством с дизельным приводом / А. Н. Рак, В. О. Гутаревич // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : Материалы Шестой национальной (всероссийской) научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 09–10 ноября 2023 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2024. – С. 67-72.

3. RENK AED – Advanced Electric Drive. The ultimate propulsion for quiet ships. http://www.renk.eu.

4. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII Механические установки. НД № 2-020101-138. / ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Санкт-Петербург, 2021г. – 118 с.

5. Innovative Power Transmission. ELCO-Coupling Flexible Compression Sleeve Coupling. http://www.renk.eu/.

УДК 620.182.23

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ШЛИФОВАНИЕМ

С.Н.Власов
ФГАОУ ВО ДИТИ НИЯУ МИФИ
г. Димитровград, РФ

Аннотация. *В статье рассматривается процесс влияния на качество поверхности обрабатываемых деталей внутреннего шлифования. Описываются влияние некоторых технологических параметров на шероховатость и волнистость. Особое внимание уделялось обеспечению точности и качества поверхности.*

Annotation. *The article discusses the process of influencing the surface quality of the machined parts of internal grinding. The influence of some technological parameters on roughness and undulation is described. Special attention was paid to ensuring the accuracy and quality of the surface.*

Ключевые слова: *внутреннее шлифование, подача, шероховатость, волнистость, скорость резания.*

Keywords: *internal grinding, feed, roughness, undulation, cutting speed*

Формирование шероховатости – сложный процесс, на который влияют различные факторы, такие как скорость резания v, радиус при вершине и геометрический профиль режущего лезвия, величина скорости подачи, глубина резания, твёрдость и другие физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, критерий изнашивания инструмента, наличие СОЖ, итоговое состояние поверхности заготовки, соотношение коэффициентов трения и межатомных сил, вызывающих прилипание частиц металла друг к другу, вибрации технологической системы и другие [1]. Несоблюдение правил внутреннего шлифования может вызвать погрешности формы и расположения поверхностей в полученной детали, что связано с увеличением центробежных сил от неуравновешенных масс и вибраций вращающихся компонентов, особенно шлифовального круга, которые влияют на волнистость и шероховатость обработанной поверхности.

Характер зависимости шероховатости от скорости резания определяется свойствами обрабатываемого металла и материала режущей пластины. Так, например, для чёрных металлов диапазон

используемых скоростей резания уже (рисунок 1). Для цветных сплавов скорости резания на быстроходных станках, работающих лезвийным инструментом, могут достигать 1000 м/с [2]. При использовании сверхтвердых материалов на таких скоростях при свободном резании получается низкий параметр шероховатости, до Ra = 0,04 мкм. При шлифовании зависимости аналогичные, однако управление производительностью и качеством производится другими технологическими параметрами: подача на двойной ход, продольная, поперечная, радиальная подачи.

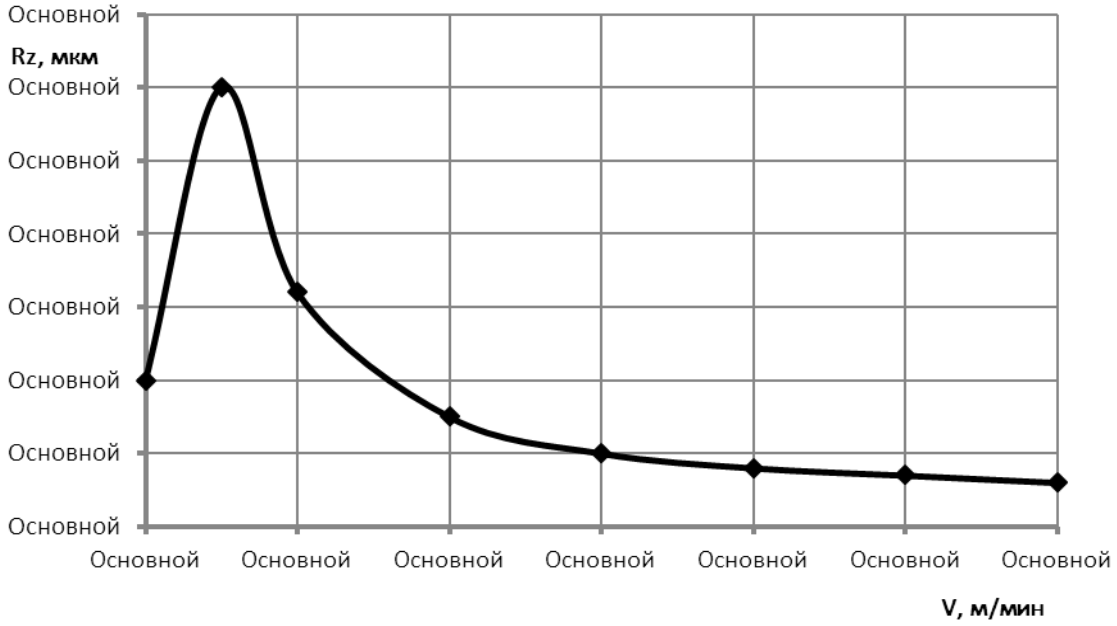


Рисунок 1 – Зависимость параметра шероховатости при круглом наружном точении от скорости резания

Волнистость заготовки после шлифования в диаметральном разрезе полученного профиля определяется как неровности поверхности, находящиеся между контуром реальной поверхности (шероховатостью) и отклонениями от геометрической формы. Для оценки волнистости используется ГОСТ Р ИСО 4287–2014, согласно которому волнистость определяется как элементарное отклонение поверхности любой формы. Высота неровностей волнистости и высота шероховатости примерно равны, однако отношение шагов к высоте отличается. Волнистость представляет собой совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности, которые возникают в основном из-за колебаний или относительных колебательных движений в системе «станок—инструмент—изделие».

Волнистость определяется на нормальном сечении поверхности, при этом шероховатость и другие отклонения формы исключаются. Как правило, к волнистости относятся периодические неровности, у которых отношение шага к высоте превышает 40. Для изделий с круглым сечением волнистость включает отклонения в радиальном сечении, где шаг составляет менее 1/15 окружности.

Исследовали воздействия параметров шлифования на волнистость и шероховатость. Повышение скорости резки происходит из-за увеличения угловой скорости шлифовального круга, что при неизменном значении дисбаланса меняет возмущающую силу, приводящую к автоколебаниям системы. Рост возмущающей силы при увеличении скорости резания является главной причиной изменения волнистости поверхности. Волнистость также зависит от жёсткости оправки шлифовального шпинделя и механических свойств электрической части, которые обеспечивают минимальное проскальзывание шпинделя под нагрузкой.

На рисунке 2 показаны результаты обработки посадочного отверстия многоручьевого шкива на станке BCA-1R52BNC3. Обработка проводилась двумя шпинделями с сервоприводами, отличающимися жёсткостью оправки шпинделя. Жёсткость оправки шпинделя с опорами качения составляет 125 Н/мкм, в то время как шпиндель с аэродинамическими опорами обладает жёсткостью оправки 325 Н/мкм и более жёсткими электромеханическими характеристиками, обеспечивающими «скольжение» под нагрузкой, которое в 1,8 раз меньше по сравнению со стандартным шпинделем.

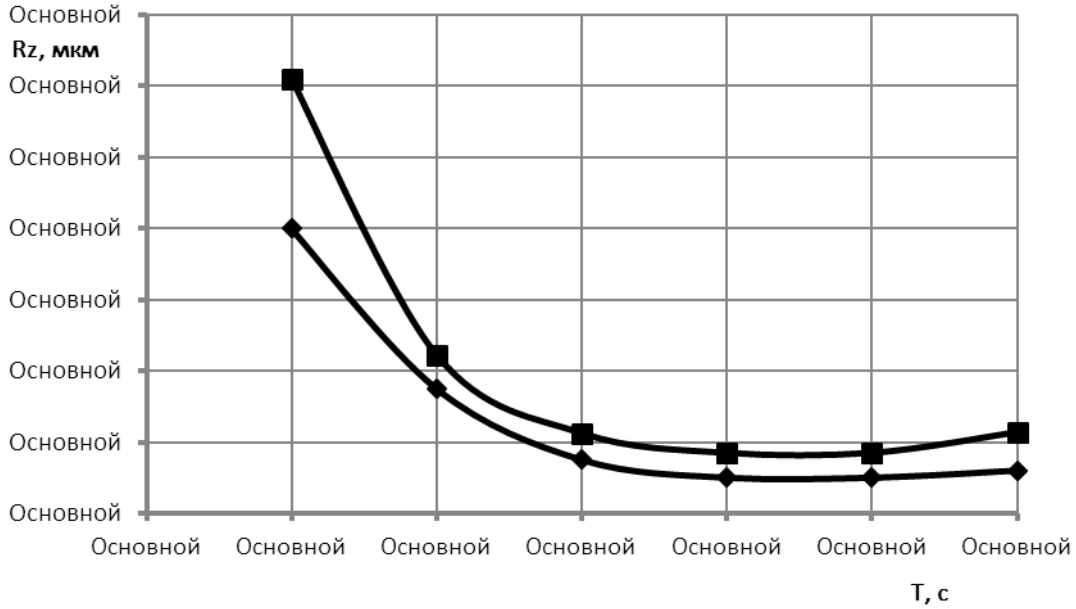


Рисунок 2 – Зависимость параметра шероховатости и шероховатости от длительности выхаживания

Волнистость поверхности находится в прямой зависимости от параметров шлифования и процесса выхаживания поверхности (рисунок 3). Волнистость меняется в зависимости от условий резонанса при возникновении автоколебаний, связанных с вращением круга.

Исследование влияния поперечной подачи на волнистость отверстия диаметром 72 мм при чистовой обработке показало, что значения волнистости поверхности изменяются от 0,25 ± 0,11 мкм до 1,98 ± 0,41 мкм в зависимости от поперечной подачи, которая варьировалась от 0,02 мм/мин до 0,25 мм/мин. Эффективность выхаживания при чистовой обработке определяется его продолжительностью.

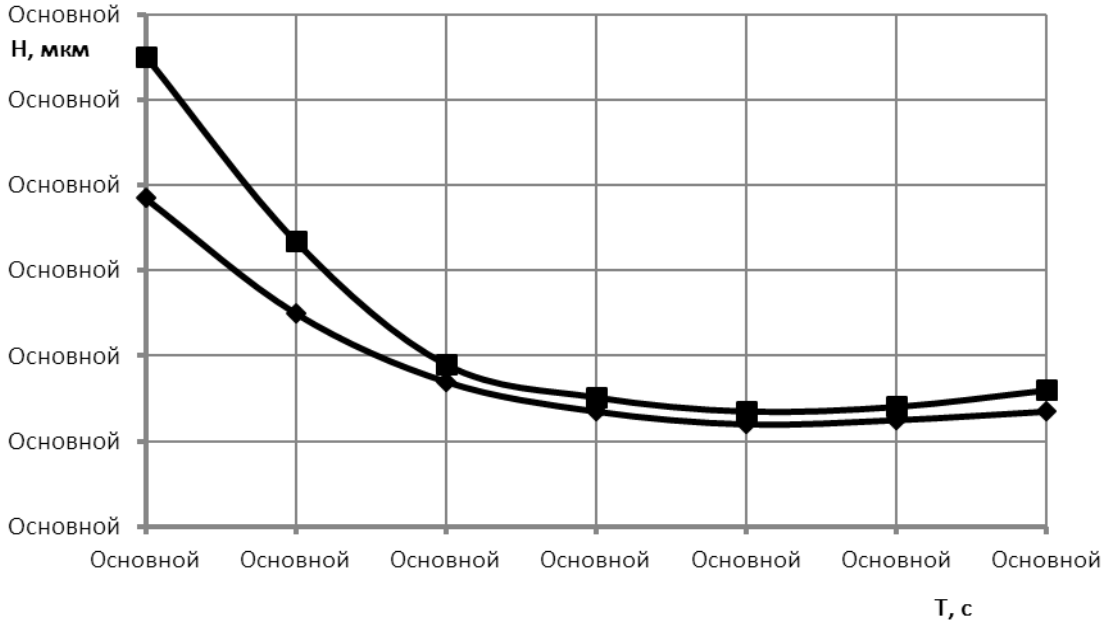


Рисунок 3 – Зависимость волнистости и шероховатости от длительности выхаживания

Время выхаживания, необходимое для достижения минимального уровня волнистости, зависит от размеров обрабатываемой поверхности и жёсткости системы «станок-деталь». По мере увеличения времени выхаживания волнистость асимптотически уменьшается.

После корректировки дисбаланса круга, колебания его кромки относительно поверхности обрабатываемой детали, существенно уменьшаются. Эти автоколебания обусловлены скольжением электропривода под нагрузкой. При чистовой обработке наложение частоты поперечной подачи и колебаний шлифовального круга

относительно обрабатываемой поверхности, вызывают появление волнистости. Дисбаланс круга оценивается по биению круга, измеренному после корректировки в среднем сечении при ручном вращении. При оценке дисбаланса круга было обнаружено влияние погрешности изготовления крепёжного устройства круга на дисбаланс круга, который может увеличить дисбаланс в 1,5 раза.

Балансировка шпинделя позволяет уменьшить волнистость, связанную с дисбалансом, однако не позволяют снизить вибрации, вызванные процессом шлифования и дефектами изготовления опор качения. Прижоги возникают из-за того, что часть энергии, формообразования преобразуется в зоне основных и дополнительных деформаций в тепло, которое вызывает высокие температуры в области контакта. Эти температуры могут достигать 1600 °С в поверхностных слоях обрабатываемой детали (зачастую выше температуры плавления стали). Основные способы обнаружения прижогов – травление и последующий визуальный осмотр поверхности. Определение глубины прижога – сложная задача, требующая временных затрат. Для определения глубины прижога необходимо многократно шлифовать поверхность и последовательно проводить травление до тех пор, пока не будет удален дефектный слой материала. Использование эффективных типов СОЖ способствует снижению количества прижогов за счет уменьшения трения между абразивными зёрнами, связкой и стружкой.

Выводы

Внедрение внутришлифовальной обработки предполагает создание и использование новых шлифовальных кругов, смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и корректирующих инструментов. Внутришлифовальная обработка не замещает, но дополняет лезвийную обработку.

Для достижения более высокого уровня метрологической подготовки и соблюдения правил техники безопасности важно соблюдать соответствующие стандарты и нормы.

Повышение требований к динамическим характеристикам внутришлифовальных станков и шпинделей способствует разработке уникальных конструкций и поиску новых решений.

Для создания испытательных стендов для проверки механической прочности кругов необходим новый подход, который учитывает специфику и требования процесса.

Перечень ссылок

1. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.

2. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов; под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.

УДК 621.923

ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ ОТ ФОРМЫ ЗЕРНА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В. С. Полищук, Ю. А. Алехов, А. Н. Пересадченко, А.Н. Шавшина
ФГБУ НИИ «РЕАКТИВЭЛЕКТРОН»
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Изготовлены образцы глобулярной, пластинчатой формы частиц порошка с поверхностным расположением абразива и различным отношением усредненной длины к усредненной толщине. Исследовано влияние формы неизометричного композитного магнитно-абразивного зерна (НКМАП) на его магнитные свойства.*
Annotation. *Samples of globular, plate-shaped powder particles with a surface arrangement of abrasive and different ratios of average length to average thickness were made. The influence of the shape of non-isometric composite magnetic abrasive grain (NCMAP) on its magnetic properties has been studied.*
Ключевые слова. *Композитный магнитно-абразивный порошок, магнитно-массовая проба.*
Keywords. *Composite magnetic abrasive powder, magnetic mass test.*

Введение. Магнитно-абразивная обработка (МАО) была изобретена в прошлом веке как один из вариантов абразивной обработки. Особенностью МАО является то, что в качестве абразива используется композитный магнитно-абразивный порошок (КМАП), обладающий одновременно абразивными и магнитными свойствами При МАО под действием магнитного поля и взаимного движения поверхности детали и КМАП создаются условия механического резания непосредственно в зоне обработки без каких-либо промежуточных механизмов [1].

Наряду с режущими свойствами и стойкостью КМАП важнейшим фактором влияющим на эффективность МАО являются магнитные свойства зерна порошка. В свою очередь магнитные свойства КМАП зависят от состава, магнитных свойств составляющих композита, формы зерна, взаимодействия зерен в магнитном поле и т.д.

Цель работы – исследование зависимости магнитных свойств магнитно-абразивных порошков от формы зерна и технологических факторов.

Для исследования данной зависимости изготовлены композитные порошки с поверхностным расположением абразива и с различным коэффициентом неизометричности $K_{н.}$. Коэффициент неизометричности $K_н$ представляет собой отношение усредненной длины зерна к его усредненной толщине. Магнитное ядро неизометричных композитных магнитно-абразивных порошков изготовлено на основе монодисперсных частиц распыленного железа, а качестве абразива использован монодисперсный порошок карбида титана дисперсностью 7/5 мкм .

Магнитную основу НКМАП получили путем холодной ковки порошка железа распыленного марки ПЖРВ исходной глобулярной фракции 180–200 мкм в шаровой вибрационной мельнице М-10. Время обработки составило от 7,5 мин до 120 мин.

При обработке железного порошка в вибромельнице происходит его расплющивание с получением пластинчатых частиц с коэффициентом неизометричности формы $K_н$ от 1 до 14.

Путем обволакивания железных пластинчатых частиц смесью абразива и эпоксидной смолы изготовлены пластинчатые НКМАП с поверхностным расположением абразива.

Магнитные свойства порошков определяли методом измерения магнитно-массовой пробы (ММП) [2]. Суть метода заключается в измерении массы порошка, удерживаемого электромагнитом при протекании по нему фиксированной величины постоянного электрического тока.

Результаты измерения ММП исходных железных порошков представлены на рис. 1.

Снижение магнитных свойств (ММП) исходных железных порошков с увеличением времени их обработки в вибромельнице и увеличение коэффициента их неизометричности $К_н$ мы связываем с двумя факторами – с увеличением наклепа и с изменением форма зерна. Какой из этих факторов является более влиятельным выясняется следующим исследованием.

При нанесении абразива на магнитную железную основу порошки подвергались термической обработке при этом как показал рентгенографический анализ наклеп железной исходной матрицы практически снимается.

Из рис.2 можно видеть, что увеличение $K_н$ от 1 до 14 исследованных НКМАП, приводит к увеличению ММП в 1,5-1,8 раза. Крупность зерна магнитной основы и НКМАП, в исследованных пределах, практически не влияет на величину ММП (рис. 1, 2).

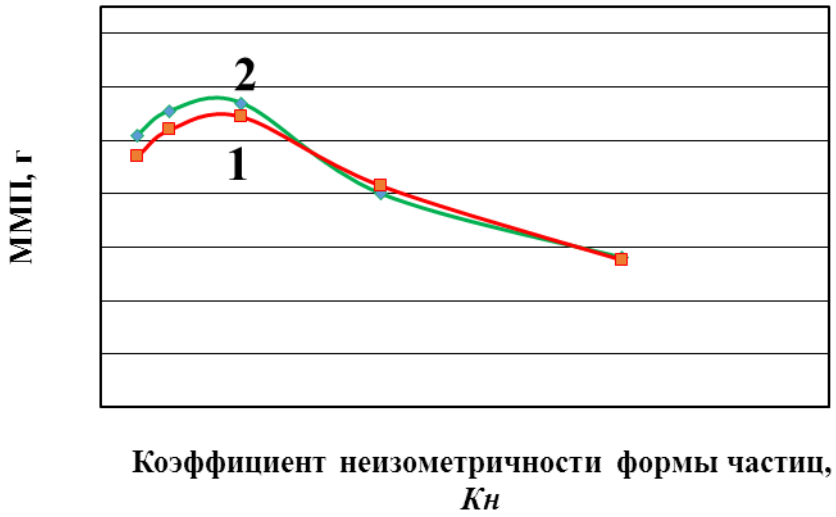


Рисунок 1 – Зависимость магнитно-массовой пробы от $K_н$ пластинчатых железных порошков крупностью: 200/180 мкм – 1; 250/200 мкм – 2.

Результаты измерения ММП неизометричного композитного магнитно-абразивного порошка (НКМАП) представлены на рис.2.

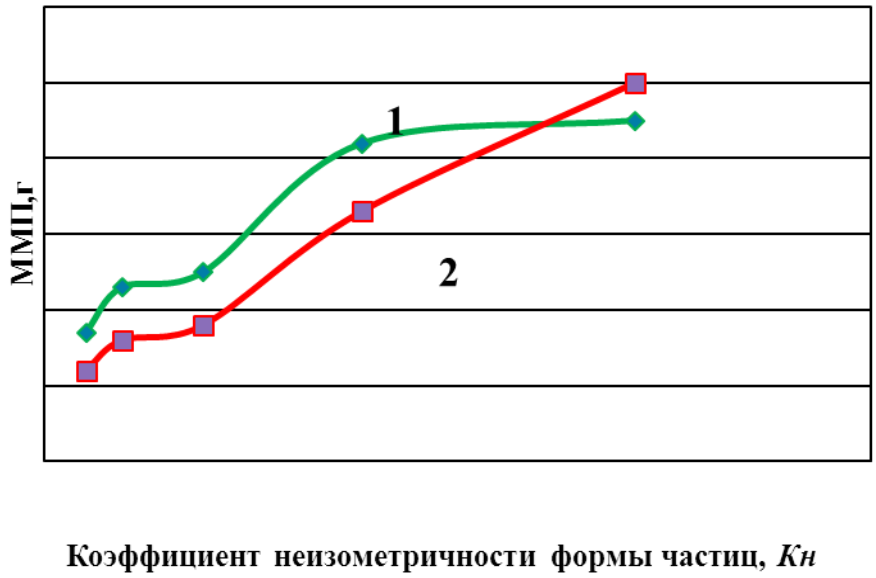


Рисунок 2 – Зависимость магнитно-массовой пробы от $K_н$ пластинчатых НКМАП крупностью: 200/180 мкм – 1; 250/200 мкм – 2.

Более высокое значение магнитных свойств НКМАП по сравнению с магнитными свойствами их магнитной основы

обусловлено низкотемпературным отпуском железа при изготовлении магнитно-абразивного порошка.

При получении НКМАП на поверхность железных частиц, подвергнутых обработке в вибромельнице, наносят композитный абразивный слой с последующей его сушкой и полимеризацией.

Для проверки изменения свойств железа при изготовлении НКМАП проведено измерение микротвердости частиц железа и КМАП на его основе.

Результаты измерений представлены на рис. 3.

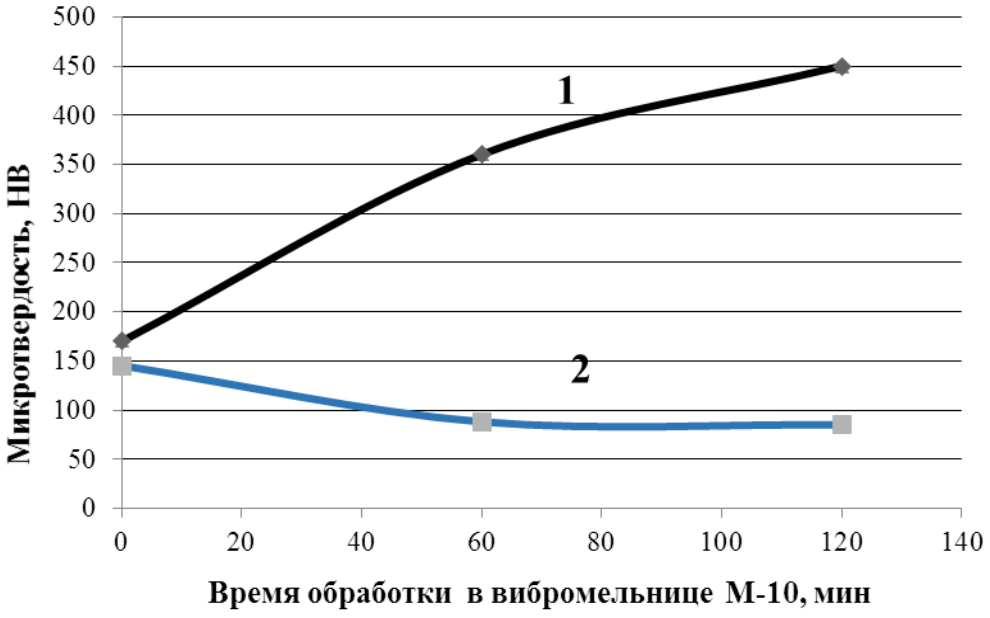


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости от времени обработки в вибромельнице М-10: железного порошка – 1; НКМАП на основе железного порошка – 2.

Из рисунка 3 видно, что увеличение времени обработки железного порошка в вибромельнице (и как следствие увеличение $K_н$) приводит к увеличению микротвердости железных частиц почти в 3 раза. В тоже время произошло уменьшение микротвердости магнитной матрицы НКМАП, при низкотемпературной (до 200°С) сушке и полимеризации.

