

**ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАУКОЕМКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ И
ОБОРУДОВАНИЕ В
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

ВЫПУСК 8 (82)

АПЧЕВСК, 2025

Научкоёмкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве

Научный журнал
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 8 (82) 2025

Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building

Scientific journal
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 8 (82) 2025

Алчевск
2025

УДК 004 + 621 + 622.2 + 669 + 692.4

EDN: APABYF

**Научноёмкие технологии
и оборудование в промышленности
и строительстве**

Научный журнал

Выпуск 8 (82) 2025

**Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Донбасский
государственный технический
университет»**

*Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-85961 от 11.09.2023*

*Журнал внесён в Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание учёной степени
кандидата наук, на соискание учёной степени
доктора наук*

*Включён в наукометрическую
базу данных РИНЦ*

*Рекомендовано учёным советом
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
(Протокол № 13 от 30.06.2025)*

Дата выхода: 14.07.2025

Формат 60×84¹/₈

Усл. печат. л. 13,25

Заказ № 150

Тираж 200 экз.

Отпечатано в ИПЦ ДонГТУ

Журнал распространяется бесплатно

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

Художественное оформление обложки
Чернышова Н. В.

Адрес учредителя, редакции, издателя
и типографии:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
294204, Луганская Народная Республика,
г.о. город Алчевск, г. Алчевск,
пр. Ленина, 16
E-mail: info@dontu.ru
Web-site: <https://dontu.ru/>

Главный редактор

Вишневский Д. А. — д.т.н., проф.

Заместитель главного редактора

Смекалин Е. С. — к.т.н., доц.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Коршунов Г. И. — д.т.н., проф.

Еременко В. А. — д.т.н., проф.

Борщевский С. В. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Артюх В. Г. — д.т.н., проф.

Сотников А. Л. — д.т.н., проф.

Витренко В. А. — д.т.н., проф.

Кузин А. В. — д.т.н., доц.

Михайлов А. Н. — д.т.н., проф.

Козлов А. М. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., доц.

Корзун Е. Л. — д.т.н., проф.

Богатырева Е. В. — д.т.н., проф.

Яковченко А. В. — д.т.н., проф.

Гончарук А. В. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. Н. — к.т.н., проф.

Сулейманова Л. А. — д.т.н., проф.

Смоляго Г. А. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

16+

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

SUBSURFACE MANAGEMENT

УДК 622.257.15

EDN: BXVOOO

^{1,*}Полозов Ю. А., ¹Смекалин Е. С., ²Лазебник А. Ю.¹Донбасский государственный технический университет,²Антрацитовский институт геосистем и технологий ЛГУ им. В. Даля

*E-mail: uapolozov@mail.ru

ВОДОИЗОЛЯЦИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ ЗОНЫ ТЕКТОНИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ШАХТНОГО СТВОЛА

В статье приведены результаты предпроектных проработок и технические решения по тампонажу опасной тектонической зоны смятия с целью водоизоляции и укрепления горных пород при проходке вертикального ствола «Клетевой» на Корбалихинском месторождении ОАО «Сибирь-полиметаллы». Научно обоснован выбор эффективных тампонажных растворов и способа выполнения тампонажных работ из забоя ствола.

Ключевые слова: рудник, шахтный ствол, тектоническое нарушение, тампонаж, тампонажные растворы.

Введение. Обеспечение безопасной проходки шахтных стволов имеет первостепенное значение для обеспечения доступа к подземным минеральным ресурсам и непрерывности горных работ.

Геологические неоднородности, особенно зоны тектонических нарушений, представляют собой значительные трудности при проходке стволов, включая неустойчивость горных пород, приток воды и потенциальные опасности для персонала и оборудования. Глубина ведения горных работ постоянно увеличивается из-за истощения запасов полезных ископаемых на малых глубинах, что повышает вероятность столкновения со значительными зонами тектонических нарушений и делает применение эффективных методов стабилизации все более важным этапом при строительстве подземных горных выработок [1–3].

Так, при вскрытии Корбалихинского месторождения полиметаллов предусмотрено сооружение вертикального ствола «Клетевой» глубиной 1300 м и диаметром в проходке 8,8 м. Абсолютная отметка земной поверхности в месте проходки ствола (+411,0 м). При проходке ствола предусмотрены специальные работы по укреплению и водоизоляции сильно трещиноватых пород на горизонтах: (–156,0 м), (–264,0 м), (–372,0 м); (–588,0 м) и (–710,0 м).