Результаты опыта, проведенного на обработанных железных частицах, прошедших процесс сушки и полимеризации без нанесения абразивного слоя, подтвердил это заключение.

Выводы. Установлено, что форма неизометричного композитного магнитно-абразивного порошка ($К_н$) и технология их изготовления существенно влияют на магнитные свойства частиц порошка. Изучение данных процессов

позволяет управлять магнитными свойствами частиц НКМАП с целью повышения эффективности магнитно-абразивной обработки.

Перечень ссылок

1. Полищук, В.С. Интенсификация процессов получения карбидов, нитридов и композиционных материалов на их основе / В. С. Полищук ; – Севастополь: Изд-во Вебер, 2003. - 327 с.
2. Полищук, В.С. Установка для экспресс измерения магнитных свойств магнитно-абразивных порошков / Полищук В.С., Пересадченко А.Н., Алехов Ю.А., Волошанович И.Н // В сборнике: Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы V Международной научной конференции. Под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Донецк, 2020. – Т. С. 40-43.
3. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С Крапошин., Я.Л Липецкий ; М. : "Металлургия", 1980. – 320 с.

УДК 621.762:66.03

РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТА ИЗ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

В.С. Полищук, И.В. Садовая, Ю.А. Алехов, Ф.Н. Сагдеева
ФГБНУ НИИ «РЕАКТИВЭЛЕКТРОН»,
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *В работе проведен расчет давления, возникающего при формировании фильтроэлемента из смесей порошков никеля и алюминия под действием центробежных сил.*
Annotation. *The paper calculates the pressure that occurs during the formation of a filter element from mixtures of nickel and aluminum powders under the action of centrifugal forces.*
Ключевые слова: *фильтровальные материалы, поле центробежных сил, давление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, реакционное спекание*
Keywords: *filtration materials, centrifugal force field, pressure, self-propagating high-temperature synthesis, reaction sintering*

Введение. Проведение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) фильтровальных материалов из экзотермических смесей порошков в поле центробежных сил позволяет сформировать требуемую форму целевого изделия, должным образом уплотнить составляющие компоненты, а в случае жидкофазного реакционного спекания облегчить инфильтрацию жидкой фазы в реакционную зону и осуществить высокотемпературное реакционное спекание в одну стадию [1-3]. При этом качество формовки изделия, эффективность уплотнения и последующего синтеза во многом определяется величиной давления в сформованной порошковой матрице, возникающего под действием центробежных сил. В свою очередь величина центробежной силы (перегрузка) зависит от геометрических параметров реактора, скорости вращения реактора, морфологии частиц исходных порошков. В связи с этим получение расчетных значений указанных параметров представляется весьма интересным.

Основная часть. На рисунке представлен эскиз реактора (в разрезе) для получения фильтроэлементов в поле центробежных сил.

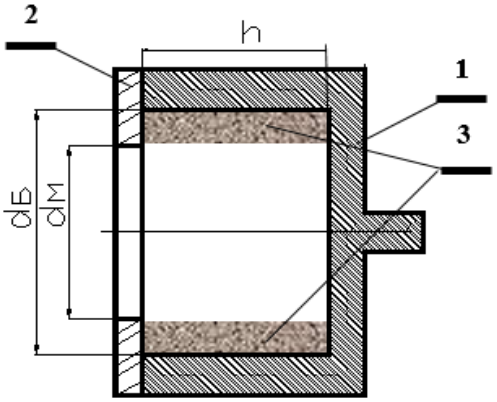


Рисунок – Эскиз реактора для получения фильтроэлементов в поле центробежных сил: 1 – цилиндрический корпус реактора; 2 – ограничительный фланец; 3 – распределенная в результате вращения реактора экзотермическая порошковая смесь.

Из рисунка видно, что загруженная во вращающийся вдоль своей оси цилиндрический реактор экзотермическая смесь, прижатая центробежной силой к внутренней боковой (цилиндрической) стенке реактора, ограниченная фланцем и дном реактора, образует порошковую матрицу цилиндрической формы. При этом матрица характеризуется определенной степенью уплотнения загруженного порошка, которая в свою очередь определяется величиной давления порошка на боковую поверхность реактора. Поскольку эта величина зависит от толщины стенки матрицы (фильтроэлемента) нас будет интересовать ее среднее значение.

Толщина стенки фильтроэлемента $\Delta = (Д_Б – Д_М)/2$, где Δ – толщина стенки фильтроэлемента, см; $Д_Б$ – внешний диаметр фильтроэлемента, см; $Д_М$ – внутренний диаметр фильтроэлемента, см.

Массу порошка, из которого будет изготавливаться фильтроэлемент, можно определить как произведение его насыпной плотности на объем будущего фильтроэлемента $M = V \cdot \gamma_н$, где M – масса исходного порошка, необходимого для изготовления фильтроэлемента, г; V – объем исходного порошка, необходимого для изготовления фильтроэлемента, см^3; $\gamma_н$ – насыпная плотность исходного порошка, г/см^3.

Объем исходного порошка V, необходимого для изготовления фильтроэлемента будет равен $V = \pi \cdot H \cdot \Delta \cdot (Д_Б + Д_М)/2$, где H – высота фильтроэлемента, см.

Давление на боковую стенку реактора засыпанного в него порошка можно рассчитать, как отношение инерционной силы к площади боковой стенки: $P = F/(\pi \cdot Д_Б \cdot H)$, где P – давление исходного порошка на боковые стенки формы при ее вращении, дин/см^2; F – инерционная сила исходного порошка, который давит на боковые стенки при вращении формы, дин, или $P[Г/см^2]=10^{-7} \cdot P[дин/см^2]$, где $P[Г/см^2]$ – давление исходного порошка на боковые стенки реактора при его вращении, Г/см^2; $P[дин/см^2]$ – давление исходного порошка на боковые стенки реактора при его вращении, дин/см^2.

Инерционная сила массы исходного порошка, которая давит на боковую стенку реактора, определяется как: $F = 4 \cdot M \cdot v^2/(Д_Б+Д_М)$, где v – линейная скорость движения массы исходного порошка при его вращении, см/с. Линейная скорость движения массы исходного порошка определяется через угловую скорость и диаметры формы: $v = \pi \cdot \omega \cdot (Д_Б+Д_М)/120$, где ω – угловая скорость движения массы исходного порошка при его вращении, об/мин.

Исходя из изложенных соображений формула расчета среднего давления исходного порошка (экзосмеси) на боковые стенки реактора при его вращении будет иметь следующий вид:

$$P = \frac{\pi m n^2 (Д_Б + Д_М)}{g \cdot Д_Б \cdot H} \quad (1)$$

P – среднее давление, г/см^2;
π – отношение длины окружности к ее диаметру, 3,14;
m – масса навески экзосмеси, г;
n – частота вращения реактора, об/сек;
$Д_Б$ – внутренний диаметр реактора (наружный диаметр фильтра), см;
$Д_М$ – внутренний диаметр фланца (внутренний диаметр фильтра), см;
H – высота реактора (высота фильтра), см;
g – ускорение свободного падения, см/сек^2.

Анализ формулы (1) показывает, что незначительное увеличение частоты вращения реактора приводит к значительному увеличению давления, оказываемого экзосмесью на внутреннюю стенку реактора и, как следствие, большей степени ее уплотнения.

По формуле (1) были произведены расчеты среднего давления исходного порошка (экзосмеси) на боковые стенки реактора двух типоразмеров при его вращении с различной частотой для экзосмесей системы Al-Ni различного химического состава. Результаты расчета приведены в таблице.

Таблица – Среднее давление экзосмесей Ni–Al с различным содержанием компонентов, оказываемое на внутреннюю поверхность реактора при различной скорости его вращения

Скорость вращения реактора, об/мин	Объем фильтра V, см^3	Среднее давление экзосмеси на внутреннюю поверхность реактора, г/см^2		
		Химический состав и насыпная плотность экзосмеси		
		80%$_{масс}$Ni+20%$_{мас}$Al насыпная плотность – 2,24 г/см^3 Смесь №1	70%$_{масс}$Ni+30%$_{мас}$Al насыпная плотность – 2,01 г/см^3 Смесь №2	40%$_{масс}$Ni+60%$_{мас}$Al насыпная плотность – 1,65 г /см^3 Смесь №3
500	69,0[1)]	9,5	8,6	7,0
1000		38,3	34,4	28,0
2000		153,3	137,7	112,2
3800		552,5	495,7	407,0
4000		613,2	551,2	448,9
6000		1380,0	1240,0	1010,0
500	363,0[2)]	37,97	34,09	28,02
1000		151,89	136,36	142,08
2000		607,88	545,78	448,58
3800		2194,65	1970,45	1619,52
4000		2432,24	2183,77	1794,85
6000		5472,00	4913,00	4038,00

[1)] $Д_М$ = 3,7 см, $Д_Б$ = 5,3 см,
[2)] $Д_М$ = 10,0 см, $Д_Б$ = 12,4 см.

Из таблицы видно, что:

уменьшение содержания никеля в составе экзосмеси от 87 до 40%$_{мас}$ приводит к уменьшению предварительно определенной по стандартной методике насыпной плотности экзосмеси в 1,4 раза;

увеличение насыпной плотности всех экзосмесей в 1,4 раза приводит к аналогичному увеличению среднего давления;

увеличение скорости вращения реакторов исследованных типоразмеров от 500 до 6000 об/мин приводит к увеличению среднего давления в 144 раза для всех экзосмесей;

увеличение внутреннего диаметра реактора в 2,5 раза приводит к увеличению среднего давления в 4 раза для всех исследованных экзосмесей;

увеличение толщины стенки формуемого фильтроэлемента (разность между внутренними диаметрами фланца и реактора) в 1,5 раза приводит к увеличению его объема в 5,3 раза;

максимальное значение среднего давления 5472 г/см^2 достигается в экзосмеси с содержанием Ni–80%$_{мас}$ при вращении реактора с

внутренним диаметром 12,4 см и частотой 6000 об/мин и достигаемой при этом перегрузке – a/g = 2252.

Это намного меньше давления (1–8 Т/см^2), создаваемого при формовании порошковых изделий классическим методом сухого прессования в жестких прессформах.

Выводы. Произведенные в работе расчеты позволяют определить величины исходных параметров процесса получения фильтроэлементов методом СВС в поле центробежных сил и рационально выбрать их соотношение.

Перечень ссылок

1. Санин В.Н. / Влияние массовых сил на автоволновые процессы и создание центробежных СВС-технологий / В.Н. Санин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Черноголовка, 2007.– 38 с.

2. Юхвид В.И. / Влияние массовой силы на закономерности горения системы Ni–Al / В.И. Юхвид, В.Н. Санин, С.Л. Силяков, Т.И. Игнатьев // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, №1. – С. 34-38.

3. Полищук В.С. / Разработка и исследование термо- и химическистойких металлокерамических фильтров и создание энергосберегающей технологии их производства / В.С. Полищук, М.И. Еремина, Ю.А. Алехов, К.И. Доценко, Г.С. Яценко, Ф.Н. Сагдеева, И.Н. Волошанович, В.И. Лукьянова, В.В. Уляшова // Наука та інновації. – 2011. – Т.7, № 5. – С. 59-65.

УДК 621.926.9

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОЛОТОЙ ДРОБИ

О.И. Акимова, Э.П. Левченко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *На основе дифференциального уравнения движения механической системы разработан метод обоснования энергосиловых параметров двигателя роторно-ударного измельчителя, на базе которого получены зависимости момента сопротивления на валу и требуемой мощности электродвигателя измельчительной машины в процессе разрушения стальной сферической дроби.*

Annotation. *Based on the differential equation of motion of a mechanical system, a method has been developed to substantiate the energy-power parameters of a rotary impact shredder engine, on the basis of which dependences of the moment of resistance on the shaft and the required power of the electric motor of the shredding machine in the process of destruction of a steel spherical fraction are obtained.*

Ключевые слова: *роторно-ударный измельчитель, стальная колотая дробь, уравнение Лагранжа второго рода, крутящий момент, мощность.*

Keywords: *rotary-impact shredder, steel shot, Lagrange equation of the second kind, torque, power.*

Принцип дробеструйной обработки заключается в том, что на поверхность материала оказывается воздействие абразивом (в данном случае стальной дробью). Посредством мощного воздушного потока стальная дробь позволяет очистить металл от ржавчины, окалины, пригаров, подготовить поверхность изделия или цельной конструкции к нанесению последующих слоёв краски или других материалов, произвести очистку оксидных плёнок перед сварочными работами, а также позволяет повысить прочность материала.

В настоящее время производство стальной дроби осуществляется в шаровых мельницах. Однако в процессе измельчения стальной дроби в данном типе измельчительных машин происходит переизмельчение продукта вследствие его многократного соударения в рабочей камере, что влияет на увеличение энергозатрат на

производство и сказывается на фракционном составе готовой продукции.

Таким образом, для обеспечения эффективности раскалывания стальной дроби, более рациональным является применение прямого стеснённого удара, с целью повышения производительности и энергоэффективности процесса разрушения. В связи с этим было разработано принципиально-новое устройство роторно-ударного измельчителя [1] для раскалывания дроби сферической формы, реализующего способ разрушения стеснённым ударом, как простой и эффективный метод её разрушения.

Для оценки мощности двигателя в первую очередь необходимо определить крутящий момент на валу ротора роторно-ударного измельчителя, требуемый для обеспечения его вращательного движения, который определяется как:

$$M_{кр} = M_p + M_{тр.п.} \qquad (1)$$

где M_p — суммарный момент от сил трения ударников и скребка о дроблёный материал и по внутренней рабочей поверхности рабочей камеры и сил тяжести ударных элементов, Н·м;

$M_{тр.п.}$ — момент от сил трения в подшипниках ротора, Н·м.

Для определения закономерности, по которой изменяется крутящий момент на валу ротора, используется дифференциальное уравнение движения механической системы (уравнения Лагранжа II-ого рода) [2]. В качестве обобщенной координаты принят угол поворота α одного из ударных элементов ротора относительно горизонтальной оси координат *x* (рис. 1).

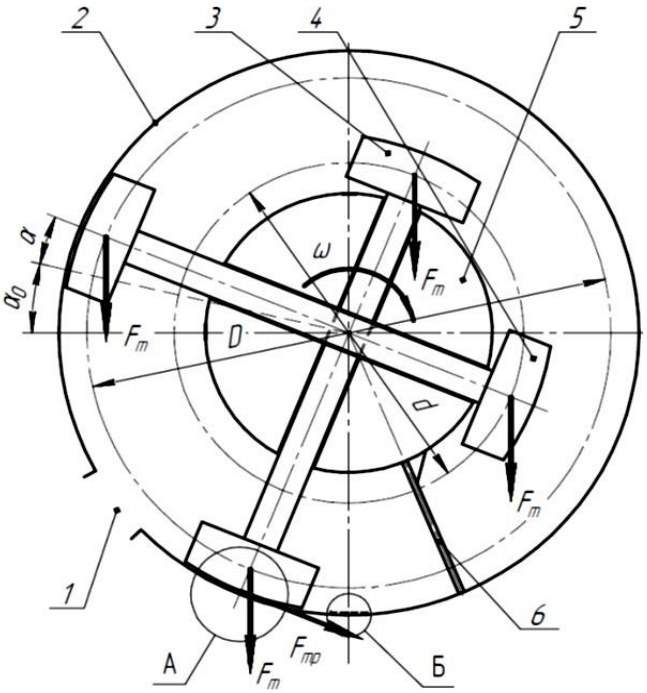
Уравнение Лагранжа второго рода для условий взаимодействия рабочих органов ударного измельчителя:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \qquad (2)$$

В сумму элементарных работ, задаваемых сил и моментов на возможном угловом перемещении ротора и мелющих тел $\delta\alpha$ при их совместном вращательном движении на двух участках рабочей поверхности корпуса измельчителя (при движении в секторе от 0 до α_0; при движении в секторе α_0 до π/2), входят работа крутящего момента от электродвигателя M_p, работа момента силы трения при

взаимодействии ударника со скребком с материалом на поверхности корпуса $M_{тр}$ и работа момента от силы тяжести ударников M_m:

$$\delta A_\alpha = Q_\alpha \cdot \delta\alpha = \left(M_p + M_{тр} + M_m\right) \cdot \delta\alpha\,, \qquad (3)$$



1 — разгрузочное отверстие; 2 — рабочая поверхность корпуса;
3 — мелющее тело в нижнем положении; 4 — мелющее тело в верхнем положении;
5 — ротор; 6 — скребок
А — зона взаимодействия ударника с материалом при движении к выгрузному отверстию; Б — зона ударного контакта ударника с материалом

Рисунок 1 — Расчётная схема для определения крутящего момента на валу роторно-ударного измельчителя

Момент от силы трения мелющего тела по слою дроби определяется как:

$$M_{тр} = F_{тр} \cdot R = m_м \cdot g \cdot \cos\alpha \cdot R \cdot f_2\,, \qquad (4)$$

Момент сопротивления от сил тяжести ударников находится по следующему выражению:

$$M_m = F_m\left(r - R + 2x(\alpha)\right)\cos\alpha = m_м g\left(r - R + 2x(\alpha)\right)\cos\alpha \qquad (5)$$

Принимая во внимание то, что угловая скорость вращательного движения ротора $\omega=\dot{\alpha}=const$ а, следовательно, угловое ускорение при вращении $\ddot{\alpha}=0$, зависимость для определения требуемого крутящего момента примет следующий вид:

$$M_p = -m_м g \times \left[(r-R)(\cos\alpha + \sin\alpha) - 2Rf_2 \cos\alpha \right], \text{если} \quad \alpha \le \alpha_0 ;$$
$$M_p = -m_м g \left[(r-R+2x(\alpha))\cos\alpha - (R-r)\sin\alpha - 2Rf_2 \cos\alpha \right], \text{если} \quad \alpha \ge \alpha_0. \quad (6)$$

где α — угол поворота ротора, рад.

Таким образом, сумма элементарных работ будет определяться как:

$$\delta A_\alpha = M_p + m_м \cdot g \times$$
$$\times \left[(r-R)\cdot(\cos\alpha + \sin\alpha) - 2\cdot R\cdot f_2 \cdot \cos\alpha \right] \cdot \delta\alpha, \text{если} \ \alpha \le \alpha_0 ;$$
$$\delta A_\alpha = M_p + m_м \cdot g \times$$
$$\times \left[(r-R+2\cdot x(\alpha))\cdot\cos\alpha - (R-r)\cdot\sin\alpha - 2\cdot R\cdot f_2 \cdot \cos\alpha \right] \delta\alpha, \text{если} \ \alpha \ge \alpha_0. \quad (7)$$

На основании проведенных преобразований, уравнение Лагранжа второго рода получает окончательный вид:

$$2\cdot m_м \cdot \ddot{\alpha} \cdot \left(R^2 + r^2\right) = M_p + m_м \cdot g \times$$
$$\times \left[(r-R)\cdot(\cos\alpha + \sin\alpha) - 2\cdot R\cdot f_2 \cdot \cos\alpha \right], \text{если} \ \alpha \le \alpha_0 ;$$
$$2\cdot m_м \cdot \ddot{\alpha} \cdot \left(R^2 + r^2\right) = M_p + m_м \cdot g \times$$
$$\times \left[(r-R+2\cdot x(\alpha))\cdot\cos\alpha - (R-r)\cdot\sin\alpha - 2\cdot R\cdot f_2 \cdot \cos\alpha \right], \text{если} \ \alpha \ge \alpha_0. \quad (8)$$

Рассчитав крутящий момент можно определить мощность двигателя роторно-ударного измельчителя как:

$$W_{дв} = \frac{M_{кр} \cdot \omega}{\eta_{пр}} \quad (9)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент, Н·м; $\eta_{пр}$ — КПД привода.

Графическое отображение зависимости необходимого крутящего момента от углового положения ротора в процессе дробления материала представлено на рисунке 2.

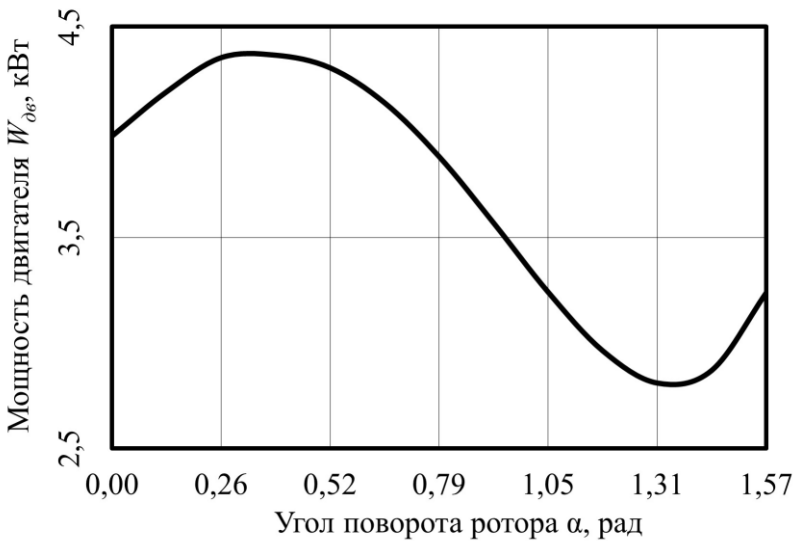


Рисунок 2 — График зависимости крутящего момента от сил трения о материал и сил тяжести молотов от угла положения ротора

Таким образом, мощность электродвигателя роторно-ударного измельчителя можно определить как её максимальное значение, взятое из графика, умноженное на коэффициент запаса $k_{мощ}$.

При этом установлено, что в диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от 0 до π, момент сопротивления и требуемая мощность привода дробильной машины может изменяться в 1,6 раза, при этом максимального своего значения мощность достигает при значении угла поворота ротора, при котором начнётся движение штока ударника относительно направляющих ротора при его вращении α_0.

При четырехрядном исполнении измельчителя и параметрах $k_{мощ}$=1,5 мощность двигателя составит около 17,2 кВт.

На основании проведенных исследований представлены рекомендации в виде энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя в процессе дробления стальной сферической дроби) [3,4].

Перечень ссылок

1. Павлиненко О.И. Приготовление остроугольной стальной дроби методом разрушения «молот по наковальне» / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2020. С. —134–139.

2. Дронг В. И. Курс теоретической механики: учебник для вузов / Дронг В.И., В.В. Дубинин, М.М. Ильин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 735 с.

3. Акимова О. И. Разработка конструкции и обоснование технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дроби: 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / Акимова Ольга Игоревна; ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет». — Алчевск, 2023. — 24 с.

4. Акимова О. И. Инновационные направления в разработке и проектировании роторно-ударных измельчителей: монография / О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, Д.А. Власенко. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. — 120 с.

УДК 621.791.035

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАММИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ИОН 48-900 ДЛЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Н.Н. Подрезов, В.А. Виннийчук, С.А. Томилин
Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ «МИФИ», г.Волгодонск, Россия

Аннотация. *Приведены сведения и характеристики специализированной инверторной системы питания сварочной дуги ИОН 48-900, предназначенной для автоматической сварки под флюсом на программируемых режимах. Источник питания системы является российской разработкой и предназначен для применения в атомном машиностроении.*

Annotation. *The information and characteristics of a specialized inverter power supply system for the welding arc YEN 48-900, designed for automatic submerged arc welding in programmable modes, are given. The power supply of the system is a Russian development and is intended for use in nuclear engineering.*

Ключевые слова: *система питания сварочной дуги, инверторный источник питания, вольт – амперная характеристика, пульсирующая дуга, автоматическая сварка под флюсом (АСФ).*

Keywords: *welding arc power supply system, inverter power supply, volt – ampere characteristic, pulsating arc, automatic submerged welding(SAW).*

По схемному решению источник питания ИОН 48-900, Рис.1, является статическим электрическим преобразователем и обеспечивает преобразование трехфазного переменного тока питающей сети в постоянный выходной ток (выпрямитель) с программируемыми параметрами.

Программируемый выпрямитель ИОН 48-900 характеризуются большим количеством режимов работы и настроечных параметров. Сенсорная панель управления, обеспечивает современный интерфейс, по сравнению со стандартными параметрическими интерфейсами, позволяет работать с устройством на интуитивно-понятном уровне [1]. В качестве универсального источника постоянного тока или напряжения ИОН предназначен для работы в следующих режимах АСФ: простое задание тока и напряжения, периодический режим (импульсный или пульсирующей дугой) и программируемый.

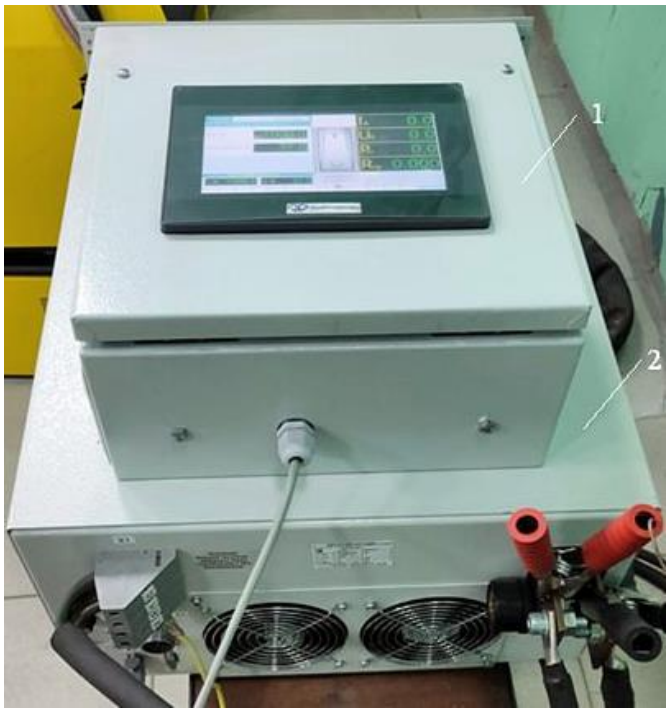


Рис. 1 - Инверторный источник питания ИОН 48-900:
1 – дистанционный пульт; 2 – силовой блок

С точки зрения безопасности эксплуатации источник питания программируемый серии ИОН соответствует Требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» [2], ГОСТ IEC 60950-1-2011 (IEC 60950-1:2005) «Оборудование информационных технологий. Требования безопасности». Часть 1. Общие требования; - ГОСТ IEC 61204-7-2014 «Источники питания низковольтные, вырабатывающие постоянный ток» и другим.

Выполнены исследования статической ВАХ источника питания ИОН 48-900 фирмы «Донавтоматика», тестирование на наличие сервисных функций, Рис.2.

Определение свойств источников питания (ИП), в т.ч. определение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) выполняли на регистраторе сварочных процессов ИНЭМ-ЭКСПЕРТ, разработанном фирмой ООО «Электронмаш-Систем».

Наклон рабочих участков поз. 2 (дифференциальное сопротивление ИП), Рис. 2, находится в пределах - 0,005…0,015В/А, что по классификации [3] относится к жестким характеристикам. Участок поз. 3 защищает ИП от перегрева, величина тока на нем устанавливается программно.

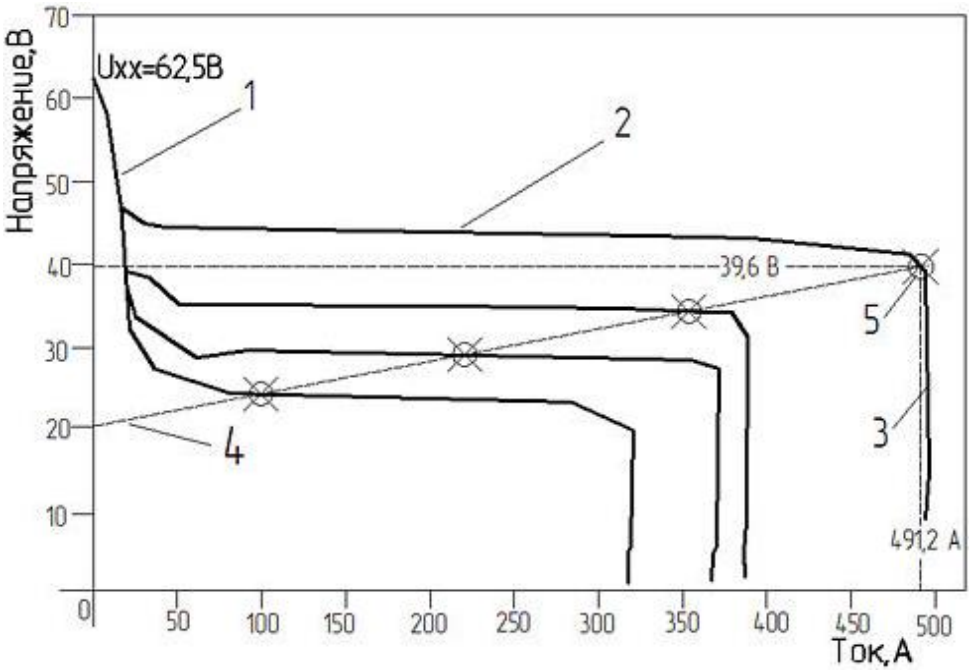


Рисунок 2 - Семейство статических ВАХ ИП ИОН 48-900: 1– участок подпитки (задания Uxx); 2 – рабочий участок АСФ; 3 – отсечка по току («штыковой» участок); 4 – нагрузочная прямая; 5 - рабочая точка U = 39,6 В I = 491,2 А.

Напряжение холостого хода (Uxx) ИП составляет 62,5 В. Сравнительно низкое напряжение холостого хода компенсируется набросом тока в момент зажигания дуги, наподобие сервисной функции «горячий старт» (Hotstart), обычно применяемой в системах питания дуги для ручной дуговой сварки.

В целом по результатам испытаний установлено, что статические характеристики соответствуют требованиям ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012, а схемные решения обеспечивают необходимую продолжительность времени горения дуги без перегрева силовой части источника питания.

Программные режимы определялись путем подбора на контрольных пробах из соображений обеспечения требуемого уровня механических свойств ответственных сварных соединений при условии устойчивости сварочного контура и качественного формирования шва, как показано в [4].

Выводы. Установлено, что система питания SAW-дуги на базе программируемого источника ИОН 48-900 соответствуют заявленным паспортным и техническим данным и рекомендована для прохождения испытаний в промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источники питания программируемые серии ИОН. Руководство по эксплуатации ДА 248.00.000 РЭ [Текст]. – г. Волгодонск: ООО «Донавтоматика», 2018, 41 с.

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 004/2011. О безопасности низковольтного оборудования [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vniis.ru/downloads/

3. ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012. Оборудование для дуговой сварки. Часть 1 Источники сварочного тока [Текст]. - Москва: Стандартинформ, 2014.

4. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным производством: Монография/ Новочерк. гос. техн. университет. Новочеркасск: НГТУ. 1995. – 180 с.

УДК 64.012.42

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНОЙ САПР ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

М. В. Нищерякова, Е. А. Буленков
ФГБОУВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация. *В данной работе рассмотрены особенности применения облачного приложения при проектировании технологических процессов изготовления деталей угольного машиностроения. Описаны преимущества и недостатки облачных приложений.*
Annotation*. This paper explores the features of using cloud application in the design of technological processes for manufacturing parts in the coal engineering industry. The advantages and disadvantages of cloud applications are described.*
Ключевые слова: *облачное производство, технологический процесс, Индустрия 4.0.*
Keywords: *cloud production, technological process, Industry 4.0.*

В современном машиностроении облачные информационные технологии играют ключевую роль, поскольку предоставляют компаниям возможность максимально эффективно использовать ресурсы и оптимизировать процессы проектирования, производства и управления производством [1]. Облачные вычисления позволяют снизить издержки на поддержку и обновление программного обеспечения, улучшить систему хранения и обработки данных, а также обеспечить масштабируемость и гибкость в работе с информацией [2, 3]. Благодаря облачным технологиям машиностроительные предприятия получают возможность быстрее реагировать на изменения рынка, повышать производительность и конкурентоспособность продукции, что делает их использование актуальным и необходимым в современном машиностроении.

Целью выполнения данной работы является повышение эффективности проектирования технологий производства изделий угольного машиностроения путем применения облачных САПР на всех стадиях проектирования изделий.

Использование облачных CAD при проектировании изделий угольного машиностроения имеет множество преимуществ:

1. Доступность и масштабируемость: облачные CAD системы позволяют работать из любой точки мира, где есть доступ к интернету. Это упрощает совместную работу над проектом для удаленных команд и делает процесс более масштабируемым.

2. Улучшенная безопасность данных: облачные CAD системы часто обеспечивают более надежную защиту данных, что позволяет меньше беспокоиться о потере информации.

3. Гибкость и мобильность: доступ к облачным CAD системам через различные устройства и операционные системы обеспечивает удобство работы независимо от местоположения и технических характеристик устройства.

4. Гораздо меньшие затраты на IT: руководство компании не должно будет заботиться о серверах, обновлениях программного обеспечения и других инфраструктурных вопросах.

5. Совместная работа: с помощью облачных CAD систем возможно одновременное редактирование и просмотр проектов несколькими пользователями, что улучшает командную работу и увеличивает производительность.

6. Регулярные обновления и новые функции: облачные CAD системы обычно регулярно обновляются и обогащаются новыми функциями, что позволяет использовать самые современные технологии для проектирования.

Некоторые из недостатков использования облачных CAD при проектировании изделий угольного машиностроения включают в себя:

1. Ограниченные возможности моделирования: облачные CAD-системы могут не предоставлять все необходимые инструменты и функциональности для проектирования сложных изделий, которые могут использоваться в угольном машиностроении.

2. Ограниченный доступ к данным: иногда у облачных CAD-систем могут быть ограничения по доступу к данным из-за проблем с сетью или безопасностью данных.

3. Ограниченная производительность: работа в облаке может быть медленнее, чем работа на локальной машине из-за зависимости от скорости интернет-соединения и серверов облачного провайдера.

4. Проблемы с безопасностью данных: существует риск утечки конфиденциальной информации или нарушения конфиденциальности данных при хранении и обработке в облаке.

5. Ограничения в настройке и индивидуализации: некоторые облачные CAD-системы могут быть менее гибкими и настраиваемыми, чем локальные CAD-системы, что может затруднять

адаптацию к конкретным требованиям угольного машиностроения.

В целом, использование облачных CAD-систем в угольном машиностроении может иметь свои недостатки, но с правильным выбором и настройкой системы можно справиться с большинством из них и добиться эффективного проектирования изделий.

Использование облачных CAD в угольном машиностроении позволит снизить себестоимость проектирования изделий за счет следующих преимуществ:

1. Эффективное совместное использование данных и ресурсов: облачные CAD позволяют инженерам работать над проектом одновременно, обмениваться данными и вносить изменения в реальном времени. Это ускоряет процесс проектирования и снижает затраты на координацию и обмен информацией.

2. Масштабируемость: облачные CAD позволяют масштабировать вычислительные мощности в зависимости от потребностей проекта. Это позволяет избежать излишних затрат на оборудование и программное обеспечение.

3. Уменьшение времени на проектирование: использование облачных CAD позволяет автоматизировать многие процессы проектирования, что позволяет сократить время на разработку и ускорить выход изделия на рынок.

4. Снижение затрат на обновление ПО: обновления программного обеспечения в облачных CAD осуществляются автоматически и бесплатно, что позволяет сэкономить на покупке и обновлении лицензий.

Таким образом, использование облачных CAD в угольном машиностроении поможет снизить себестоимость проектирования за счет эффективного использования ресурсов, уменьшения времени на разработку и обновления ПО, а также масштабируемости вычислительных мощностей.

Перечень ссылок

1. Xi Vincent Wang, Mohammad Givehchi, Lihui Wang (2017) Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning // Procedia CIRP vol. 63 P.: 39 – 45.

2. Yongkui Liu et al. (2018) Cloud manufacturing: latest advancements and future trends // Procedia Manufacturing.- 25.- 62–73. ISSN 2351-9789, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.058.

3. Сухарев О. С. Цифровизация и направления технологического обновления промышленности России // О. С. Сухарев / JOURNAL OF NEW ECONOMY. - Уральский государственный экономический университет. – Т.: 22.- №: 1.- 2021 С: 26-52. ISSN: 2658-5081. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-1-2.

УДК 338.2

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Е.В. Кобзева
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»

Аннотация. *В статье рассмотрены основные тенденции цифровизациии горно-металлургического комплекса. Раскрыты преимущества цифровизации для горно-металлургической отрасли. Приведены примеры реализации российскими компаниями приоритетных цифровых технологий.*
Ключевые слова*: горно-металлургический комплекс, цифровизация, искусственный интеллект, технологии.*
Annotation. *The article discusses the main trends in digitalization of the mining and metallurgical complex. The advantages of digitalization for the mining and metallurgical industry are revealed. Examples of implementation of priority digital technologies by Russian companies are given.*
Keywords: *mining and metallurgical complex, digitalization, artificial intelligence, technology.*

Горно-металлургическая отрасль в России активно внедряет цифровые технологии для повышения эффективности и конкурентоспособности. В настоящий момент можно наблюдать, как меняются правила игры в экономической сфере, новые вызовы требуют от компаний нестандартных решений и значительных усилий. В условиях высокой неопределенности и турбулентности компании вынуждены не только заново выстраивать бизнес-процессы, но и выполнять свои социальные обязательства.

В 2023 году наблюдались ряд ключевых тенденций:

1. Удаленное управление и мониторинг.

Развертывание датчиков Интернета вещей (IoT) для сбора данных о состоянии оборудования и технологических процессах.

Использование цифровых двойников для моделирования и прогнозирования работы шахт, заводов и оборудования.

Создание центров управления, позволяющих осуществлять удаленный мониторинг и управление активами.

2. Автоматизация процессов.

Внедрение робототехники и систем автоматизации для повышения производительности и безопасности труда.

Использование искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации рутинных задач и оптимизации процессов.

Разработка цифровых платформ для интеграции и автоматизации производственных систем.

3. Улучшение управления данными.

Создание централизованных систем управления данными для хранения и анализа огромных объемов данных, генерируемых в процессе производства.

Использование технологий больших данных для выявления закономерностей, прогнозирования отказов и оптимизации принятия решений.

Разработка инструментов визуализации данных для повышения доступности и понимания производственной информации.

4. Кибербезопасность.

Повышение осведомленности о киберугрозах и разработка стратегий кибербезопасности для защиты критически важных систем.

Внедрение передовых технологий кибербезопасности, таких как шифрование, многофакторная аутентификация и системы обнаружения вторжений.

Сотрудничество с внешними экспертами по кибербезопасности для укрепления оборонительных возможностей.

5. Интеграция технологий.

Интеграция различных цифровых технологий, таких как IoT, ИИ, автоматизация и кибербезопасность, для создания комплексных цифровых экосистем.

Разработка открытых стандартов и платформ для обеспечения совместимости между различными системами.

Сотрудничество с поставщиками технологий и технологическими партнерами для внедрения и интеграции цифровых решений.

Преимущества цифровизации для горно-металлургической отрасли:

повышение эффективности производства;

снижение затрат;

улучшение безопасности труда;

увеличение производительности;

повышение конкурентоспособности.

Приведем примеры реализации российскими компаниями приоритетных цифровых технологий:

1. Система предиктивной аналитики качества продукции. ММК разработал и внедрил собственную систему предиктивной аналитики, направленную на апробацию технологических идей без затрат на выплавку и прокатку металлопродукции. Решение производит интеллектуальную обработку данных с применением ИИ и машинного обучения, опираясь на накопленную более чем за 10 лет базу технологических параметров и данных по сталеплавильному переделу, производству горячих и холодных цехов, аттестаций и испытаний. Решение призвано повысить качество продукции, сократить брак, издержки и т. д.

2. Мобильное приложение для клиентов. Приложение CheckSteel, предназначенное для клиентов «Северстали», закупающих продукцию с завода ЧерМК, не прошедшую дополнительную обработку в сервисных центрах, продолжили развивать в 2022 году. Приложение упрощает ведение контроля и учета входящей продукции, снижает трудозатраты клиента на фиксацию отклонений в качестве продукции, дает возможность в удобном формате оставить обратную связь о качестве продукции и получить заключение по обращению от экспертов «Северстали».

Цифровизация шахты Шерегешская. В рамках проекта по цифровизации шахты Шерегешская компании ЕВРАЗ под землей были проведены сеть LTE, сеть передачи данных на основе волоконнооптических линий связи, внедрены системы позиционирования сотрудников, самоходной техники и электровозов, оснащенных специальными датчиками. Также внедрены системы видеомониторинга в ключевых точках процесса производства и система взвешивания вагонов комплекса подземного дробления на горизонте 115 м. Комплекс развернутых систем позволяет контролировать перемещение техники, ключевые показатели производства, управлять процессом, а также обеспечивает безопасность в выработках шахты. Первыми результатами проекта являются увеличение коэффициента использования оборудования на 5% и рост добычи на 500 тонн в 4-м квартале 2021 года.

Мобильное приложение для сотрудников. В 2022 году компания «Полюс» анонсировала начало использования специальных мобильных устройств с тепловизорами на Олимпиадинском ГОКе. С помощью приложения сотрудники могут определять температурный режим и состояние других параметров колес крупногабаритных самосвалов, всего лишь наведя камеру на объект. Решение позволяет быстро определить источник нагревания при наличии избыточного давлении и вовремя устранить проблему.

Выводы. Таким образом, внедрение ИИ-технологий в металлургии позволяет повысить эффективность по ряду критериев: скорость, качество, обьективность, персонализация. По мере дальнейшего развития технологий цифровизация продолжит играть все более важную роль в горно-металлургической отрасли России, обеспечивая преимущества для предприятий и стимулируя инновации.

Перечень ссылок :

1. Зайцев А. «Обзор состояния цифровизации горно-металлургической отрасли в России – 2023»/ А. Зайцев - Режим доступа: metals-mining-digitalization.pdf
2. Варфоломеева В.А., Муслимова Э.Х. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях инновационной экономики // Прогрессивная экономика. 2022. - № 12. С. 41–51.
3. Николаева Е.В., Бирюкова Е.А. Исследование процессов цифровой трансформации горно-металлургических компаний РФ // Economy. 2023. - № 16.- С. 24–36.

УДК 621(926.323+7.014)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОЛОТКОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ ПОДВЕСА НА ОСИ РОТОРА

Д.А. Власенко

Аннотация. *В производственных условиях фракционной подготовки известняка в агломерационном цехе Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» оценивалась эффективность молотковой дробилки с различными способами подвеса молотков на роторе. Проведены испытания дробилки ДМР 14,5×13,0 с целью определения степени дробления и относительной производительности дробильной машины при использовании молотков с фиксацией ряда на оси подвеса и с фиксацией ряда за счет дополнительной оси, установленной в ножке. Выявлено, что средняя степень дробления в усовершенствованной дробилке снизилась на 2,5 %, однако это не сказалось на ее относительной производительности.*

Annotation. *In the production conditions of fractional preparation of limestone in the sintering shop of the Alchevsk Metallurgical Plant LLC «SMMC», the effectiveness of a hammer crusher with various methods of hanging hammers on the rotor was assessed. The crusher DMR 14,5×13,0 was tested in order to determine the degree of crushing and the relative productivity of the crushing machine when using hammers with the row fixed on the suspension axis and with the row fixed due to an additional axis installed in the leg. It was found that the average degree of crushing in the improved crusher decreased by 2,5%, but this did not affect its relative productivity.*

Ключевые слова: *молотковая дробилка, комбинированный способ установки молотков на роторе, степень дробления, относительная производительность*

Key words: *hammer crusher, combined method of installing hammers on the rotor, degree of crushing, relative productivity*

С целью сравнительного анализа показателей эффективности проводились промышленные испытания дробилки ДМРиЭ 14,5×13,0 с комбинированными способами подвеса молотков на роторе.

В ходе исследований применялись рабочие органы с фиксацией ряда молотков на оси подвеса за счет некруглой формы оси подвеса

[1] и с фиксацией ряда молотков за счет дополнительной оси, установленной в ножке [2]. В качестве дробимого материала выступал известняк флюсовый фракцией 40…80 мм.

Для исследований показателей процесса дробления известняка использовались молотковые дробилки, установленные в корпусе дробления известняка участка шихтоподготовки агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК».

Для анализа эффективности процесса дробления определялись: относительная производительность дробильных машин, содержание фракций в готовом продукте и степень дробления материала.

Степень дробления материала определялась как [3]:

$$i_{др} = \frac{D_{ср} M}{\sum_{i}^{n} d_i m_i}, \qquad (1)$$

где $D_{ср}$ – средний размер загружаемого продукта, м; M – общая масса материала, кг; d_i, m_i – средний диаметр кусков и массовая доля i-ой фракции, соответственно м, кг; n – общее количество фракций, на которые рассеивался дробленый материал.

Относительная производительность дробильной машины определялась как [3]:

$$Q_{отн} = \frac{Q_г}{Q_{пр}}. \qquad (2)$$

где $Q_г$ – количество годного продукта, кг; $Q_{пр}$ – общее количество материала, кг.

При испытании проводилось сравнение показателей относительной производительности и степени дробления материала при использовании молотков с различными способами подвеса на оси ротора. Для этого в период эксплуатации в течение 6 полных сроков службы одного комплекта молотков в дробилках №№ 2–4 (в одинаковых условиях режима загрузки) поочередно устанавливались молотки с фиксацией ряда на оси подвеса ротора и с фиксацией ряда на дополнительной оси. Рассевы дробленого продукта определялись один раз в 5 суток на протяжении всего срока эксплуатации молотков до наступления их предельного состояния [4, 5] по износу бойка [6, 7].

На рисунках 1 и 2 представлены графики зависимостей средних значений степени дробления известняка и относительной производительности дробильной машины от срока эксплуатации

молотков с фиксацией ряда молотков на оси подвеса ротора (*а*) и с фиксацией ряда на дополнительной оси (*б*).

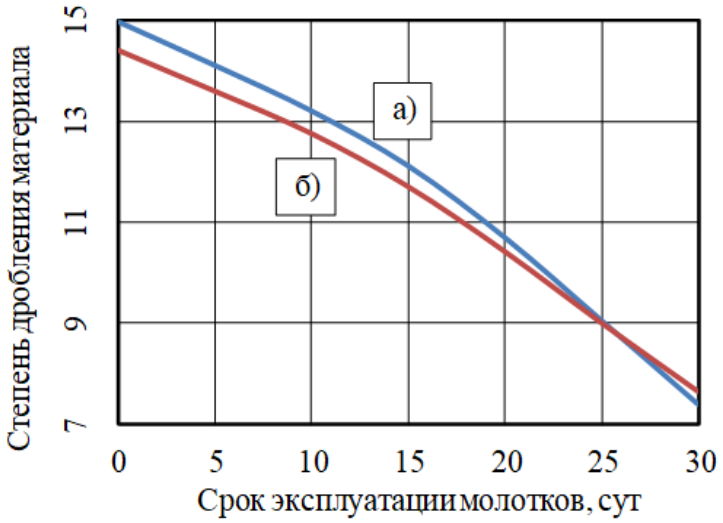


Рисунок 1 – Графики зависимостей степени дробления от срока эксплуатации молотков с фиксацией ряда на оси подвеса ротора (а) и с фиксацией ряда на дополнительной оси (б)

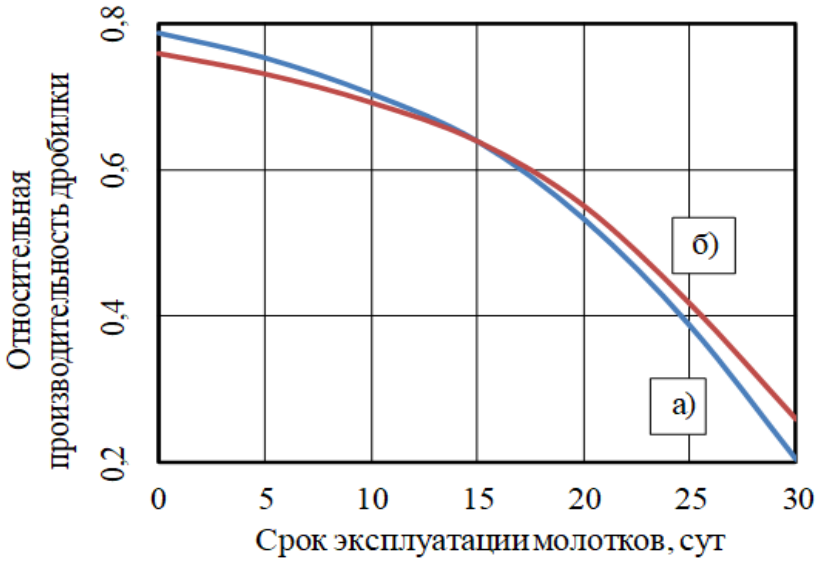


Рисунок 2 – Графики зависимостей относительной производительности дробилки от срока эксплуатации молотков с фиксацией ряда на оси подвеса ротора (а) и с фиксацией ряда на дополнительной оси (б)

Из сравнительного анализа полученных результатов исследования эксплуатационных показателей молотковой дробилки

установлено, что использование усовершенствованной конструкции молотков с фиксацией на дополнительной оси фактически не сказалось на эффективности процесса дробления. Средняя степень дробления известняка снизилась на 2,5 % с 11,7 до 11,3, но при этом средняя относительная производительность дробильной машины осталась на том же уровне.

В тоже время наблюдается тенденция более интенсивного снижения данных показателей при использовании в дробилках молотков с фиксацией ряда на оси подвеса в процессе эксплуатации по сравнению с условиями применения в дробильных машинах ударных рабочих органов с фиксацией ряда за счет дополнительной оси. Связано это с тем, что при изнашивании рабочей поверхности бойка молотка с использованием способа подвеса [1], радиус его инерции уменьшается более стремительно по сравнению с усовершенствованными молотками [2], у которых масса отдельных частей перераспределена за счет использования в конструкции подвеса дополнительной оси [3–7].

Выводы. В результате промышленных испытаний усовершенствованной молотковой дробилки ДМРиЭ 14,5×13,0 в условиях агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК» установлено, что использование в качестве ударного рабочего органа усовершенствованной конструкции молотков с фиксацией молотков в ряду ротора с помощью дополнительной оси фактически не сказалось на эффективности процесса дробления и эксплуатационных показателях дробильной машины. Установлено, что средняя степень дробления известняка флюсового в условиях использования в усовершенствованной дробилке молотков с фиксацией ряда с помощью дополнительной оси снизилась на 2,5 % с 11,7 до 11,3, однако это не сказалось на средней относительной производительности процесса дробления, которая осталась на том же уровне по сравнению с использованием ранее применяемого способа подвеса рабочих органов роторе.

Список литературы

1. Патент на полезную модель № 179695 U1 Российская Федерация, МПК B02C 13/16. Ротор молотковой дробилки: № 2018106733: заявл. 22.02.2018: опубл. 22.05.2018 / Д.А. Власенко, А.В. Карпов; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

2. Патент на полезную модель № 189059 U1 Российская Федерация, МПК B02C 13/16. Ротор молотковой дробилки: № 2018143765: заявл. 10.12.2018: опубл. 07.05.2019 / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко; заявитель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

3. Власенко Д.А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет: учебное пособие / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, А.П. Жильцов [и др.]. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2023. – 140 с. – ISBN 978-5-00175-159-5.

4. Власенко Д.А. Теоретические аспекты моделирования и практика совершенствования молотковых дробилок с комбинированным подвесом молотков / Д.А. Власенко. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – 142 с. – ISBN 978-5-907710-15-3.

5. Vlasenko D.A. Studying the Strength Characteristics of Work Tools of a Hammermill / D.A. Vlasenko, V.P. Dolgikh // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51, No. 10. – P. 739–744. – https://doi.org/10.3103/S0967091221100132.

6. Vlasenko D.A. Estimating the Efficiency of a Hammer Mill with Combined Methods for Suspending Hammers by a Rotor / D.A. Vlasenko // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53, No. 9. – P. 805–809. – https://doi.org/10.3103/s0967091223090188.

7. Власенко Д.А. Анализ влияния износа рабочих органов на эффективность процесса дробления в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, А.А. Харитоненко, А.В. Бочаров [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 1. – С. 26–31. – https://doi.org/10.17580/chm.2024.01.04.

УДК 621.29

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ РАСЧЁТА КРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ МАЛОПОГРУЖНОГО ЭРЛИФТА

А.П. Кононенко, В.А. Панов
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Статья посвящена результатам расчётов критического сечения в смесителе при работе малопогружного эрлифта.*
Annotation. *The article is devoted to the results of calculations of the critical section in the mixer during the operation of a low-submersible airlift.*
Ключевые слова: *Эрлифт, смеситель, погружение, объёмные расходы, подача установки, коэффициент инжекции.*
Keywords: *airlift, mixer, immersion, volumetric flow rates, plant flow, injection coefficient.*

В настоящее время проблема механизации вспомогательных процессов на угольных шахтах решена далеко не полностью. В частности, надёжная работа шахтного водоотлива требует периодической очистки подземных технологических ёмкостей, что сопровождается использованием тяжёлого неквалифицированного ручного труда – производительность труда при этом остаётся низкой.

Анализ существующих схем и средств очистки шахтных технологических ёмкостей показывает, что применение механических средств зачастую не позволяет устранить затраты тяжёлого ручного труда, ресурс рабочего времени основного оборудования мал, оно имеет низкую надёжность и, как следствие, не может удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к подобного рода устройствам.

Значительное распространение получает гидравлический способ очистки подземных технологических ёмкостей, важным достоинством которого является возможность, в ряде случаев, одновременного выполнения одним гидротранспортным агрегатом операций по чистке от шлама водосборных емкостей и откачке притока воды. Это приводит к снижению трудоёмкости процесса очистки и затрат тяжёлого ручного труда.

В качестве средств гидромеханизированной очистки шахтных водоотливных ёмкостей и зумпфов скиповых стволов находят применение гидроэлеваторы, углесосы, шламовые насосы и эрлифты (табл. 1)

Таблица 1 – Сравнение используемых устройств

№№	Устройство	Недостатки
1	Шламовые насосы	Малый ресурс рабочего времени из-за абразивного износа их рабочих колёс. Объёмная концентрация транспортируемой шламовым насосом пульпы не превышает Т:Ж = 1:4, что не позволяет подавать пульпу непосредственно в шахтные вагонетки и требует его обезвоживания.
2	Гидроэлеваторы	Разжижают пульпу вследствие подачи к насадку значительно количества рабочей воды, а для выделения из пульпы твёрдого материала необходимы дополнительные выработки – шламонакопители, из которых осевший материал углепогрузочной машиной грузится в вагонетки и затем транспортируется к опрокидывателю скипового ствола или по клетевому стволу выдаётся на поверхность.
3	Эрлифтные установки	Применение часто сдерживается возможным в конкретных условиях значением относительного погружения, которое, как показал опыт эксплуатации и экспериментальные исследования, для существующих эрлифтных установок должно быть не менее 0,15. При более низких значениях относительного погружения значительно увеличивается удельный расход воздуха, режим работы эрлифта во всём диапазоне рабочих характеристик становится неустойчивым.

На основе анализа параметров зумпфов скиповых стволов, а также других водоотливных ёмкостей установлено, что, как правило, глубина их затапливаемой части составляет от 1 до 3÷4 м, при этом необходимая высота подъёма находится в пределах от 4 до 120 м. Применение в этих условиях обычных эрлифтных установок, когда возможное значение относительного погружения составляет менее 0,15, оказывается неэффективным.

Для устранения недостатков, присущих эрлифтным установкам со смесителями обычного конструктивного выполнения при работе с погружениями $h < 3$ м и $\alpha < 0{,}15$, разработана конструкция смесителя, содержащего элементы струйного аппарата (рис. 1) [1, 2].

Эрлифтная установка содержит подъёмный трубопровод 1, воздуховод 2, соединённый с цилиндрическим коллектором 3, на котором установлен конический сходящийся насадок 4 с основанием, выполненным в виде решётки 5, подающую трубу 6, расположенную соосно с цилиндрической камерой смешения 7. Камера смешения 7 соединяется с коническим сходящимся насадком 4 таким образом, что её выходное отверстие образует в месте перехода цилиндрической камеры смешения 7 в конический сходящийся насадок 4 кольцевой зазор 8 для впуска сжатого воздуха в камеру смешения.

Одной из главных задач при разработке эрлифтных установок с элементами струйного аппарата является определение рациональной площади кольцевого зазора 8, что требует применения метода последовательного приближения (итерации) [1]. Для упрощения расчётов разработан Excel-расчёт для решения поставленной задачи.

Предлагаемый метод расчёта рассмотрим на примере эрлифта при относительной глубине погружения $\alpha = 0{,}01$.

Вначале определяется площадь критического сечения двухфазного потока в камерах смешения, отвечающую скачку уплотнения ($M = 1$) применительно к двум разным режимам работы лабораторной эрлифтной установки (оптимальному и режиму с максимальной подачей) при $\alpha = 0{,}01$ и площади кольцевого сечения $9{,}47 * 10^{-4}$ м^2. На обоих режимах работы установки в подающей трубе наблюдался квазиустановившийся режим движения жидкости.

Для оптимального режима работы числовые значения исходных параметров приняты следующие:

$m_1 = 0{,}27$ кг/с; $m_2 = 2{,}56$ кг/с – секундные массовые расходы соответственно воздуха и воды;

$\upsilon_1 = 246$ м/с; $\upsilon_2 = 0{,}51$ м/с – скорости потоков воздуха и воды на входе в камеру смешения;

$p_1 = 104{,}9 * 10^3$ Н/м^2 – давление в камере смешения;

$\upsilon'_3 = 30{,}10$ м/с – средняя скорость потока газожидкостной смеси в камере смешения (подсчитана по объёмному расходу газожидкостной смеси, приведенному к давлению p_1).

Определяются значения коэффициента инжекции и скорости в камере смешения, исходя из закона сохранения количества движения

$$u = m_2 / m_1 = 2{,}56 / 0{,}27 = 9{,}48;$$

$$\upsilon_3 = \frac{\upsilon_1 + u\upsilon_2}{1+u} = \frac{246 + 9{,}48 \cdot 0{,}51}{1+9{,}48} = 23{,}93 \text{ м/с.}$$

Найденные значения u и υ_3 остаются неизменными в процессе определения итерационной последовательности.

В качестве первого приближения в методе итераций подставляем в зависимость, как предполагаемую, площадь критического сечения, значение $F_{кр} = F_{к.см}$. {$F_{к.см}$ = 3,14156 * $D^2_{к.см}$ / 4 = 0,00723 м^2}

$$\rho_{см} = \frac{m_1 + m_2}{F_{кр}\upsilon_3} = \frac{0{,}27 + 2{,}56}{0{,}00723 \cdot 23{,}93} = 16{,}36 \text{ кг/м}^3.$$

Объёмная концентрация газа в сжатом сечении из равенства

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_{см}}{\rho} = 1 - \frac{16{,}36}{1000} = 0{,}984 .$$

Скорость звука в критическом сечении двухфазного потока

$$a = \sqrt{\frac{p_1}{\rho\varphi(1-\varphi)}} = \sqrt{\frac{104900}{1000 \cdot 0{,}984(1-0{,}984)}} = 81{,}63 \text{ м/с.}$$

Для проверки правильности исходного предположения ($F_{кр} = F_{к.см}$) используем формулу

$$F_{кр} = \frac{\upsilon'_3}{a} F_{к.см} = \frac{30{,}10}{81{,}63} F_{к.см} = 0{,}369 F_{к.см} .$$

Полученный результат свидетельствует об ошибочности исходного предположения. Рассматривая полученное значение как второе приближение, вновь повторяем приведенный выше расчёт, и находим третье приближение и т.д.

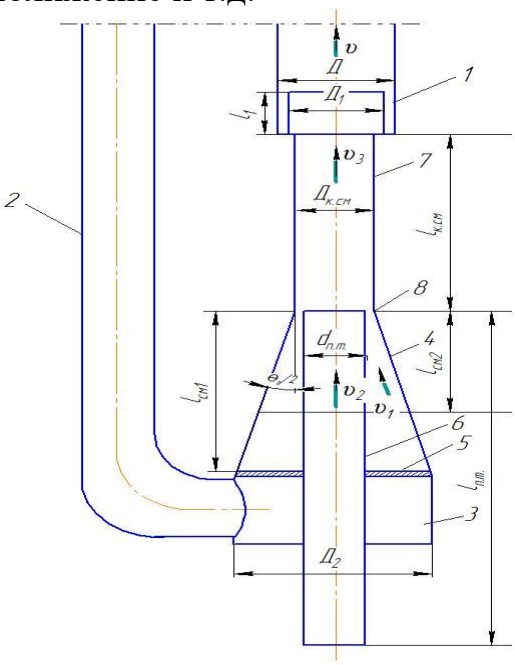


Рисунок 1 – Схема смесителя с элементами струйного аппарата

В сводной таблице 2 представлены результаты расчётов для двух видов эрлифтных установок, с различными площадями кольцевого зазора (рис. 1) и вычисленных отношений площади критического сечения к площади камеры смешения.

Таблица 2 – Сравнение результатов по критическому сечению

Тип ЭУ	Площадь КЗ	Режим	$F_{кр}/F_{КС}$
Лабораторная	$9{,}47 \cdot 10^{-4}$ м^2	Оптимальный	0,517
		Максимальной подачи	0,572
	$32{,}1 \cdot 10^{-4}$ м^2	Максимального расхода воздуха	0,472
Натурная		Оптимальный	0,942

ВЫВОДЫ

В данной работе представлены тестовые результаты алгоритмизации расчётов критического сечения малопогружного эрлифта, что даёт возможность разработать программу для его вычисления при потребных параметрах эрлифтов с элементами струйных аппаратов.

Перечень ссылок

1. Данилов, Е. И. Исследование и разработка эрлифта для гидромеханизированной очистки водоотливных ёмкостей/ Е. И. Данилов // Дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук (05.05.06). – Донецк, 1979. – 298 с. В надзаг: Донецкий политехн. ин-т.

2. Соколов Е. Я. Струйные аппараты.– 3-е изд., перераб. / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер // М.: Энергоатомиздат, 1989.– 352 с.

(УДК 620.19)

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ НА ПРИМЕРЕ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.А. Орлов, Е.В. Крылова,
В.М. Щербаков, А.М. Кенжалыев, А.Д. Авдеев
г. Москва, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»

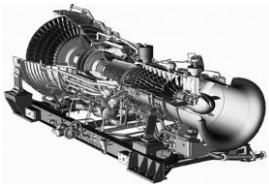
Аннотация. *В докладе представлены результаты цифровизации - 2D и 3D моделирования лопатки газотурбинного двигателя (ГТД), необходимые при технической диагностике (ТД) и неразрушающем контроле (НК) элементов объектов энергетической отрасли, для предотвращения её повреждений при эксплуатации, по фотографиям литейной формы и поперечных сечений самой лопатки.*

Annotation. *The report presents the results of digitalization - 2D and 3D modeling of a gas turbine engine blade (GTE), necessary for technical diagnostics (TD) and non-destructive testing (NDT) of elements of energy industry facilities to prevent damage during operation, based on photographs of the mold and cross sections of the blade itself.*

Ключевые слова: *энергетическое оборудование, цифровизация, 2D-моделирование, 3D-моделирование, лопатка, ГТД.*

Keywords: *energy equipment, digitalization, 2D modeling, 3D modeling, blade, GTE.*

Предотвращение повреждений элементов турбинного оборудования, невозможно без применения технической диагностики (ТД) и методов неразрушающего контроля (НК) [1-3], включающих исследования использующие цифровизацию методы 2-мерного и 3-мерного моделирования его элементов - металлических изделий сложной формы и внутренней структуры, в частности лопатки газотурбинного двигателя (рис.1), как в процессе эксплуатации, так и на стадии изготовления.



а)

б)

Рис.1. Внешний вид (из открытых источников):
а) газотурбинный двигатель (ГТД); в) лопатка ГТД

Энергетические установки, построенные на базе авиационных ГТД, находят применение в различных областях народного хозяйства, в том числе в атомной отрасли, в качестве: энергоприводов; источников сжатого воздуха с большим расходом; эксгаустеров; струйных и струйно-тепловых машин, используемых для перемещения грунта, очистки поверхности от пыли, грязи, льда и снега, диспергирования воды, вентиляции и т. п.; тепловых машин, применяемых для обогрева и сушки различных объектов, ВПП аэродромов; парогазогенераторов в пожаротушении и т. д. [4].

2D и 3D модели лопатки могут быть использованы для исследования текущей температуры воздуха в лопатке в процессе продувки в специализированных CFD-программах точного проектирования и цифрового черчения планов, развёрток, схем и виртуальных трёхмерных моделей (САПР), а также для анализа влияния входных параметров на температуру охлаждающего воздуха лопатки.

Цель работы: цифровизация агрегата атомной отрасли, путем разработки 2D и 3D моделей лопатки ГТД, по фотографиям литейной формы и поперечных сечений самой лопатки.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие з**адачи:**

1. Изучить фотографии литейной формы и поперечных сечений самой лопатки;
2. По изученным фотографиям поперечных сечений самой лопатки и её литейной формы разработать 2D модель лопатки газотурбинного агрегата;
3. По изученным фотографиям поперечных сечений самой лопатки и её литейной формы разработать 3D модель лопатки газотурбинного агрегата.

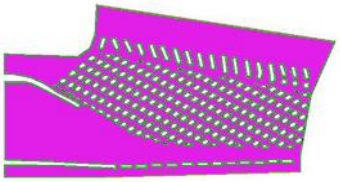
По имеющимся в открытом доступе материалам отчетов [5], были изучены фотографии литейной формы и поперечных сечений самой лопатки ГТД (рис.2):

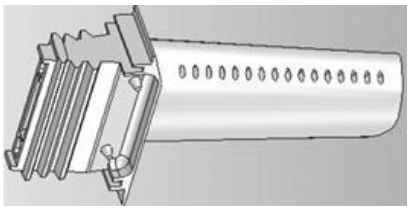
а)

б)

Рис.2 Фотографии: а) литейная форма внутренней; б) поперечные сечения лопатки ГТД

На фотографиях (рис.2) видно, что форма лопатки имеет сложную, изменяющуюся как по длине, так и по ширине внешнюю форму и внутреннюю структуру, а внутренние каналы имеют переменное сечение. При цифровизации, для 2D и 3D моделирования были применены современные методы САПР, с применением программного обеспечения CorelDrav2017 и FreeCad0.18. В результате моделирования получены: 2D модель, в виде среднего сечения лопатки (рис 3.а) и 3D модель лопатки с некоторыми упрощениями (рис.3б).





а) б)

Рис.3. Результаты моделирования лопатки ГТД
а) - 2D модель; б) - 3D модель

Выводы: цель работы достигнута, все поставленные задачи успешно решены, а именно:

1. Изучены фотографии литейной формы и поперечных сечений самой лопатки;
2. По изученным фотографиям поперечных сечений самой лопатки и её литейной формы, в программной среде CorelDrav2017, разработана 2D модель лопатки газотурбинного агрегата;
3. По изученным фотографиям поперечных сечений самой лопатки и её литейной формы, в программной среде FreeCad0.18, разработана 3D модель лопатки газотурбинного агрегата.

Перечень ссылок

1. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Диагностика безопасности. Тепловой контроль. Под общей редакцией академика РАН Клюева В.В. - М.: Издательский дом Спектр, 2011, 171с.

2. L. Capineri, P. Falorni, S. Ivashov and etc. Combined Holographic Subsurfac Radar and Infrared Termography for Diagnosis of the Conditions of Historical Structures and Artworks. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-5343-2, 2009 EGU General Assembly, 2009.

3. S. Yella, M.S. Dougherty and N.K.Gupta, Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing, Insight, Vol. 48, No 1, jan. 2006, pp. 10-19.

4. Сенюшкин Н.С., Лоскутников А.А., Белобровина М.В., Салимова И.И., Жеребило В.Ю. Применение авиационных ГТУ в энергетике. Молодой ученый. - 2013. - № 9 (56). - С. 72-74.

5. Бекаревич А. А., Валиахметов С.А., Будадин О.Н., Чумаков А.Г., Морозова Т.Ю. Тепловой автоматизированный контроль качества и диагностики технического состояния лопаток турбин газотурбинных агрегатов с оценкой надежности эксплуатации. / - Москва: Спектр, 2014. - 317 с. ISBN 978-5-4442-0071-1.

УДК 539.5

СПЕЦИФИКА ТВЁРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.В. Малашенко, Т. И. Малашенко
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт»,
г. Донецк, ДНР
ФГБОУ ВО «Донецкий нацональный
технический университет»,
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Получена аналитическая зависимость динамического предела текучести состаренного сплава от концентрации легирующих элементов.*
Annotation. *An analytical dependence of the dynamic yield stress of an aged alloy on the concentration of alloying elements is obtained.*
Ключевые слова: *высокоскоростная деформация, динамический предел текучести, состаренные сплавы.*
Keywords*: high strain rate deformation, dynamic yield stress, aged alloys.*

Искусственное и естественное старение является хорошо апробированным способом улучшения механических свойств сплавов. Эти свойства могут быть также улучшены благодаря добавкам легирующих элементов. Влияние этих методов на функциональные металлы и сплавы при квазистатическом деформировании исследованы довольно хорошо. Однако при высокоэнергетических внешних воздействиях реализуется высокоскоростная деформация, в процессе которой дислокации совершают надбарьерное скольжение. При этом кардинально изменяется механизм диссипации и важную роль начинают играть динамические коллективные эффекты. Это динамический режим дислокационного движения, который реализуется при ковке, штамповке, высокоскоростной обработке, резке, сварке взрывом и ударно-волновых воздействиях [1].

Метод молекулярной динамики, часто используемый для исследования высокоскоростной деформации, не даёт возможность получать в аналитическом виде зависимость механических свойств сплавов от концентрации легирующих элементов. Для широкого круга задач эту зависимость можно получить в рамках предложенной нами теории динамического взаимодействия дефектов [2, 3].

Пусть ансамбль бесконечных краевых дислокаций совершает надбарьерное скольжение под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в кристалле, содержащем зоны Гинье-Престона и атомы легирующих элементов. Плоскости зон Гинье-Престона параллельны плоскости скольжения дислокаций, а их центры распределены в кристалле случайным образом. Для простоты все зоны будем считать одинаковыми, то есть имеющими одинаковые радиусы R, одинаковую толщину равную диаметру атома второго компонента и одинаковые векторы Бюргерса $\mathbf{b_0} = (0,\ -b_0,\ 0)$ параллельные оси OY. Уравнение движения k-ой дислокации имеет вид

$$m\left\{\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - c^2\frac{\partial^2 X}{\partial z^2}\right\} = b\left[\sigma_0 + \sigma_{xy}^d + \sigma_{xy}^G + \sigma_{xy}^{dis}\right] - B\frac{\partial X}{\partial t}$$

где σ_{xy}^d – компонента тензора напряжений, создаваемых точечными дефектами на линии дислокации, σ_{xy}^G – компонента тензора напряжений, создаваемых на этой линии зонами Гинье-Престона, σ_{xy}^{dis} – компонента, создаваемая остальными дислокациями ансамбля, m – масса единицы длины дислокации, c – скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн, B – константа демпфирования, обусловленная фононными механизмами диссипации. Полная сила торможения дислокации будет равна

$$F = F_G + F_d + Bv$$

Здесь F_G – сила торможения (drag) дислокации зонами Гинье-Престона, F_d – сила торможения, обусловленная взаимодействием дислокации с атомами второго компонента, Bv – фононное торможение. В рассматриваемом нами случае спектр дислокационных колебаний имеет вид

$$\omega^2(q_z) = c^2 q_z^2 + \Delta^2$$

Щель Δ в колебательном спектре может возникать благодаря коллективному взаимодействию растворенных атомов с дислокацией и описывается формулой

$$\Delta = \Delta_d = \frac{c}{b}\left(n_d \chi^2\right)^{1/4},$$

где n_d – безразмерная концентрация растворенных атомов, χ – параметр их размерного несоответствия.

Взаимодействие движущихся дислокаций ансамбля также способно влиять на формирование колебательного спектра. Вклад этого взаимодействия в величину щели определяется формулой

$$\Delta_{dis} = c\sqrt{\rho}$$

где ρ – плотность подвижных дислокаций, μ – модуль сдвига, γ – коэффициент Пуассона.

После выполнения вычислений выражение для динамического предела текучести состаренного сплава примет вид

$$\tau = \frac{\eta}{\sqrt{\left(1+\sqrt{n_d/n_1}\right)}} + \frac{\beta n_d}{\left(1+\sqrt{n_d/n_1}\right)} + \lambda$$

Здесь введены обозначения

$$\beta = \frac{\mu\chi^2\dot{\varepsilon}}{\rho^2 b^3 c}; \qquad \eta = \frac{n_G \mu b_0 R}{\sqrt{\rho}}; \qquad \beta = \frac{B\dot{\varepsilon}}{\rho b c}$$

где $\dot{\varepsilon}$ - скорость пластической деформации.

Динамический предел текучести является немонотонной функцией концентрации атомов второго компонента и имеет максимум при $n_d = n_1$ и минимум при $n_d = n_2$.

$$n_2 = \sqrt[3]{\left(n_G b^3 R\rho c / \dot{\varepsilon}\chi^{3/2}\right)^4}$$

Для значений $b = 4\cdot 10^{-10}$ m, $\gamma = 0.3$, $\chi = 10^{-1}$, $R = 10b$, $n_G = 10^{23}$-10^{24} m^{-3}, $\rho = 6\cdot 10^{15}$ m^{-2}, $c = 3\cdot 10^3$ m/s, $\dot{\varepsilon} = 10^6$ s^{-1} получим $n_1 = 10^{-3} - 10^{-4}$ и $n_2 = 10^{-1} - 10^{-2}$.

Выводы. В условиях высокоэнергетических внешних воздействий зависимость динамического предела текучести от концентрации легирующих элементов является немонотонной и имеет максимум и минимум. Полученные результаты могут быть полезными при определении оптимальной концентрации легирующих элементов.

Перечень ссылок

1. Smith, R. F. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins / R.F. Smith, J. H. Eggert, Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A. // Journal of Applied Physics.–2011. –V. 110. – P. 123515(1–11).

2. Malashenko, V.V. Concentration Dependence of the Dynamic Yield Stress of Aged Aluminum–Copper Alloys under High-Rate Deformation Conditions / V.V. Malashenko // Technical Physics Letters.- 2018.- Vol. 44, No. 9, pp. 827–829.

3. Malashenko, V.V. Influence of the Guinier–Preston Zones on the Concentration Dependence of the Yield Point of the Aged Two-Component Alloys in Conditions of High-Speed Deformation / V.V. Malashenko // Physics of the Solid State.- 2019.- Vol. 61, No. 10, pp. 1800–1803.

УДК 622.232.72.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ В ШНЕКАХ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ С АКТИВНОЙ ВЫГРУЗКОЙ

В.Г. Нечепаев
ФГБОУВП «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Аннотация. *Разработана многопараметрическая нелинейная модель напряженного состояния горной массы для исследования процесса формирования и изменения давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком системы пассивной и активной выгрузки очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.*

Ключевые слова: *очистной комбайн, шнек, исполнительный орган, объем, давление, поток.*

Annotation. *A multiparameter nonlinear model of the stressed state of the rock mass has been developed to study the process of formation and changes in pressure in the flow of coal unloaded by the leading auger of the passive and active unloading system of shearers for the extraction of thin flat seams*

Keywords: *cutter-loader, screw, executive branch, volume, pressure, flow.*

В условиях Донецкого региона наибольшее распространение получила комбайновая выемка узкозахватными очистными комбайнами со шнековыми исполнительными органами, поскольку основные запасы углей сосредоточены в тонких пологих пластах мощностью 0,55…1,20 м.

Оригинальная конструктивная схема шнековых очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов, характеризуемая размещением корпуса комбайна в уступе угольного забоя, обусловливает формирование объемного напряженного состояния разрушенной горной массы в рабочем пространстве исполнительного органа [1-3].

Напряженное состояние разрушенной горной массы неизбежно сопровождается ее циркуляцией, измельчением и ограничением технической производительности комбайна в целом [1-3]. Установление рациональных параметров шнековых исполнительных органов, функционирующих в специфических условиях напряженного состояния горной массы, обусловливает необходимость моделирования формирования и изменения ее напряженного состояния.

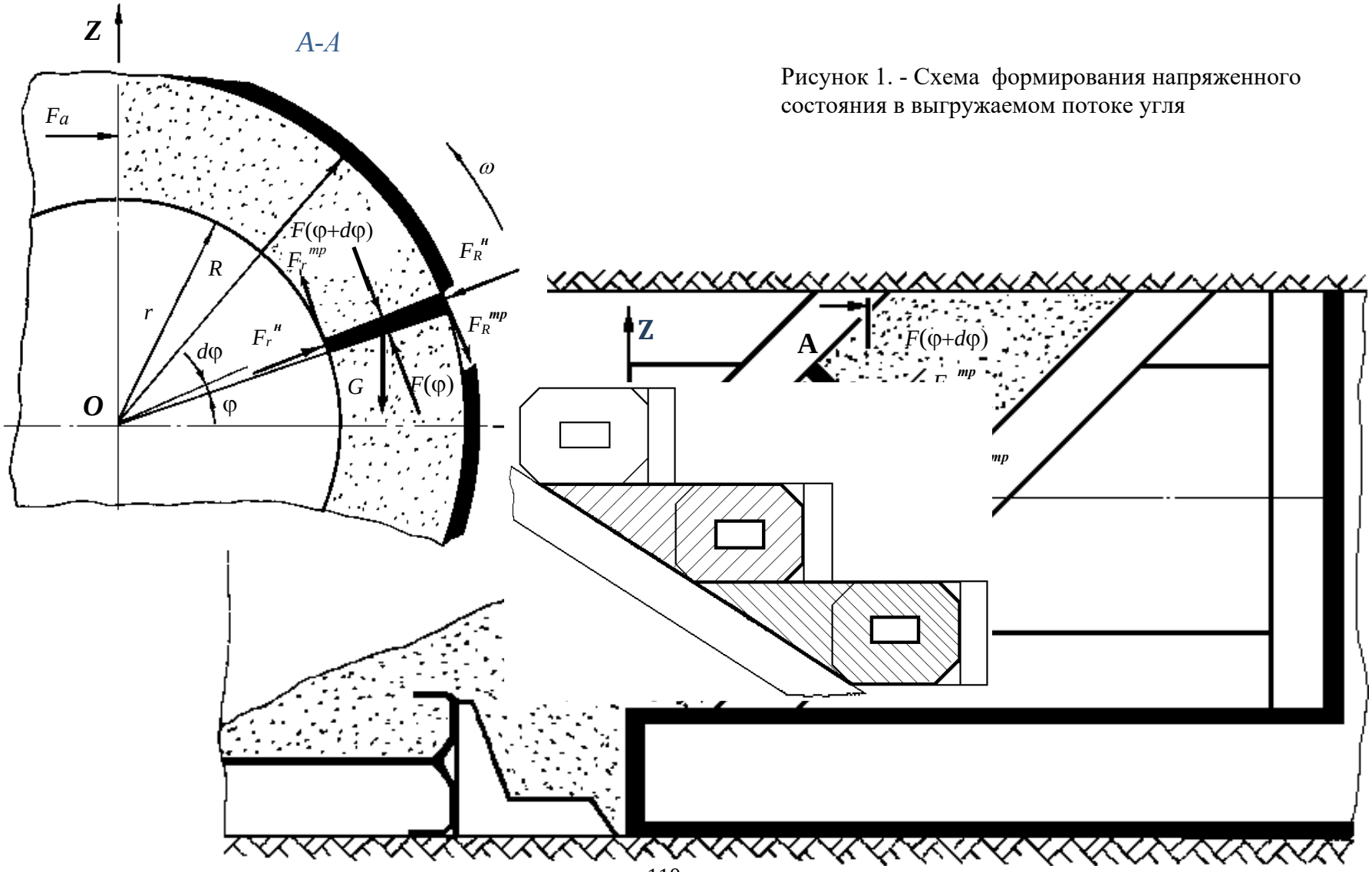


Рисунок 1. - Схема формирования напряженного состояния в выгружаемом потоке угля

На рис.1 представлена расчетная схема для разработки математической модели процесса формирования и изменения давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком очистного комбайна с активной выгрузкой [4,5].

На основе этой схемы выполнена математическая формализация в виде системы уравнений (1), описывающих процесс формирования и изменения давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком очистного комбайна для выемки тонких пологих пластов [4,5].

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot \sin\alpha \cdot dp_{\acute{i}} + k_v^{R2} n_{\min} \cdot p_{\acute{i}} \cdot S_R \cdot f_{R2} \cdot \sin\alpha - \\ - k_v^r \cdot n_{\min} \cdot p_{\acute{i}} \cdot S_r \cdot f_r \cdot \sin\alpha + S_{\ddot{e}} \cdot p_{\ddot{e}} \cdot (\cos\alpha - f_{\ddot{e}} \cdot \sin\alpha) = 0; \\ \sum F_z = 0 \\ - \rho_y \cdot g \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot \delta_{\tilde{n}\ddot{e}} - S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot dp_{\acute{i}} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\phi - k_v^{R2} \cdot p_{\acute{i}} n_{\min} \cdot S_R \cdot \sin\varphi + \\ + k_v^r \cdot p_{\acute{i}} \cdot n_{\min} \cdot S_r \cdot \sin\varphi - k_v^{R1} \cdot p_{\acute{i}} \cdot n_{\min} \cdot S_R \cdot f_{R1} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi + \\ + k_v^r \cdot p_{\acute{i}} \cdot n_{\min} \cdot S_r \cdot f_r \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi + \\ + S_{\ddot{e}} \cdot p_{\ddot{e}} \cdot (\sin\alpha + f_{\ddot{e}} \cdot \cos\alpha) \cdot \cos\varphi = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В уравнениях (1) приняты следующие обозначения:

- $\delta_{\tilde{n}\ddot{e}}$ – толщина элементарного слоя, выделенного на угловом расстоянии φ от начала координат;
- $S_{\tilde{n}\ddot{e}}$ – площадь элементарного слоя;
- $p_н$ и $dp_н$ – среднее нормальное давление на выделенный слой угля и его приращение;
- S_R - площадь контактирования выделенного слоя с забоем;
- f_R – коэффициент трения разрушенного угля по не разрушенному забою

(f_{R1} - коэффициент трения покоя; f_{R2} - коэффициент трения движения);

- S_r - площадь контактирования выделенного слоя со ступицей шнека;
- f_r – коэффициент трения разрушенного угля по ступице шнека;
- $p_л$ – давление на выделенный слой со стороны лопасти;
- $S_л$ – площадь контактирования выделенного слоя с рабочей поверхностью лопасти шнека;

- $f_л$ – коэффициент трения разрушенного угля по лопасти шнека;
- ρ_y – плотность транспортируемого угля;
- g – ускорение свободного падения.
- n_{min} – коэффициент бокового давления;

k_v^r и k_v^R – коэффициенты, отражающие влияние скорости относительного движения (скольжения) выделенного слоя соответственно по ступице шнека и по наружному диаметру лопасти;

- α – угол подъема лопастей шнека на радиусе r (соответствует ступице шнека).

Далее выполнив ряд преобразований системы (1), приведем ее к виду, удобному для моделирования изучаемого процесса.

Выразим из первого уравнения системы (1) $p_л$

$$p_л = \frac{-p_н \cdot n_{\min} \cdot \sin\alpha \cdot (S_R \cdot f_R \cdot k_v^{R2} - S_r \cdot f_r \cdot k_v^r - S_{сл} \cdot \sin\alpha \cdot dp_н)}{S_л \cdot (\cos\alpha - f_л \cdot \sin\alpha)} \qquad (2)$$

Подставим выражение (2) во второе уравнение системы (1) и после ряда последовательных преобразований получаем уравнение

$$\frac{d}{d\varphi} \cdot p_н = \frac{p_н}{R-r} \cdot \Big[(k_v^r \cdot r - k_v^{R2} \cdot R) \cdot (\cos\alpha - f_л \cdot \sin\alpha) \cdot n_{\min} \cdot \mathrm{tg}\,\varphi +$$
$$+ \cos\alpha \cdot (k_v^r \cdot r \cdot f_r - k_v^{R1} \cdot R \cdot f_{R1}) \cdot (\cos\alpha - f_л \cdot \sin\alpha) \cdot n_{\min} +$$
$$+ \sin\alpha \cdot (k_v^r \cdot r \cdot f_r - k_v^{R2} \cdot R \cdot f_{R2})(\sin\alpha + f_л \cdot \cos\alpha) \cdot n_{\min}\Big] +$$
$$+ \frac{\rho_y \cdot g}{2 \cdot \cos\phi} \cdot (R + r) \cdot (\cos\alpha - f_л \sin\alpha)$$

Обозначаем

$$a_1 = \frac{\rho_y \cdot g}{2} \cdot (R + r) \cdot (\cos\alpha - f_л \cdot \sin\alpha);$$

$$a_2 = \frac{n_{\min}}{R-r} \cdot (k_v^r \cdot r - k_v^{R2} \cdot R) \cdot (\cos\alpha - f_л \cdot \sin\alpha);$$

$$a_3 = \frac{n_{\min}}{R-r} \cdot \Big[\cos(\alpha)(k_v^r r f_r - k_v^{R1} R f_{R1})(\cos(\alpha) - f_л \sin(\alpha)) +$$
$$+ \sin\alpha \cdot (k_v^r \cdot r \cdot f_r - k_v^{R2} \cdot R \cdot f_{R2}) \cdot (\sin\alpha - f_л \cdot \cos\alpha)\Big] \cdot$$

Получаем

$$\frac{dp_н}{d\varphi} = \frac{a_1}{\cos(\varphi)} + p_н (a_2\, \mathrm{tg}\,\varphi + a_3). \qquad (3)$$

Выражение (3) представляет собой линейное неоднородное уравнение первого порядка вида

$$y^1(\varphi) + \rho(\varphi) \cdot y = Q(\varphi), \qquad (4)$$

где - $y^1(\varphi) = \dfrac{dp_н}{d\varphi}$; $y = p_н$; $\rho(\varphi) = a_2 \cdot \mathrm{tg}\,\varphi + a_3$; $Q(\phi) = \dfrac{a_1}{\cos\varphi}$.

Уравнение решается при начальных условиях

$$p_н(\phi_0) = p_{но} \quad \text{или} \quad p_л(\phi_0) = p_{ло},$$

где φ_0 - начальный угол.

Вид начальных условий определяется тем, в каком сечении задается значение $p_{но}$ или $p_{ло}$ в соответствии с физическим смыслом решаемой задачи. Так, отсутствию вращательного переноса угля соответствует условие $p_{но} = 0$ в окрестностях точки $\varphi = \dfrac{\pi}{2}$. Приложение в окрестностях этой точки дополнительного активирующего распределенного силового воздействия струй жидкости или водовоздушной смеси к углю, подверженному вращательному переносу, отражается условием

$$p_{но} = p_{гд},$$

где $p_{гд}$ - давление, обусловленное распределенным силовым пневмо-гидродинамическим воздействием напорных струй.

Решение уравнения (4) имеет вид

$$p_н = \exp\left(-\int \rho(\varphi) \cdot d\varphi\right) \cdot \left[\int Q(\varphi) \cdot \exp\left(\int \rho(\varphi) \cdot d\varphi\right) \cdot d\varphi + C\right],$$

а решение уравнения (3) соответственно

$$p_i = \exp\left[\int (a_2 \cdot \mathrm{tg}\varphi + a_3) \cdot d\varphi\right] \cdot \left[\int \frac{-a_1}{\cos\varphi} \cdot \exp\left[\int -(a_2 \cdot \mathrm{tg}\varphi + a_3) \cdot d\varphi\right] \cdot d\varphi + C\right]. \qquad (5)$$

После преобразований выражение (5) приобретает вид

$$p_н = \frac{\exp(a_3 \cdot \varphi)}{(\cos\varphi)^{a_2}} \cdot \left[\int -a_1 \cdot \cos\varphi^{(-1+a_2)} \cdot \exp(-a_3 \cdot \varphi) \cdot d\varphi\right] + \\ + \cos\varphi^{(-a_2)} \cdot \exp(a_3 \cdot \varphi) \cdot C, \qquad (6)$$

либо

$$p_н = \frac{(\cos\varphi)^{a_2}}{\exp(a_3 \cdot \varphi)} \cdot \int \left[-\frac{a_1}{\cos\varphi} \cdot \exp\left[(-a_2 \cdot \ln(\cos(\varphi)) + a_3 \cdot \varphi\right] \right] d\varphi + \\ + \cos\varphi^{a_2} \cdot \left[\exp(a_3 \cdot \varphi)\right]^{-1} \cdot C. \quad (7)$$

Выражение (2) преобразуется к виду

$$p_л = \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot n_{\min} \cdot (R \cdot k_v^{R2} \cdot f_{R2} - r \cdot k_v^r \cdot f_r) \cdot \sin\alpha^2}{(f_л \cdot \sin\alpha - \cos\alpha) \cdot (R^2 - r^2)} \cdot p_н + \\ + \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin\alpha^2}{(f_л \sin\alpha - \cos\alpha) \cdot (R + r)} \cdot \frac{dp_н}{d\varphi} \quad (8)$$

Выражения (6 и 7) представляют собой решения уравнения (3) в квадратурах. Поскольку выражение для $p_н$ не может быть получено в элементарных математических функциях, то уравнение (3) решалось численно методом Рунге-Кутта 4-го порядка аппроксимации. В результате пробных расчетов была определена разностная сетка, содержащая 40 расчетных узлов.

Зависимости (6 и 7), представляющие собой решения уравнения (3), являются многопараметрическими функциями и по своей физической сути отражают изменение нормального давления в потоке перемещаемого и выгружаемого угля в зависимости от:

- угла охвата шнека;
- конструктивных параметров шнека – наружного диаметра лопасти, диаметра обечайки, угла подъема лопастей и др.;
- режимного параметра – частоты вращения шнека;
- физико - механических характеристик транспортируемой сыпучей среды – плотности, коэффициентов трения по рабочим поверхностям шнека и по неразрушенному забою, коэффициента внутреннего трения;
- силы распределенного гидродинамического воздействия.

Выражение (8) позволяет определять изменение давления на рабочих поверхностях лопастей шнеков как функцию вышеперечисленных величин.

Разработанная математическая модель устойчиво работает при варьировании конструктивных и режимных параметров системы

выгрузки, а также физико - механических характеристик транспортируемой сыпучей среды во всем практически возможном диапазоне их изменения. Кроме того, модель пригодна для исследования систем пассивной выгрузки угля, которые в этом случае рассматриваются как частный случай систем активной выгрузки с нулевым значением активирующего воздействия. Таким образом, модель является универсальной как в смысле применимости к различным системам выгрузки (активным и пассивным), так и в смысле практического отсутствия ограничений на возможный диапазон изменения параметров.

Выводы. Разработана многопараметрическая нелинейная модель напряженного состояния горной массы, описывающая изменение нормального давления в потоке перемещаемого и выгружаемого угля шнеками очистных комбайнов с активной выгрузкой

Список литературы

1. Шабаев О.Е. Установление зависимости погрузочной способности шнековых очистных комбайнов от их режимных параметров на основе модельных и натурных экспериментов / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, Степаненко [и др.] // Международный научно-технический журнал. Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №3(17). – С. 42-51.
2. Шабаев, О. Е. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям [Текст] / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаев, П. П. Зинченко // Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета». – 2020. – №3. – С. 43 – 51.
3. Нечепаев В.Г. Модель формирования объема рабочей камеры шнекового исполнительного органа очистного комбайна для выемки тонких пологих пластов /В.Г. Нечепаев//Инновационные перспективы Донбасса. Материалы 7-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 2021. Издательство: Донецкий национальный технический университет (Донецк). - С. 134-139.
4. Нечепаев В.Г. Физическая модель напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной выгрузкой / В.Г. Нечепаев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 23-25 мая 2023 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2023. -С.14-17.
5. Нечепаев В.Г. Расчетная схема для моделирования напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной системой выгрузки / В.Г. Нечепаев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 23-25 мая 2022 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2023. -С.18-23.

УДК 622.6.2

ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ МАГНИТОПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Гордин С. А., техник НИЛ ЦТПМСК
Захаров А. Ю., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева
г. Кемерово

Аннотация: *Магнитопроводящие экраны представляют собой устройства, способные изменять параметры магнитного поля. Они изготавливаются из материалов с высокой магнитной проницаемостью, таких как сплавы железа, никеля и кобальта, и работают, создавая путь с низким сопротивлением для магнитного потока.*

Ключевые слова: *Магнитная левитации, магнитный подвес, магнитопроводящие экраны, напряжённость поля.*

Abstract: *Magnetic conductive screens are devices capable of changing the parameters of a magnetic field. They are made from materials with high magnetic permeability, such as alloys of iron, nickel and cobalt, and work by creating a low-resistance path for magnetic flux.*

Key words: *Magnetic levitation, magnetic suspension, magnetically conductive screens, field strength.*

Металлоконструкции, на которых размещены источники магнитного поля, могут выполнять роль магнитопроводящих экранов, снижая напряженность магнитного поля.

Когда источник магнитного поля размещается внутри или рядом с магнитопроводящей металлоконструкцией, магнитное поле концентрируется внутри конструкции и направляется по ее контуру.

Магнитопроводящие экраны, обладают способностью создавать собственное магнитное поле в ответ на приложенное внешнее поле. Собственное магнитное поле экрана направлено [1] противоположно внешнему полю, что приводит к искажению и ослаблению исходного поля.

В устройствах, использующих принцип магнитной левитации, стабильность и работоспособность системы зависят от точной калибровки параметров магнитного поля. Магнитопроводящие экраны, такие как металлические корпуса или близлежащие ферромагнитные материалы, могут искажать или изменять магнитное поле, что приводит к нестабильности или даже неработоспособности

системы. Эти экраны могут создавать вихревые токи или отклонять магнитные потоки, что влияет на силу левитации и приводит к нежелательным колебаниям или даже к опрокидыванию магнитного подвеса [2]. Поэтому в таких системах критически важно учитывать влияние магнитопроводящих экранов и принимать меры для минимизации их воздействия, чтобы обеспечить стабильную и надежную работу.

Магнитные проводящие экраны разной формы искажают магнитные поля по-разному в зависимости от их размеров, расположения и ориентации относительно источника.

В данной работе были рассмотрены магнитопроводящие экраны двух форм - арочный и плоский. Изучение влияния экранов на магнитное поле источника позволяет понять их способность искажать поле источника в различных условиях.

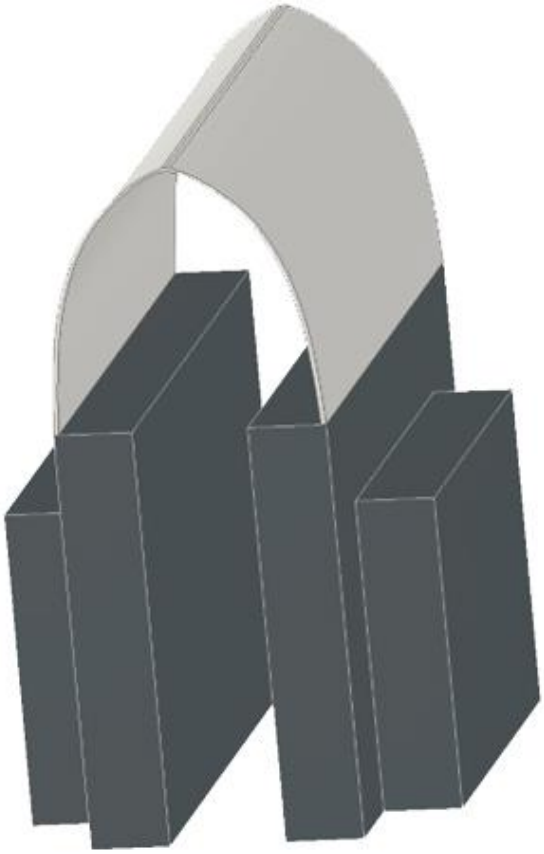


Рис. 1 Стенд для проведения опыта с арочным экраном

Арочный магнитопроводящий экран представляет собой криволинейную структуру, обладающую способностью искажать

магнитное поле источника. Изменения радиус дуги и его размеры можно манипулировать напряжённостью магнитного поля.

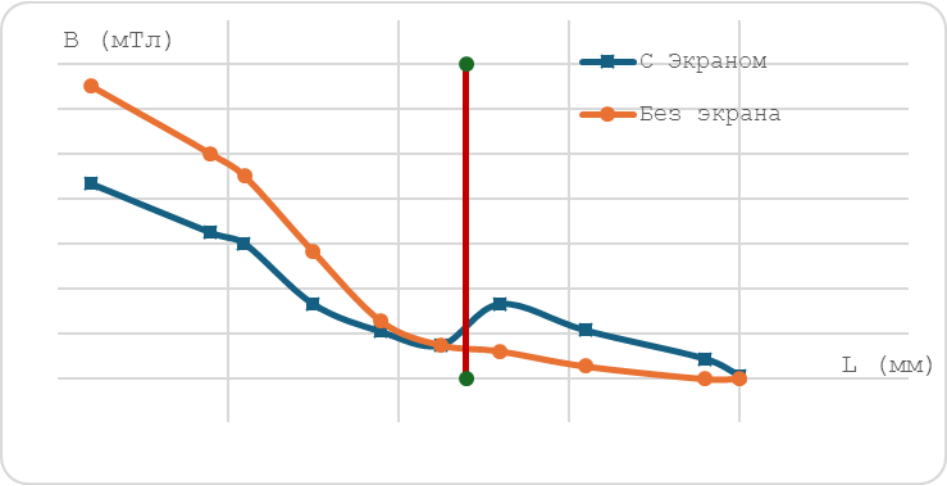


Рис. 2 результаты эксперимента с арочным экраном

В ходе исследования было установлено, что арочный магнитопроводящий экран выполняет функцию магнитного концентратора, усиливая напряженность магнитного поля в вершине экрана, однако ослабляя его внутри экрана [3]. Данное явление обусловлено особенностями геометрии экрана. Эту характеристику необходимо учитывать при разработке устройств, основанных на принципе магнитной левитации, поскольку увеличение напряженности магнитного поля в нежелательной зоне может привести к нестабильности подвеса и его опрокидыванию.

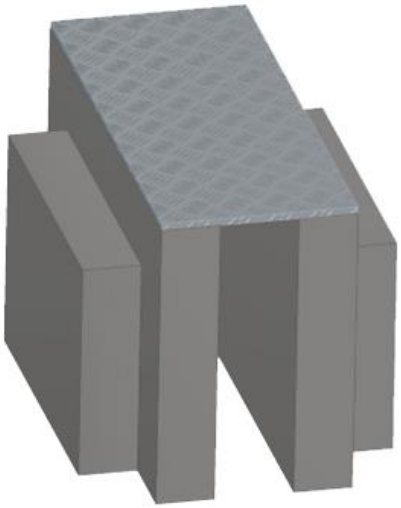


Рис. 3 Стенд для проведения опыта с плоским экраном

Плоский магнитопроводящий экран — это металлическая пластина, обладающая способностью пропускать магнитное поле [4]. Такой экран служит для управления магнитным полем, блокирования его распространения или его концентрации в определенной области. Обычно используется для защиты от внешних магнитных полей или для создания специфических магнитных условий в определенных устройствах или системах [5]. Понимание того, как плоский магнитопроводящий экран влияет на магнитные поля, важно при конструировании магнитных систем. Искажения, вызванные экраном, могут существенно влиять на работу системы, ее эффективность и надежность.

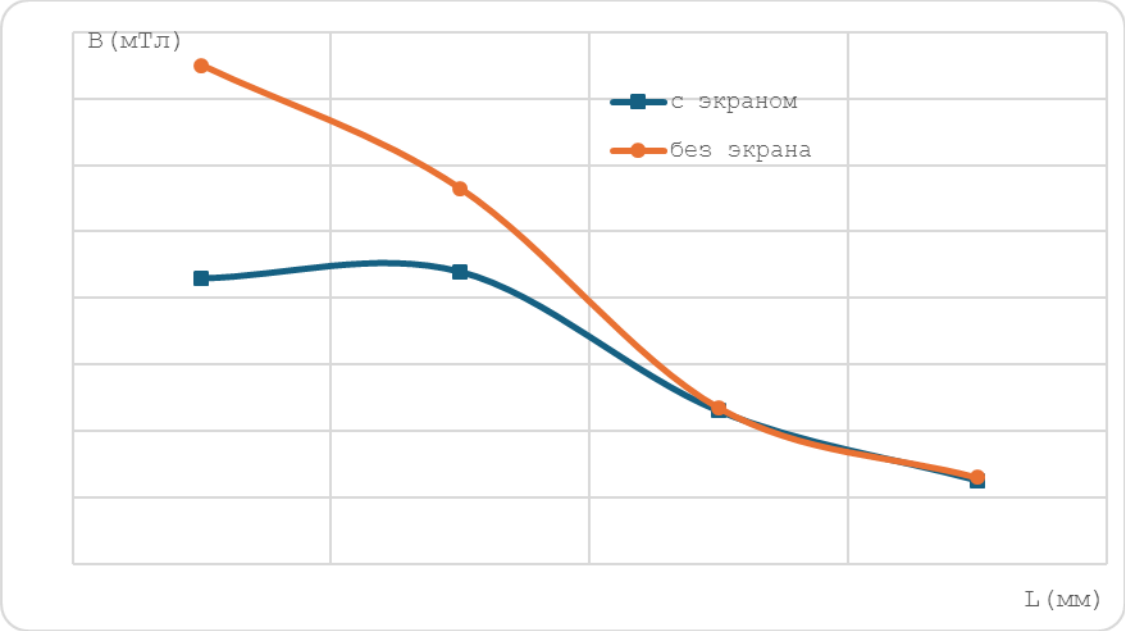


Рис. 4 Результаты эксперимента с плоским экраном

В ходе проведенного эксперимента было установлено, что плоский магнитопроводящий экран проявляет способность к уменьшению напряжённости магнитного поля в незначительном расстояние от его поверхности. При измерениях на более значительном расстоянии от экрана наблюдаемые значения напряжённости магнитного поля практически незаметны при наличии и отсутствии экрана.

В результате исследования были выявлены особенности влияния магнитопроводящих экранов на параметры магнитного поля источника. Различные формы экранов, включая арочные и плоские, обладают способностью изменять напряженность поля в их

окрестности. Арочные экраны могут усиливать напряженность поля в вершине экрана, но одновременно ослаблять его внутри экрана из-за геометрических особенностей. Плоский экран, наоборот, способен уменьшать напряженность поля на незначительном расстоянии от его поверхности. Эти результаты имеют важное значение для проектирования устройств, работающих на принципе магнитной левитации, поскольку понимание влияния магнитопроводящих экранов помогает обеспечить стабильность и эффективность работы таких систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Перечень ссылок

1. M'hamed,Ouadah&Younes,Abderrahmane&Touhami,Omar&Ibtiouen,R.(2024).Assessingtheimpactofmagneticcircuitcorrosiononthemagneticperformanceofinductionmachines.ElectricalEngineering.1–11.10.1007/s00202-023-02203-9.
2. Пятин, Ю.М. Постоянные магниты справочник / Ю.М. Пятин. – Москва : Энергия, 1980. – 370 с.
3. Захаров, А. Ю. Теория и практика использования магнитных полей для предохранения конвейрных лент / А. Ю. Захаров. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2000. – 156 с. – ISBN 5-89070-203-5. – EDN VOMRYP.
4. Li,Chunlai&Yang,Yongyan&Du,Jianrong&Chen,Zhen.(2021).Asimplechaoticcircuitwithmagneticflux-controlledmemristor.TheEuropeanPhysicalJournalSpecialTopics.230.1–14.10.1140/epjs/s11734-021-00181-2.
5. Kuang,Yang&Chew,Zheng&Ruan,Tingwen&Zhu,Meiling.(2021).MagneticFieldEnergyHarvestingFromCurrent-CarryingStructures:Electromagnetic-CircuitCoupledModel,ValidationandApplication.IEEEAccess.PP.1–1.10.1109/ACCESS.2021.3068472.

УДК 622.23.05

НОВЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ. КИНЕМАТИКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

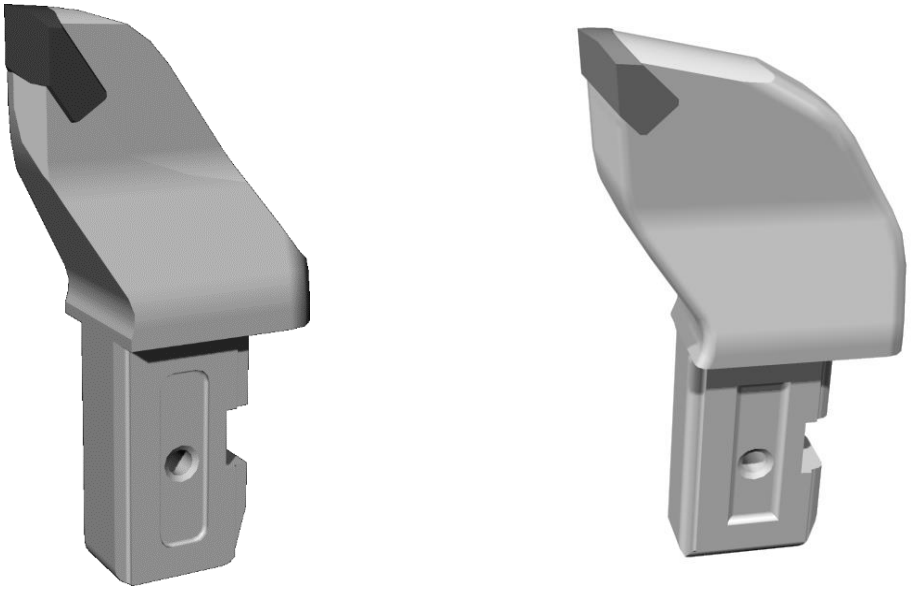
А.П. Кононенко, Е.Н. Бойко
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР

Аннотация: *непосредственное разрушение пласта (угля, породных и других прослойков, а также твердых включений, если они или прорезаются инструментом, или выбиваются из пласта) производится режущим инструментом, который устанавливается и закрепляется на рабочем (исполнительном) органа комбайна.*
Annotation: *the direct destruction of the formation (coal, rock and other layers, as well as solid inclusions, if they are either cut through with a tool or knocked out of the formation) is carried out with a cutting tool, which is installed and fixed on the working (executive) body of the combine.*
Ключевые слова*: режущий инструмент, новый, схема набора, кинематика*
Keywords: *cutting tool, new, set diagram, kinematics*

Основной текст. Установленные практикой использования серийно изготавливаемого режущего инструмента горных машин и выявленные его недостатки, побудили авторов настоящей работы к разработке и созданию нового режущего инструмента, который был бы лишен, в первую очередь, таких недостатков, как недостаточная прочность и износостойкость, и не надежное крепление на рабочем органе.

Такой режущий инструмент радиального типа (резцы типа ЗРБ) был разработан, рис.1, производился и использовался на некоторых шахтах, например, на шахте «Должанская-Капитальная» ОП «Свердловантрацит», АП «Шахта им. А.Ф. Засядько».

Основное требование, которому удовлетворяют эти параметры режущей части разработанного резца можно сформулировать следующим образом – **максимальное обеспечение прочности и износостойкости резца независимо от условий его работы.**
Наряду с разработкой и созданием резцов радиального типа разработаны и созданы резцы тангенциального типа – резцы типа РТБ, рис. 2.



а) *б)*

Рис. 1 – Вид резца типа ЗРБ2-80 с овально-конической а) и плоской б) твердой вставкой

Основное требование, которому удовлетворяют параметры режущей части и этих резцов формулируются тем же образом – **максимальное обеспечение прочности и износостойкости резца независимо от условий его работы.**

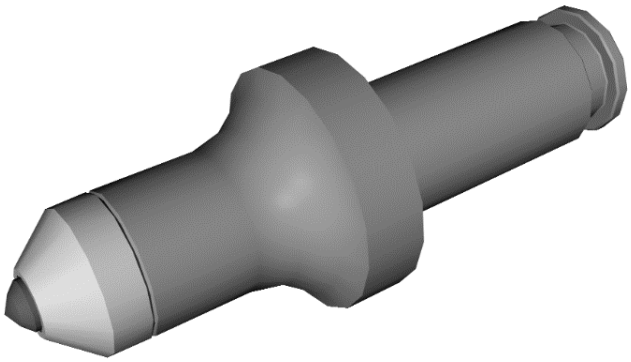


Рис. 2 – Вид резца типа РТБ2-150

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Высокое содержание штыба (размер гранул 0-6 мм) в добытом современными очистными комбайнами угле и большие трудности в его обогащении побудили авторов заняться вопросом разработки и создания специального режущего инструмента для горных машин. Решение этого вопроса может быть в случае кардинального изменения в подходе к проблеме, а именно: ***использовать известное свойство горных пород, в том числе и угля значительно меньшего (не менее чем на порядок, т.е. в 10 раз) сопротивления разрушению разрывом по сравнению с сжатием.*** Принцип разрушения угля путем создания в разрушаемом пласте преимущественно напряжений сжатия заложен во всех современных комбайнах.

Положив в основу это принципиальное положение, авторами был разработан новый вид режущего инструмента – радиальные резцы с рабочей боковой гранью.

Режущий инструмент с рабочей боковой гранью, рис. 3, отличается от радиального режущего инструмента – резцов типа ЗРБ2-80, ЗРБ3-80, ЗР4-80 – наличием рабочей боковой грани – левой или правой.

Рис. 3 – Вид резца с рабочей боковой

Непосредственное разрушение пласта производится режущим инструментом, который определенным образом располагается на рабочем (исполнительном) органе комбайна.

Расположение режущего инструмента на рабочем органе комбайна принято называть схемой его набора.

Для существующих очистных комбайнов ширина среза группы забойных резцов в зависимости от сопротивляемости угля резанию составляет 45-55 мм. И если рациональная величина средней толщины

среза, как показано в [2], составляет около 3 см (при 2-х резцах в линии резания и 80 мин$^{-1}$ шнека скорость перемещения комбайна должна быть 7,5 м/мин, что практически для всех существующих и вновь созданных комбайнов не выполнимо), то площадь среза будет 13,5 – 16,5 см^2. С учетом ширины среза резцов кутковой группы, величина которой в 2-3 раза меньше ширины среза забойной группы резцов, площадь среза составляет порядка 8-12 см^2. Фактическая же площадь среза для существующих шнеков рабочих органов значительно ниже и составляет около 5-7 см^2, что обусловливает значительные удельные затраты энергии разрушения пласта и приводит к измельчению угля (удельная величина штыба для современных очистных комбайнов достигает почти 53% [5]) и низкой производительности комбайна.

КИНЕМАТИКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Движение режущего инструмента в пространстве очистного забоя носит сложный характер. Режущий инструмент одновременно совершает, по крайней мере, три движения – вращательное вокруг оси рабочего органа (шнека, барабана) с частотой его вращения, поступательное со скоростью перемещения (подачи) органа на забой и колебательное (качающееся). Последнее движение обусловлено конструкцией подвески органа к редуктору его привода, рис. 4.

При постоянном поджатии резца по задней грани к не разрушенной части пласта или породного массива и указанном характере его движения между резцом, точнее, его задней гранью и пластом возникают силы трения скольжения, которые и обусловливают в основном износ режущего инструмента.

Рис. 4 – Конструкция подвески и регулирования рабочего органа (шнека)по мощности пласта (высоте)

При таком сложном движении рабочего органа в пространстве претерпевают изменения и действительные параметры, характеризующие как разрушаемый пласт, так и режущий инструмент.

В случае качания органа в вертикальной плоскости толщину среза для *i-го* резца запишем в виде, рис. 5,

$$h(\varphi_i) = AO_2 - BO_2 \tag{1}$$

Так как $AO_2 = 0{,}5D$, где D – диаметр рабочего органа по резцам, а

$$BO_2 = \sqrt{h'^2_{\max} + h_в^2}\cos BO_2O \pm \sqrt{0{,}25D^2 - (h'^2_{\max} + h_в^2)\sin^2 BO_2O}, \tag{2}$$

где $h'_{\max}$, $h_в$ – соответственно, горизонтальное и вертикальное перемещение резца при качании рабочего органа.

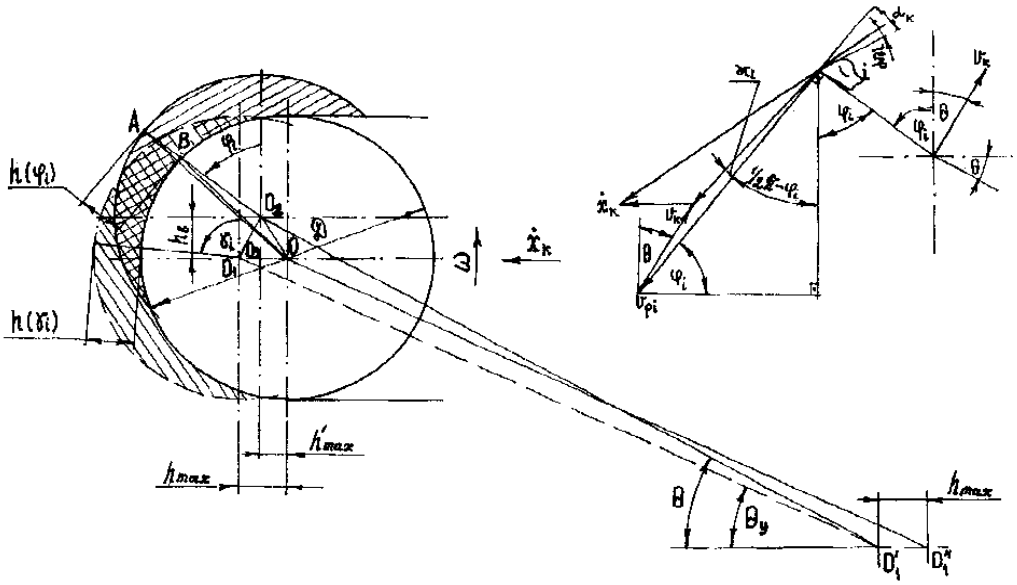


Рис. 5 – К определению действительных параметров разрушения массива и резца

Таким образом, качание рабочего органа в вертикальной плоскости обусловливает изменение действительных параметров резцов и, в первую очередь, их задних углов и параметров разрушения пласта или породного массива – толщину среза. Это приводит к

дополнительной затрате энергии и повышенному износу режущего инструмента.

Перечень ссылок

1. Апраксин А.А. Физика угля. Москва, Недра, 1965. – 352 с.
2. Моделирование разрушения углей режущими инструментами // Ю.Д. Красников, отв.ред. Москва, Наука, 1981. – 181 с.
3. Бойко Н.Г. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов. Дисс. … докт.техн.наук.– Москва, МГИ, 1985. – 287 с.
4. Колосов О.Л. Прогноз развития компоновочных схем и параметров очистных комбайнов для тонких пологопадающих пластов. Дисс. … канд.техн.наук. Донецк, ДонУГИ, 1980. – 168 с.
5. Бойко Н.Г. Погрузка угля очистными комбайнами. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 157 с.
6. Резець горной машини / Н.Г. Бойко, В.Г. Шевцов, М.А. Марков. Патент на изобретение. E21C25/38. Опубл. в бюл. № 4, 2002.
7. Трещиноватость углей // И.И. Аммосов, И.В. Еремин. Москва, изд-во АН СССР, 1960. - 157 с.

УДК 622.232.72.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ШНЕКОВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

В.Г. Нечепаев
ФГБОУВП «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Аннотация. *Выполнена математическая формализация для моделирования процесса формирования давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком системы пассивной и активной выгрузки очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.*
Ключевые слова: *очистной комбайн, шнек, исполнительный орган, объем, давление, поток.*
Annotation. *Mathematical formalization completed for modeling of the pressure formation process in the coal stream discharged by the advanced auger of the passive and active unloading system of cutter-loader of thin seams layers has been developed*
Keywords: *cutter-loader, screw, executive branch, volume, pressure, flow.*

Основой топливно-энергетического комплекса Донецкого региона являются значительные запасы каменного угля. Однако горно-геологические условия залегания угольных пластов в регионе весьма сложные, поскольку основные запасы сосредоточены в тонких пологих пластах мощностью 0,55…1,20 м при большой глубине залегания (1050…1500) м. Выемка таких пластов, вследствие ряда технологических особенностей рабочего процесса, осуществляется преимущественно шнековыми очистными комбайнами.

Специфическая компоновка узкозахватных шнековых очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов обусловливает формирование интенсивного объемного напряженного состояния отбитой и находящейся в рабочем пространстве шнекового исполнительного органа горной массы, что существенно ограничивает техническую производительность в этих условиях [1,2,3 и др.].

Определение рациональных параметров шнековых исполнительных органов, функционирующих в условиях напряженного состояния горной массы, требует установления закономерностей формирования и изменения напряженного состояния посредством моделирования основных рабочих процессов.

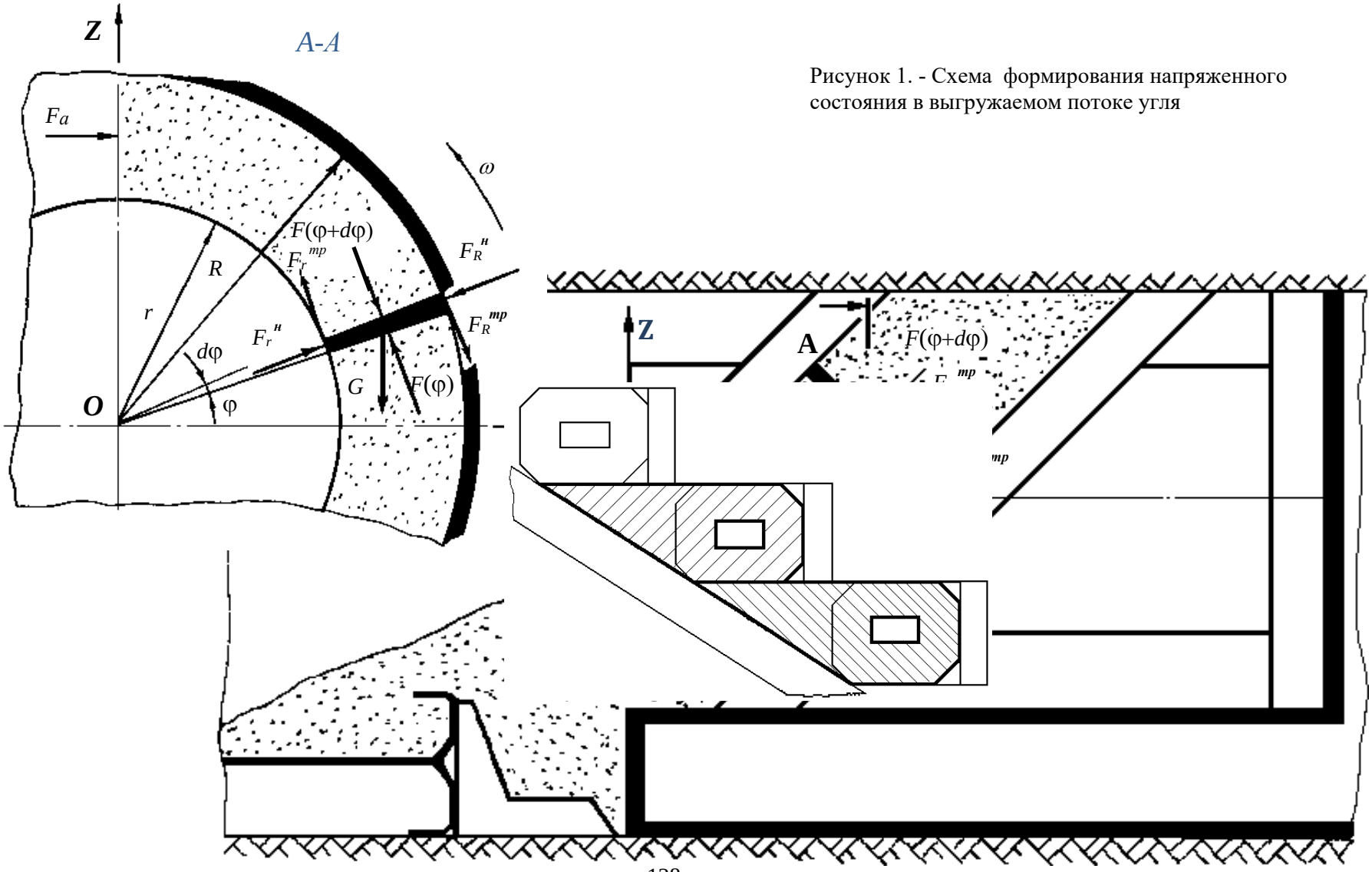


Рисунок 1. - Схема формирования напряженного состояния в выгружаемом потоке угля

На рис.1 представлена расчетная схема для разработки математической модели процесса формирования и изменения давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов [4,5].

Расчетная схем составлена на основе следующих допущений [1-6 и др]:

- выгружаемая горная масса является сплошной несжимаемой сыпучей средой;
- давление в объеме горной массы, расположенной в рабочей камере шнека очистного комбайна, постоянно в пределах сечения, нормального к лопастям шнека.

Расчетная схема рассматривается в прямоугольной системе координат *OXYZ,* начало которой расположено в плоскости разгрузочного торца шнека в точке пересечения его осью вращения шнека (рис. 1). Ось *X* совпадает с осью вращения шнека, положительные значения координат по оси *X* откладываются в направлении от отрезного диска шнека к его разгрузочному торцу. Оси *Y* и *Z* расположены в плоскости разгрузочного торца шнека соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости вынимаемого пласта. Положительные значения координат по оси *Y* откладываются в направлении рабочего перемещения комбайна. Положительные значения координат по оси *Z* откладываются в направлении от почвы к кровле пласта.

На угловом расстоянии φ от начала координат (положительное направление отсчета угла φ - в направлении вращения шнека, отрицательное – в противоположном направлении) выделим элементарный слой толщиной

$$\delta_{сл} = \left(R + r/2\right)d\varphi,$$

где R - наружный радиус лопасти шнека,

r - радиус ступицы шнека.

Площадь элементарного слоя составляет

$$S_{сл} = t_л(R - r),$$

где $t_л$ - расстояние между лопастями.

$$t_л = \pi \cdot r \cdot \sin\alpha,$$

где α - угол подъема лопастей шнека на радиусе r.

При условии равномерности движение угля в зоне рабочей камере шнека и в зоне его разгрузочного торца, в принятой системе координат условия квазистационарного равновесия выделенного слоя в проекциях на оси *X* и *Z*, относительно которых происходит перемещение угля (относительно оси *Y* уголь, расположенный в рабочей камере, не перемещается) имеют вид:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0; \quad -F(\varphi)\cdot\sin\alpha + F(\varphi+d\varphi)\cdot\sin\alpha - F_R^{\grave{o}\eth}\cdot\sin\alpha - F_r^{\grave{o}\eth}\cdot\sin\alpha + \\ \qquad + F_{\ddot{e}}^{\acute{i}}\cdot\cos\alpha - F_{\ddot{e}}^{\grave{o}\eth}\cdot\sin\alpha = 0; \\ \\ \sum F_z = 0; \quad -G + F(\varphi)\cos\alpha\cos\varphi - F(\varphi+\mathrm{d}\varphi)\cdot\cos\alpha\cdot\cos\varphi - F_R^{\acute{i}}\sin\varphi + \\ \qquad + F_r^{\acute{i}}\sin\varphi - F_R^{\grave{o}\eth}\cos\alpha\cos\varphi + F_r^{\grave{o}\eth}\cos\alpha\cos\varphi + \\ \qquad + F_{\ddot{e}}^{\acute{i}}\sin\alpha\cos\varphi + F_{\ddot{e}}^{\grave{o}\eth}\sin\alpha\cos\varphi = 0. \end{cases}$$

(1)

В уравнениях (1) приняты следующие обозначения:

- $F(\varphi)$ и $F(\varphi + d\varphi)$ – соответственно сила нормального давления на выделенный слой угля и ее приращение

$$F(\varphi) = S_{сл}\cdot p_н, \qquad F(\varphi+d\varphi) = S_{сл}\cdot(p_н + dp_н),$$

где $p_н$ и $dp_н$ - среднее нормальное давление на выделенный слой угля и его приращение;

- $F_R^н$ - сила давления на боковую поверхность выделенного слоя со стороны разрушаемого забоя (пласта)

$$F_R^н = p_R\cdot S_R,$$

где p_R - боковое давление на выделенный слой со стороны забоя;

- S_R - площадь контактирования выделенного слоя с забоем

$$S_R = t_л\cdot R\cdot d\varphi;$$

- $F_R^{тр}$ - касательная сила на боковой поверхности выделенного слоя, контактирующей с забоем

$$F_R^{тр} = p_R\cdot S_R\cdot f_R,$$

где f_R - коэффициент трения разрушенного угля по не разрушенному забою

(f_{R1} - коэффициент трения покоя; f_{R2} - коэффициент трения движения);

- $F_r^н$ - сила давления на боковую поверхность выделенного слоя со стороны ступицы шнека

$$F_r^н = p_R \cdot S_r,$$

где p_R - боковое давление на выделенный слой со стороны ступицы шнека;

S_r - площадь контактирования выделенного слоя со ступицей шнека

$$S_r = t_л \cdot r \cdot d\varphi;$$

- $F_r^{тр}$ - касательная сила на боковой поверхности выделенного слоя, контактирующей со ступицей шнека

$$F_r^{тр} = p_r \cdot S_r \cdot f_r,$$

где f_r - коэффициент трения разрушенного угля по ступице шнека;

- $F_л^н$ - сила давления на выделенный слой с рабочей стороны лопасти шнека

$$F_л^н = p_л \cdot S_л,$$

где $p_л$ - давление на выделенный слой со стороны лопасти;

$S_л$ - площадь контактирования выделенного слоя с рабочей поверхностью лопасти шнека

$$S_л = (R-r) \cdot \delta_{сл} = 0{,}25 \cdot (R^2-r^2) \cdot d\varphi;$$

- $F_л^{тр}$ - касательная сила на поверхности выделенного слоя, контактирующей с лопастью шнека

$$F_л^{тр} = p_л \cdot S_л \cdot f_л,,$$

где $f_л$ - коэффициент трения разрушенного угля по лопасти шнека;

- G - сила веса выделенного слоя угля

$$G = \rho_у \cdot g \cdot S_{сл} \cdot \delta_{сл},,$$

где ρ_y - плотность транспортируемого угля;

- g - ускорение свободного падения.

В соответствии с основными положениями механики насыпных грузов [6]

$$p_б = p_н \cdot n_б, \qquad (2)$$

где $n_б$ - коэффициент бокового давления, определяемый по зависимости

$$n_б = n_{min} = 1 + f^2 - [(1+f^2)(f^2 - f_1^2)]^{0,5} - f\,[(1+f^2)^{0,5} - (f^2 - f_1^2)^{0,5}], \qquad (3)$$

в которой f - коэффициент внутреннего трения материала; f_1 - коэффициент трения сыпучего тела о боковые поверхности сосуда.

Однако при своем перемещении поток разрушенного угля испытывает толчки и колебания, приводящие к его уплотнению и к повышению бокового давления, поэтому при транспортировании коэффициент бокового давления возрастает. Влияние этого воздействий увеличивается с возрастанием скорости движения сыпучего тела и определяется зависимостью [6]

$$n_б^{дв} = (1{,}2 + v) \cdot n_{min} = k_v \cdot n_{min}, \qquad (4)$$

где $n_б^{дв}$ - коэффициент (безразмерный) бокового давления при транспортировании сыпучего тела;

v - расчетная скорость движения насыпного груза в м/с.

Тогда с учетом (2) – (4)

$$p_r = n_{min} \cdot p_н \cdot k_v^r, \qquad p_R = n_{min} \cdot p_н \cdot k_v^R,$$

где k_v^r и k_v^R - коэффициенты, отражающие влияние скорости относительного движения (скольжения) выделенного слоя соответственно по ступице шнека и по наружному диаметру лопасти.

Коэффициент k_v^r определим как

$$k_v^r = 1{,}2 + v_\Sigma,$$

где v_Σ – скорость скольжения выделенного слоя по ступице шнека, м/с.

$$v_\Sigma = \sqrt{(v_{ос})^2 + (v_{окр})^2},$$

где $v_{окр}$ - окружная скорость движения ступицы шнека $v_{окр} = \dfrac{\pi r n}{30}$;

$v_{ос}$ - скорость движения сыпучего тела, заключенного в рабочей камере, в осевом направлении.

$$v_{ос} = \frac{\pi \cdot r \cdot n \cdot \cos(\alpha + \rho) \cdot \sin(\alpha)}{30 \cdot \cos(\rho)},$$

где n - частота вращения шнека;

ρ - угол внутреннего трения транспортируемого угля.

Введем также

$$k_v^{R1} = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30} + 1{,}2 \text{ и } k_v^{R2} = 1{,}2 + v_{ос}.$$

С учетом изложенного система уравнений (1) принимает вид

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ S_{ñë} \cdot \sin\alpha \cdot dp_í + k_v^{R2} n_{\min} \cdot p_í \cdot S_R \cdot f_{R2} \cdot \sin\alpha - \\ - k_v^r \cdot n_{\min} \cdot p_í \cdot S_r \cdot f_r \cdot \sin\alpha + S_ë \cdot p_ë \cdot (\cos\alpha - f_ë \cdot \sin\alpha) = 0; \\ \sum F_z = 0 \\ -\rho_y \cdot g \cdot S_{ñë} \cdot \delta_{ñë} - S_{ñë} \cdot dp_í \cdot \cos\alpha \cdot \cos\phi - k_v^{R2} \cdot p_í n_{\min} \cdot S_R \cdot \sin\varphi + \\ + k_v^r \cdot p_í \cdot n_{\min} \cdot S_r \cdot \sin\varphi - k_v^{R1} \cdot p_í \cdot n_{\min} \cdot S_R \cdot f_{R1} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi + \\ + k_v^r \cdot p_í \cdot n_{\min} \cdot S_r \cdot f_r \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi + \\ + S_ë \cdot p_ë \cdot (\sin\alpha + f_ë \cdot \cos\alpha) \cdot \cos\varphi = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) математически формализует (описывает) процесс формирования и изменения в течение рабочего процесса давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком системы пассивной и активной выгрузки очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.

Выводы. Выполнена математическая формализация (описание) процесса формирования напряженного состояния горной массы в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком систем пассивной и активной выгрузки очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов, с целью его моделирования.

Список литературы

1. Шабаев О.Е. Установление зависимости погрузочной способности шнековых очистных комбайнов от их режимных параметров на основе модельных и натурных экспериментов / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, Степаненко [и др.] // Международный научно-технический журнал. Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №3(17). – С. 42-51.

2. Шабаев, О. Е. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям [Текст] / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаев, П. П. Зинченко // Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета». – 2020. – №3. – С. 43 – 51.

3. Нечепаев В.Г. Модель формирования объема рабочей камеры шнекового исполнительного органа очистного комбайна для выемки тонких пологих пластов /В.Г. Нечепаев//Инновационные перспективы Донбасса. Материалы 7-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 2021. Издательство: Донецкий национальный технический университет (Донецк). - С. 134-139.

4. Нечепаев В.Г. Физическая модель напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной выгрузкой / В.Г. Нечепаев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 23-25 мая 2023 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2023. -С.14-17.

5. Нечепаев В.Г. Расчетная схема для моделирования напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной системой выгрузки / В.Г. Нечепаев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 23-25 мая 2022 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2023. - С.18-23.

6. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. - М.,: Машиностроение, 1964.-251с.

УДК 621.926.323

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗКИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Р.С. Мележик, Д.А. Власенко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация. *Проведено исследование процесса измельчения твердого топлива в четырехвалковой дробилке ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного цеха ООО «ЮГМК». Предложена зависимость рационального количества материала подаваемого в дробилку. Установлены значения перемещения валков в промышленных условиях в процессе измельчения различных видов топлива.*

Annotation. *A research of the solid fuel crushing process in a four-roll crusher DCHG 900×700 in the conditions of the agglomeration shop of YUGMK LLC was carried out. The dependence of the rational amount of material supplied to the crusher is proposed. The values of the movement of the rolls in industrial conditions during the grinding of various types of fuel have been established.*

Ключевые слова: *агломерационное производство, четырехвалковая дробилка, режим загрузки, измельчение, твердое топливо.*

Keywords: *agglomeration production, four-roll crusher, loading mode, crushing, solid fuel.*

На сегодняшний день для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном производстве, как правило, применяют четырехвалковые дробилки [1]. Так в условиях агломерационного цеха ООО «ЮГМК» для измельчения кокса доменного (КД) и кокса сухого тушения (КСТ) используют хорошо зарекомендовавшие себя дробилки ДЧГ 900×700. Однако существенным недостатком данного типа агрегатов является сложность регулирования объема загружаемого сырья в рабочее пространство и степени затяжки пружин амортизирующего устройства [2], что отрицательно сказывается на степени измельчения материала и приводит к снижению ресурса отдельных деталей и узлов привода вследствие повышенных динамических нагрузок. В то же время это сказывается и на технико-экономических показателях фракционной подготовки твердого топлива и на агломерационном процессе в целом. Вследствие чего возникает необходимость в поиске и разработке способов определения рационального количества сырья подаваемого для измельчения в рабочее пространство четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700.

На основании исследований [3] установлено, что площадь

поверхностного контакта материала с бандажом загруженного в рабочее пространство дробилки оказывает влияние на величину перемещения валков в процессе измельчения. В то же время при недостаточной загрузке рабочего пространства сырьем происходит переизмельчение, а при перегрузке – часть материала будет высыпаться за торцевую поверхность бандажей валков.

В работе [4] предложена зависимость, позволяющая определить объем материала, находящийся в рабочем пространстве при его заполнении:

$$V_м = 2\int_0^B \int_0^{2h_{к.ср.}} (R_б - \sqrt{R_б - y}\sqrt{R_б + y})\, dy\, dx, \qquad (1)$$

где $h_{к.ср.}$ – расстояние до точки приложения сосредоточенной силы дробления (условный центр тяжести поверхности контакта), м; B – рабочая ширина бандажа, м; $R_б$ – радиус бандажа, м.

Расстояние $h_{к.ср.}$ определяется с помощью зависимости:

$$h_{к.ср.} = R_б \sin \alpha_{к.ср.}, \qquad (2)$$

где $\alpha_{к.ср.}$ – угол характеризующий точку приложения силы дробления, рад.

Угол приложения силы дробления определяется как:

$$\alpha_{к.ср.} = \frac{\int_0^{\alpha_1} \alpha R_б B d\alpha}{\int_0^{\alpha_1} R_б B d\alpha}, \qquad (3)$$

где α_1 – угол захвата куска материала с рабочей поверхностью бандажей валков, рад.

Масса подаваемого в дробилку материала в единицу времени (в данном случае в секунду), обеспечивающая заполнение рабочего пространства валков, определяется как:

$$Q = 2\pi\, \omega\, V_м\ \rho_н, \qquad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения валков, рад/с; $\rho_н$ – насыпная плотность дробимого материала, кг/м^3.

На основании расчета требуемого объема материала подаваемого в рабочее пространство дробилки (номинальный режим) предложены следующие режимные параметры загрузки дробильной машины: для КД 6,92 м^3/ч (4,83 кг/с); для КСТ 11,2 м^3/ч (7,82 кг/с).

В ходе экспериментальных исследований определялись значения перемещения валков и фракционный состав твердого топлива в процессе измельчения при пяти режимах загрузки четырехвалковой дробилки

ДЧГ 900×700 (рис. 1) в условиях агломерационного цеха ООО «ЮГМК». В качестве дробимого материала использовались кокс доменный и кокс сухого тушения. Режим загрузки определялся в процентном отношении от номинального количества подаваемого в дробилку сырья – рациональной степени загрузки рабочего пространства дробилки. Регулирование режимов загрузки осуществлялось с помощью шиберного затвора бункерного питателя. Число параллельных измерений для каждого режима принималось равным пяти.

а

б

в

Рисунок 1 – Четырехвалковая дробилка ДЧГ 900×700 (а) прибор «Кварц 2» (б) места установки датчиков вибрации на подшипниковых опорах валков (в) в ходе эксперимента

Для измерения величины перемещения валка (таблица 1) в горизонтальном направлении в процессе измельчения использовался метод контроля состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях [5] с использованием двухканального переносного цифрового анализатора, коллектора данных и балансировочного прибора «Кварц 2» [6] с датчиками вибрации АС-102-1А.

По результатам представленным в таблице 1 установлено, что при степени загрузки рабочего пространства дробилки меньшим количеством материала подаваемого от рекомендуемого наблюдается уменьшение значения перемещения валка, что вызывает переизмельчение материала, в то же время при режимах загрузки более 100% от номинального межвалковый зазор превышает допустимое значение 3 мм (регламентировано верхним пределом фракции твердого топлива в

агломерационной шихте).

Таблица 1 – Перемещение валка в процессе измельчения твердого топлива

Режим загрузки	1	2	3	4	5
Степень загрузки рабочего пространства дробилки, %	70	85	100	115	130
Среднее перемещение валка в процессе дробления КД, мм	2,5	2,7	2,8	3,1	3,1
Среднее перемещение валка в процессе дробления КСТ, мм	1,6	2,1	3,1	3,3	3,5

Графическое отображение выхода фракции 1,0…3,0 мм, наиболее подходящей для процесса спекания агломерата, при различных режимах загрузки дробильной машины представлено на рисунке 2.

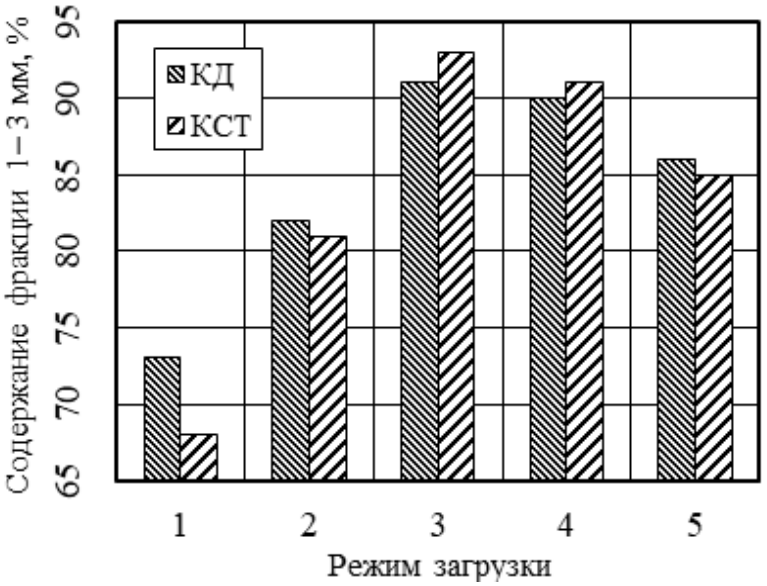


Рисунок 2 – График содержания фракции 1…3 мм в КД и КСТ в зависимости от режима загрузки

Из графика видно, что наилучшее качество измельченного твердого топлива (КД и КСТ) достигается при режимах, близких к номинальному (режим 3). При этом увеличение значения перемещения валка в процессе работы приводит к повышению динамических нагрузок на привод и снижает ресурс отдельных узлов и механизмов привода четырехвалковой дробилки.

Выводы. Разработана модель загрузки рабочего пространства валковой дробилки. Выполнены экспериментальные исследования процесса измельчения кокса доменного и кокса сухого тушения при пяти режимах загрузки четырехвалковой дробилки

ДЧГ 900×700 в производственных условиях агломерационного цеха ООО «ЮГМК». Определены значения перемещения валка в процессе работы при различных режимах загрузки рабочего пространства. Предложен наиболее рациональный режим работы четырехвалковой дробилки.

Список литературы

1. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов. Научное издание / Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Т.Н. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.

2. Vlasenko, D.A. Modeling and industrial development of grinding processes in roller mills with corrugated rolls / D.A. Vlasenko // Steel in Translation, 2022. – Vol. 52, No. 4. – pp. 445–450. https://doi.org/10.3103/S0967091222040179.

3. Власенко, Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валками: монография / Д.А. Власенко // Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. – 172 с. – EDN KJXDCL.

4. Власенко, Д.А. Комплексный подход к улучшению качества твердого топлива в агломерационном производстве за счет усовершенствования четырехвалковой дробилки ДЧГ 900х700 / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Р.С. Мележик, А.А. Харитоненко // Издательский дом «Руда и металлы», 2024. – №1. – С. 32–37. https://doi.org/10.17580/chm.2024.01.05

5. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Часть 1. Общие требования. Введ. 01-07-1999. М.: Издательство стандартов, 1998. – 16 с.

6. ТУ 4277-076-54981193-15 Прибор виброизмерительный «Кварц 2». Серийный выпуск. – Введ. 2016-04-21. – М.: ООО «ДИАМЕХ 2000», 2016. – 136 с.

УДК 658.58

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ МАССИВОВ ДАННЫХ

Д.О. Прудченко, Е.В. Ошовская, В.А. Сидоров
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР

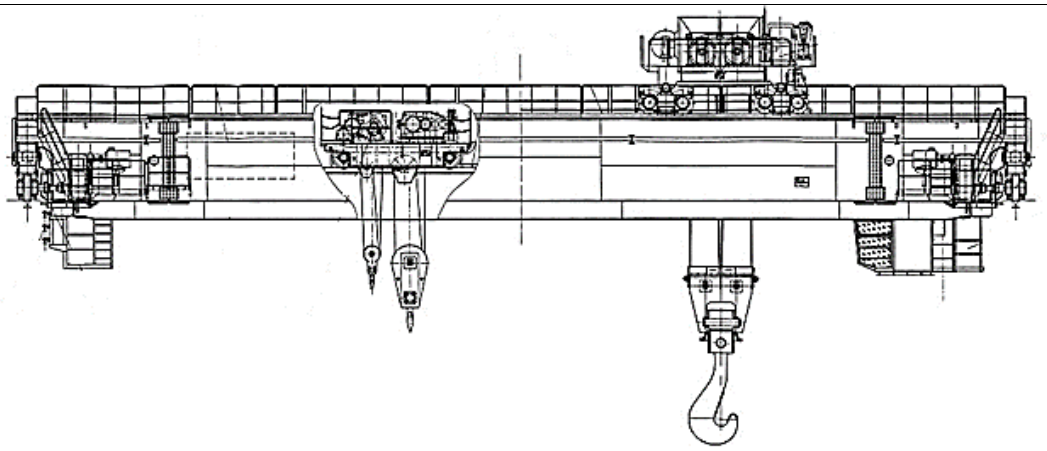
Аннотация.*Рациональный баланс между стремлением к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт и повышением уровня потерь при отказе и простое техники ищется в стратегии ремонта по состоянию. Стратегия включает в себя пятиэтапный процесс, который состоит из формулировки концепции «технического состояния», представления машин как сложных систем, формирования массивов данных, обобщения технического состояния и прогнозирования изменений в техническом состоянии.*

Annotation. *A rational balance between the desire to reduce maintenance and repair costs and an increase in the level of losses in case of failure and downtime of equipment is sought in the state repair strategy. The strategy includes a five-stage process, which consist of the formulation of the concept of "technical condition", the representation of machines as complex systems, the formation of data arrays, the generalization of the technical condition and the prediction of changes in the technical condition.*

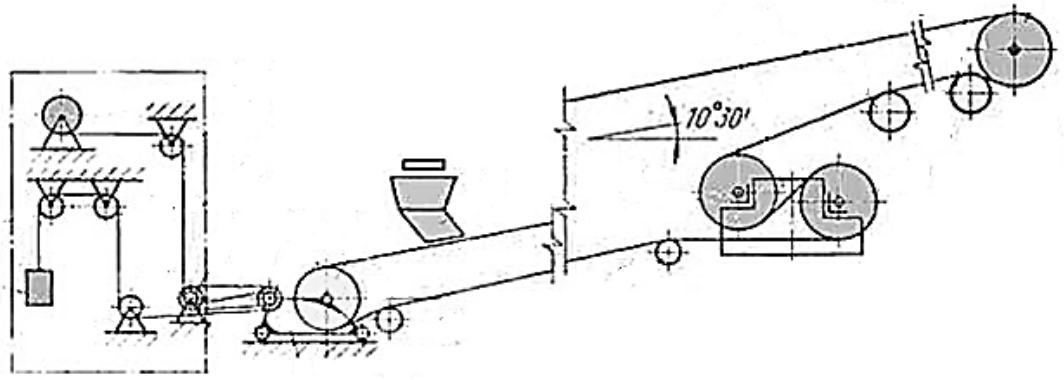
Ключевые слова: *техническое состояние, транспортно-технологические машины, техническое диагностирование, цифровизация.*

Keywords: *technical state, transport and technological machines, technical diagnostics, digitalization.*

В настоящее время при эксплуатации транспортно-технологических машин присутствуют две основные тенденции: стремление к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт, повышение уровня потерь при отказе и простое техники. Например (рис. 1), литейный мостовой кран находится на критическом пути технологических операций сталеплавильного производства, конвейерный подъёмник доменной печи является единственным способом загрузки доменных печей большого объёма.



а



б

Рисунок 1. Рассматриваемые транспортно-технологические машины: а) литейный кран; б) конвейерный подъёмник доменной печи

Нахождение рационального баланса между указанными взаимоисключающими тенденциями, начиная с 60-х годов прошлого столетия, ищется в стратегии ремонта по состоянию [1, 2]. Основой данной стратегии является фактическое состояние оборудования, оценка которого реализуется после безразборного технического диагностирования. Основы технической диагностики [3, 4] изначально предполагали обработку больших массивов данных для получения информационного сообщения о состоянии оборудования. Реальное воплощение этих принципов стало возможно при реализации программ цифровизации [5, 6], что потребовало решения задачи прогнозирования изменения технического состояния транспортно-технологических машин на основе массивов данных.

Первым этапом решения данной задачи является формулирование понятия «техническое состояние» как соответствия внутренних свойств системы и выполняемой производственной программы без дополнительных операций по поддержанию или восстановлению работоспособного

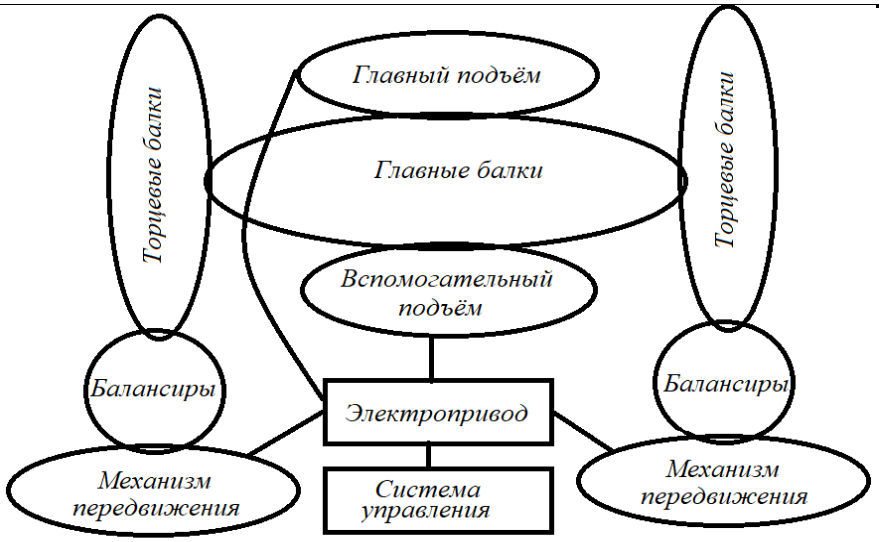
состояния. Это позволяет сопоставить категории технического состояния и необходимость выполнения ремонта: хорошее состояние – дополнительные ремонтные операции не требуются; малые отклонения – удовлетворительное состояние – меняется периодичность осмотра, диагностирования оборудования; необходимость проведения ремонта – плохое состояние – должно быть обосновано диагностическими признаками ремонтных операций; предотказное (аварийное) состояние предполагает немедленное проведение операций по восстановлению работоспособного состояния.

Второй этап – представление транспортно-технологической машины как сложной системы восстанавливаемых разноресурсных элементов, находящихся под воздействием человеческого фактора, реализующего разрушительные или восстанавливающие действия. Варианты сложных систем представлены на рисунке 2. Машина имеет возможность полностью реализовать все функции в пределах заданных параметров только при работоспособном состоянии всех подсистем.

Третий этап – формирование массивов данных. В первую очередь фиксируется выполняемая производственная программа с учётом количества циклов, позволяющая ориентировочно оценить остаточный ресурс. Выполняется учёт проведенных ремонтов, их трудоёмкости, периодичности, включая операции по техническому обслуживанию. Регистрируются проведенные осмотры и документация по допуску к работе машины и оператора.

Массивы диагностических параметров определяются по количеству сопрягаемых узлов, рассматривая, в общем случае, факторы: неподвижности соединений, качества смазывания, взаимного расположения деталей, равномерности приложения сил, накопления усталостных повреждений и появления трещин. Следовательно, общее количество сообщений должно соответствовать количеству сопрягаемых узлов, а для их получения необходимо выполнить 3…5 проверок.

Использование методов виброметрии, ваттметрии, термометрии, визуального осмотра, анализа смазки, неразрушающего контроля позволяет определить узлы с наибольшей вероятностью отказа. Количество данных при этом увеличивается. Так при измерении общего уровня вибрации 16…20 значений преобразуются в 2…3 информационных сообщениях о техническом состоянии механизма и возможных неисправностях. Анализ спектра колебаний состоит из 1600…6400 линий, определяющих частоту и амплитуду составляющих в одной точке. Запись временных реализаций потребует анализа 16000…32000 данных.



а

б

Рисунок 2. Представление транспортно-технологических машин как сложной системы: а) литейный кран; б) конвейерный подъёмник доменной печи

Этап четвёртый – синтез технического состояния на основании стабильности или нестабильности. значений диагностических параметров. Используется комплексный подход функционального и тестового диагностирования, на основании взаимной, относительной или абсолютной оценки. Отсутствие допустимых значений для ряда элементов компенсируется проверками стабильности зависимостей. Например,

хорошее состояние главных балок мостового крана определяется неизменностью линейной зависимости прогиба от веса поднимаемого груза.

Этап пятый – прогнозирование изменения технического состояния выполняется на основе матаматических и физических моделей: допустимых значений, износовых, ступенчатых изменений, взаимного влияния элементов. Учитывается состояние всех подсистем машины. Дополнительно используется модель увеличения тяжести последствий при более низкой интенсивности отказов или появления неисправностей.

Вывод.

Возможности обработки больших массивов данных при цифровизации требуют разработки алгоритмов комплексного анализа с учётом индивидуальных условий эксплуатации, ремонта, технического обслуживания транспортно-технологических машин, а не усреднённых показателей работы машин одного класса.

Перечень ссылок

1. Седуш, В. Я. История технического обслуживания и ремонта в России / В.Я. Седуш, В.А Сидоров, А.Е. Сушко // Главный механик. – 2016. - № 12. - С. 39-54.

2. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник. – М.: Изд-во НЦЭНАС, 2006. – 360 с.

3. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. - Изд. 2-е. - Москва : URSS : ЛЕНАНД, 2018. - 238 с.

4. Введение в техническую диагностику [Текст] / Г. Ф. Верзаков, Н. В. Киншт, В. И. Рабинович, Л. С. Тимонен ; Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР К. Б. Карандеева. - Москва : Энергия, 1968. - 224 с.

5. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция / К. Шваб - «Эксмо», 2016. – 138с.

6. Липкин, Е. ИНДУСТРИЯ 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции / Е. Липкин / М.: ООО «Остек-СМТ», 2017. – 224 с.

УДК 658.58

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕДУКТОРОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

А.В. Пичахчи, В.А. Сидоров
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Повышение производительности непрерывных прокатных станов требует обеспечения безотказной работы привода всех клетей и, в частности, комбинированного редуктора. Вибрационный контроль любого механического оборудования является наиболее информативным диагностическим симптомом. Использование традиционных подходов к оценке состояния комбинированных редукторов требует уточнения ряда факторов: расположения точек контроля, режимов измерений. В сочетании с различной скоростью прокатки, жёсткостью редуктора и действующих нагрузок, в соответствии с катаемым сортаментом и калибровкой решение задачи вибрационного контроля комбинированных редукторов привода клетей непрерывного прокатного стана должна сочетать общепринятые положения и индивидуальные условия эксплуатации.*

Ключевые слова: *вибрационный контроль, техническое состояние, комбинированный редуктор, диагностирование.*

Annotation. *Increasing the productivity of continuous rolling mills requires ensuring trouble-free operation of the drive of all stands and, in particular, the combined gearbox. Vibration monitoring of any mechanical equipment is the most informative diagnostic symptom. The use of traditional approaches to assessing the condition of combined gearboxes requires clarification of a number of factors: the location of control points, measurement modes. In combination with different rolling speeds, gearbox stiffness and operating loads, in accordance with the rolling range and calibration, the solution to the problem of vibration control of combined gearboxes for driving stands of a continuous rolling mill must combine generally accepted provisions and individual operating conditions.*

Keywords: *vibration control, technical condition, combined gearbox, diagnostics.*

Постановка задачи исследования. Для привода прокатных клетей необходимо разработать алгоритм диагностирования состояния механического оборудования с использованием методов вибрационной

диагностики и классических подходов к решению задач распознавания образов [1]. При этом необходимо выделить:

- наличие допустимых и недопустимых состояний в механизме;
- разделить механические повреждения и отклонения от технологии прокатки;
- идентифицировать повреждения подшипников, зубчатых передач, вкладышей шпиндельных устройств;
- определить границы категорий технического состояния;
- определить необходимые ремонтные упреждающие операции.

Существующие решения в непрерывном мониторинге прокатного оборудования, включают несколько направлений:

- формирование вектора ортогональных диагностических признаков, включающий около десяти видов неразрушающего контроля для автоматической экспертной системы [2];
- использование нейросетевой модели для оценки состояния электрических приводов [3];
- исследование вибрационных параметров, позволяющих диагностировать появление дефекта в деталях зубчатой передачи [4];
- применении биполярного анализа в вибродиагностике дефектов зубчатых передач роторных машин [5];
- отслеживание уровня среднеквадратичного значения виброскорости согласно ГОСТ ИСО 10816-1-1997 [6];
- мониторинг и анализ информативных частот возможных повреждений отдельных элементов [7];
- реализация теории динамических процессов при использовании оригинальных алгоритмов измерений и анализа, в переходных режимах работы клети, в основном при захвате металла валками [8].

Основной материал. Наличие зазоров, повреждений меняет упруго-демпфирующие свойства механической системы, что будет отражаться в характере колебаний при ударе и реакции системы на силовое воздействие. Для того, чтобы оценить указанные отклонения необходимо проводить запись временного вибрационного сигнала без усреднения. Необходимо учитывать частоту вращения валков, скорость движения слитка, токовые нагрузки на двигатель для постановки диагноза по комплексу диагностических параметров.

Отличие режима эксплуатации металлургических машин, в частности машин прокатного производства – это отсутствие стационарного режима – при прокатке ток и частота вращения меняются (рис. 1).

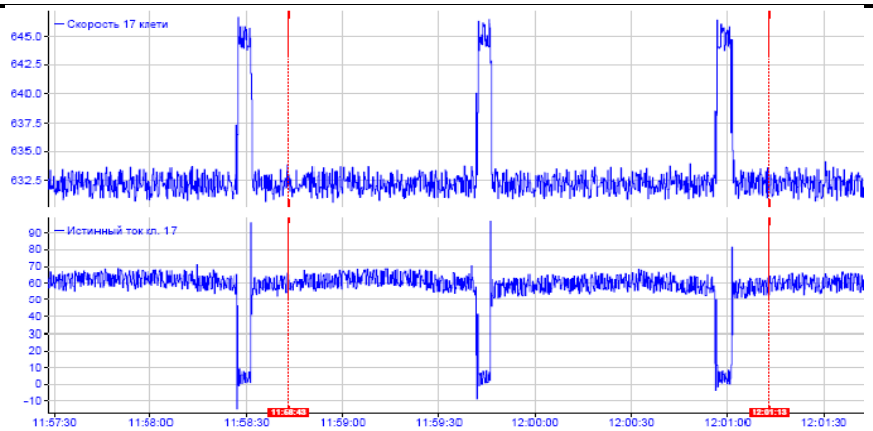


Рис. 1. Изменение токовых параметров и частоты вращения электродвигателя привода прокатной клети при прокатке

Цель системы вибрационного контроля комбинированных редукторов непрерывных прокатных станов - повышение долговечности и безотказности эксплуатируемого оборудования за счет своевременного выявления механизмов, имеющих повышенную вибрацию, определения и устранения (путем проведения ремонтов) причин, вызвавших вибрацию. Решаемые задачи:

- контроль и сигнализация о превышении заданных значений: параметрами вибрации, температуры;
- использование для контроля технического состояния токовых характеристик и частоты вращения валов приводных двигателей;
- анализ текущих значений вибрационных параметров, распознавание спектрального состава вибрационного сигнала, характера возможных повреждений и определение трендов развития повреждений;
- анализ временной реализации вибрационного сигнала;
- оценка технического состояния контролируемых механизмов, определение времени и объемов ремонтных воздействий;
- накопление и анализ информации о содержании проведенных ремонтов, эффективности воздействий, периодичности замен элементов;
- диагностирование правильности функционирования стационарной системы и предупреждение о возможных неисправностях.

Необходимо предусмотреть подготовку специалистов, непосредственно работающих с системой, использующих полученную информацию и специалистов по обслуживанию системы.

Для реализации функций вибрационного контроля необходимо проведение измерений следующих параметров:

- виброперемещение (СКЗ/ПИК) – частотный диапазон 2…200 Гц;
- виброскорость (СКЗ) – частотный диапазон 2…200 Гц и 10…1000 Гц;

- виброускорение (СКЗ/ПИК) – частотный диапазон 10…1000 Гц и 50…5000 Гц.

Представление данных общего уровня на схеме механизма с выделением двух режимов – режим холостого хода и режима работы под нагрузкой. В режиме контроля – опрос датчиков – раз в секунду (время прокатки одного слитка – чуть больше минуты). Предусмотреть возможность построения каскада спектров и просмотра трендов за 5, 15, 30, 60 минут и далее 1, 2, 4, 8, 24 часа.

Спектры с числом линий – для виброскорости 1600…3200, для виброускорения – 3200…6400 и дискретное представление спектров. Следует вывести подсказку в разметке по видам составляющих: гармоники; субгармоники; зубцовые и подшипниковые частоты; резонансные частоты; боковые полосы; электромагнитные частоты.

Для каждого редуктора составляется характерный спектр. Наиболее информативным является анализ временных реализаций (рис. 2). Аварийное состояние, рассматривается как потеря контроля за изменением технического состояния. При анализе данных, необходимо учитывать амплитуду и повторяемость результатов по проходам. Граница исправного состояния – изменение значений менее, чем в 1,5 раза, увеличение значений при реверсе более чем в 2 раза – указывает на наличие повреждений, повышенные зазоры в подшипниках, ослабление резьбовых соединений.

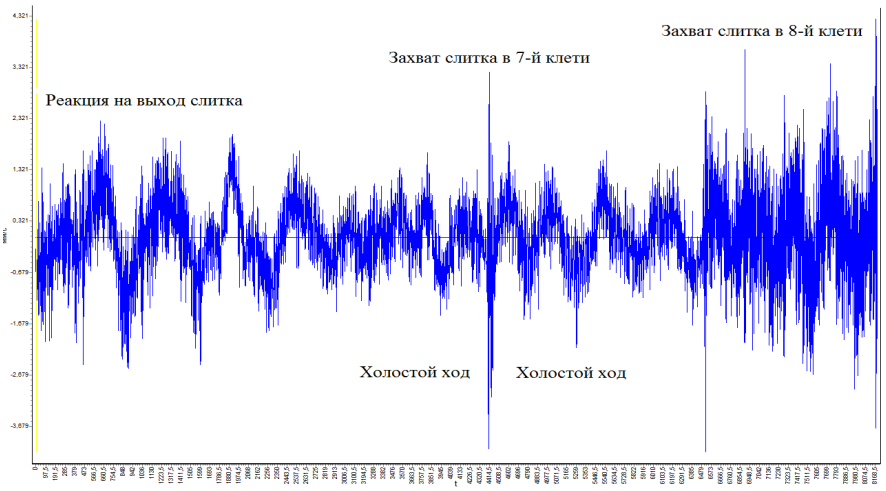


Рис. 2. Временной сигнал виброскорости измеренный в радиальном направлении на подшипнике двигателя привода прокатной клети стана 390

Выводы.

Стационарная система должна постоянно работать, выдавая информацию в виде рекомендаций и получая ответы о том, что сделано.

Изучая реакцию на ремонтное воздействие, сможем оценить качество ремонтных воздействий

Изменения в состоянии клети отразятся на реакции болтовых соединений, что позволит унифицировать процесс измерений.

Список литературы.

1. Биргер И.А. Техническая диагностика [Текст] / И.А. Биргер. - Изд. 2-е. - Москва : URSS : ЛЕНАНД, cop. 2018. – 238 с. (Классика инженерной мысли: машиностроение).; ISBN 978-5-9710-6012-3.

2. Костюков В.Н. Система мониторинга состояния оборудования / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Костюков, А.А. Синицын, А.М. Волков, О.В. Кузнецов КОМПАКС для колесно-прокатного стана // Сталь. - 2008. - №4. – С. 58-63

3. Волков В.Н. Разработка нового метода диагностирования автоматизированных электромеханических систем прокатных станов с помощью нейросетевых алгоритмов / В.Н. Волков, А.В. Кожевников // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. №4 (51). – С. 11-16.

4. Крассовская Т.В. Использование вибродиагностики зубчатых передач для обеспечения безопасности технологических процессов // Шаг в науку. 2022. №3. – С. 28-31.

5. Сундуков А.Е. Повышение чувствительности и расширение функциональной возможности биполярного анализа вибрации роторных машин / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. №1. – С. 91-98.

6. Панов А.Н. Применение автоматизированной стационарной системы виброконтроля на главном приводе прокатного стана / А.Н. Панов, Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, С.М. Коробейников, К.Е. Гузей // ЭСиК. 2015. №4 (29). – С. 39-41.

7. Ишметьев Е.Н. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, М. Врабел // ЭС и К. 2019. №1 (42). – С. 67-73.

8. Баглай А.В. Система вибродиагностики для оборудования прокатного производства / А.В. Баглай, В.В. Воробьев, А. Н. Гузеев, М. М. Кипин // Черные металлы. 2020. №2. – С. 62-69.

УДК 622.232.32

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

В.В. Гулин
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Обоснована необходимость разработки имитационного алгоритма и моделирующей программы, позволяющих на этапе проектирования наглядно представить рабочий процесс генератора и определить его выходные параметры (частоту выстрелов, давление перед насадкой и расход воды).*

Annotation. *The necessity of developing a simulation algorithm and a modeling program is justified, allowing at the design stage to visualize the workflow of the generator and determine its output parameters (shot frequency, pressure in front of the nozzle and water flow).*

Ключевые слова: *машиностроение, струя, генератор, разрушение, анализ, моделирование.*

Keywords: *mechanical engineering, jet, generator, destruction, analysis, modeling*

Одной их актуальных задач современного машиностроения является поиск новых технологий и создание высокоэффективных машин в различных отраслях промышленности.

Разрушение струёй воды известно и используется достаточно давно и широко. Однако при всех положительных эффектах существуют дополнительные сложности при реализации технологического процесса.

Высокая энергоёмкость процесса разрушения. Это приводит к необходимости иметь источник энергии большой мощности, сложностям с подводом энергоносителя и очень высокой влажности разрушенного материала. Можно даже сказать - в итоге процесса мы получаем двухфазную гидросмесь, что усложняет её удаление из зоны обработки.

Вместе с тем, существует ряд материалов, которые можно условно назвать «хрупкими». Например, угольный пласт, бетонные конструкции, монолиты шлака, асфальтное покрытие дорог и многое другое. Для разрушения таких объектов можно использовать метод крупнокускового скола, что даёт значительное снижение энергоёмкости процесса разрушения. Для реализации данного метода необходимо организовать либо скачкообразное перемещение непрерывной водяной струи с образованием серии воронок с последующим обрушением целиков между ними, либо сформировать импульсную струю высокой энергии с подачей её в

необходимую точку обрабатываемого массива.

Оба способа обладают как преимуществами, так и недостатками в определённых конкретных условиях. Однако второй вариант выглядит более предпочтительным с точки зрения эффективности, поскольку при его реализации отсутствуют нерациональные потери энергии, проще организовать подвод потока воды (что особенно важно для мобильных устройств) и проще выполнить механизм перемещения исполнительного органа установки. При использовании данного способа возможно получение отбитой массы с влажностью, не превышающей влажности материала получаемого при применении механических способов разрушения с использованием средств пылеподавления.

Обеспечение выемки полезного ископаемого с ограниченным присутствием людей в забое, разрушения угля и пород, выполнения других схожих операций по разрушению монолитов шлака, скального грунта, бетонных массивов является востребованной жизненной задачей. Одним из возможных подходов является разработка исполнительных органов на основе генераторов импульсных струй воды высоких энергий.

Группа гидроимпульсной техники кафедры энергомеханических систем ДонНТУ занимается созданием установок на основе генераторов импульсных струй для разрушения монолитов в различных сферах.

Анализ и обобщение разрабатываемых в мировой практике экспериментальных и серийных установок, в состав которых входят генераторы импульсных струй, многообразие схемных и параметрических решений позволяет сделать выводы о наиболее перспективных направлениях исследований и целесообразности структурного синтеза подобных систем.

При этом для формирования исходных данных и правильной оценки взаимодействия элементов необходим тщательный анализ как свойств объекта разрушения (материал, окружающая среда, технологические ограничения, ограничения по безопасности), так и требований к элементам генератора, источнику энергоснабжения, линии передачи потока воды.

Основными положениями для структурного синтеза можно считать:

- ввод в состав генератора элементов или системы, осуществляющих задание и стабилизацию выходных параметров;
- сравнительный анализ возможных решений (на основе поиска уже известных или разработки новых) и выбор для использования в составе генератора наиболее рациональных конструкций элементов в заданных условиях;
- совершенствование схем и способов управления ключевыми элементами с целью повышения быстродействия при переключениях с одновременным сохранением точности управления для увеличения энергоэффективности устройства.

Структурный синтез осуществляется на основе исследования рабочего процесса путём математического моделирования с целью выбора оптимальных конструктивных и рабочих параметров.

Обобщённая структурная схема системы на основе генератора импульсных струй, отвечающая указанным требованиям, представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структура объекта исследования.

Разработанный и испытанный в лабораторных и промышленных условиях образец генератора осуществляет преобразование стационарного потока с параметрами – расход 20…100 л/мин, давление до 32 МПа в импульсный. При этом обеспечивается широкий диапазон варьирования свойств струи на выходе. Во-первых, по параметрам импульса: амплитуде, длительности. Во-вторых, по форме импульса – от простой, близкой к прямоугольной до сложной, ступенчатой, с различными соотношениями давления и длительности в ступенях. В-третьих, по соотношению с давлением подводимого потока - выше, ниже, на уровне. В-четвертых, по частоте следования импульсов в последовательности.

Взаимодействующие элементы системы и их свойства приведены на рисунке 2. В схеме по рисунку 1 ключ гидравлических импульсов (распределитель) осуществляет коммутацию потоков жидкости в различных режимах работы устройства. Гидравлический аккумулятор накапливает и отдаёт энергию в определённые моменты цикла. Формирующий (передающе-ограничивающий элемент) задаёт форму импульса и обеспечивает постоянство объёма жидкости, подводимого к исполнительному органу в каждом выстреле. Кроме того, формирующий

элемент принимает участие в получении чёткого входного сигнала для системы управления на изменение состояния распределителя.

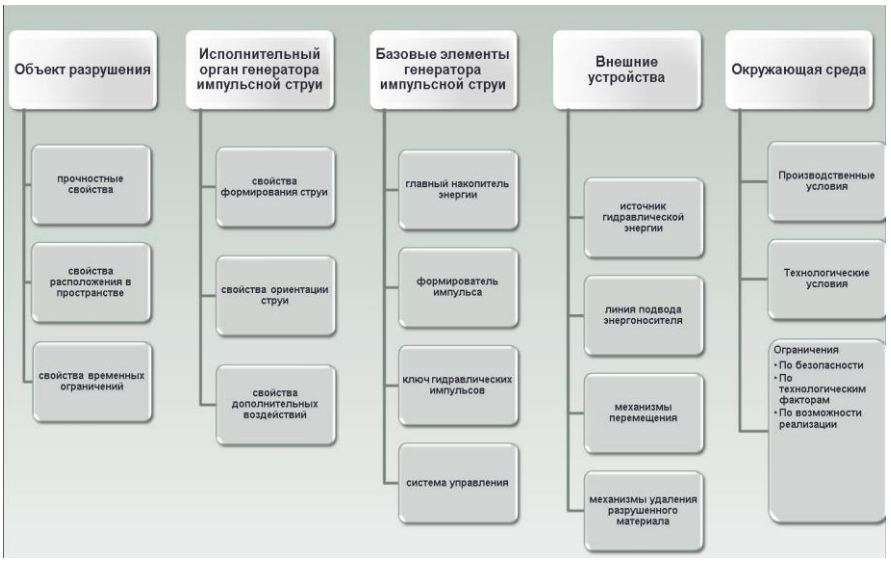


Рисунок 2 – Взаимодействующие элементы системы

Исполнительный орган формирует и направляет струю в точку забоя или объекта, требуемую по схеме обработки.

Согласующий элемент согласовывает дискретное потребление воды генератором в процессе формирования импульсов с непрерывной подачей насосной установки, и, в частности: определяет рабочий режим питающего насоса, защищает подводящую магистраль от колебаний давления, обеспечивает создание сигнала для системы управления распределителем.

Система управления изменяет состояние распределителя по заданной программе на основе сигналов, формируемых элементами.

Устройство формирования режима задаёт значения и осуществляет стабилизацию выходных параметров генератора (например, по амплитуде давления в импульсе), обеспечивает, при необходимости, возможность их оперативной регулировки.

Основным звеном является передающее-ограничивающий элемент, который наиболее существенным образом влияет на производительность установки и, поэтому, требует детального рассмотрения при структурном синтезе системы.

При моделировании любой из рассматриваемых схем являются:

- распределитель;

- формирующий элемент, включающий узел накопителя (в простейшем случае представляющий поршень, образующий с корпусом две рабочих камеры);
- система управления распределителем;
- исполнительный орган (рабочий насадок).

На основе анализа рабочего процесса каждого из гидравлических узлов генератора составлены их математические модели (дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами), которые с помощью уравнений связи (баланс расходов и соотношение давлений) объединяются в полную математическую модель системы. На её основе разработан имитационный алгоритм и моделирующая программа, позволяющая наглядно представить рабочий процесс генератора ещё на этапе проектирования и определить выходные параметры (частоту выстрелов, давление перед насадкой и расход воды) Ошибка предсказания по имитационной модели находится в пределах от 10 до 25 %, что является допустимым для инженерных исследований.

Дальнейшие исследования необходимо проводить с целью, во-первых, систематизации разработанных математических моделей генераторов импульсных струй различного назначения, во-вторых, обобщения накопленного опыта проектирования путём создания системы автоматизированного проектирования на основе разработанных математических моделей, в-третьих, продолжения экспериментальных исследований энергетических показателей. Решение задачи оптимального синтеза с использованием адекватных математических моделей позволит автоматизировать процесс проектирования и выбора рациональных конструктивных и рабочих параметров [1].

Список источников.

1. Проектирование генераторов импульсных струй на основе структурного синтеза / В.В. Гулин, Т.А. Устименко.- Текст: непосредственный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. - № 4/ 7 (70). – С. 38 – 45.