По результатам контрольного бурения стволовой скважины в зоне проходки Клетевой ствола в интервале 357,0–368,0 м выявлена мощная зона сильной трещиноватости горных пород. Устойчивость пород средняя, категория — II, коэффициент крепости пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова — 11.

В почве этой зоны в интервале 366,3–367,3 м зафиксирована тектоническая зона смятия, представленная серицитизированной глинисто-щебнистой массой.

Результаты горнопроходческих работ при сооружении вертикальных стволов, расположенных в районе проходки Клетевой ствола Корбалихинского месторождения, показали, что фактические водопритокки значительно превышают расчетные показатели (в 3–5 раз). В связи с этим возникали трудности в технологии проходки стволов [3].

Значения прогнозного водопритока в Клетевой ствол из зоны тектонического нарушения составляют от 18 м³/час до 30 м³/час.

В конкретной ситуации представляется целесообразным выполнить подавление водопритокков в зоне повышенной трещиноватости и укрепление раздробленных пород тектонической зоны смятия путем тампонирувания вмещающих пород методом нагнетания специальных растворов по

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

пробуренным через тампонажную подушку наклонно-направленным скважинам. В результате выполнения в рассматриваемом интервале вокруг ствола специальных работ будет сформирована гидроизоляционная завеса, способная выдержать гидростатический напор подземных вод и предупредить обрушение пород при проходке.

Актуальность работы. Актуальность данной работы определяется необходимостью выбора способа и технологии предварительного тампонажа мощной тектонической зоны из забоя ствола с целью водоизоляции и укрепления трещиноватых и раздробленных пород в интервале 357,0–368,0 м для предупреждения осложнений при проходке.

Анализ способов водоизоляции и укрепления трещиноватых раздробленных пород. Анализ способов водоизоляции и укрепления трещиноватых раздробленных пород из забоя ствола в зонах тектонических нарушений для угольных месторождений выполнен в работах [4–7].

Однако для горно-геологических и горнотехнических условий вскрытия Корбалихинского месторождения полиметаллов глубокими вертикальными шахтными стволами анализ не проводился.

Постановка задачи. Обоснование способа предварительного тампонажа трещиноватых раздробленных пород зоны крупного тектонического месторождения с использованием скважин, пробуренных из забоя ствола через предохранительную бетонную подушку с целью водоизоляции и укрепления вмещающих горных пород с применением эффективных глиноцементных растворов и аналитических методов расчета параметров изоляционных завес позволит выполнить работы с высокой эффективностью и надежностью.

Целью настоящей работы является обоснование целесообразности применения структурированных глиноцементных растворов, выбор и принятие способа предварительного тампонирувания трещиноватых раздробленных горных пород зо-

ны тектонического нарушения в интервале 357,0–368,0 м при сооружении Клетевого ствола на Корбалихинском месторождении полиметаллов.

Объект исследования — технология предварительного тампонажа трещиноватых раздробленных пород зоны тектонического нарушения через скважины, пробуренные из забоя шахтного ствола с использованием тампонажного оборудования, расположенного на поверхности земли.

Предмет исследования — методика расчета параметров изоляционной завесы вокруг шахтного ствола, технические решения по выбору схемы расположения тампонажных скважин, пробуренных из забоя ствола, и способа нагнетания растворов в проницаемую среду.

Задачи исследования:

- выделить в разрезе ствола конкретную тампонажную заходку в соответствии с горно-геологическими условиями месторождения и техническими характеристиками принятого проектом бурового оборудования;
- предусмотреть устройство изоляционных завес в выделенной заходке путем поочередного нагнетания тампонажного раствора в проницаемые зоны через пробуренные из забоя ствола скважины;
- предусмотреть бурение опережающей контрольной скважины для определения фактической водопроницаемости горных пород в данном интервале;
- рассчитать размеры изоляционной завесы вокруг вертикального ствола из протампонируемых пород в виде преграды на пути фильтрации подземных вод, способной выдержать гидростатический напор, снизить водопиток до величин, допускаемых нормативными документами, консолидировать и упрочнить раздробленные трещиноватые породы;
- предусмотреть использование в качестве тампонажного материала цементно-глинистых растворов плотностью 1545 кг/м³, содержащих в своем составе для повышения седиментационной устойчивости рас-

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

творя до 6,0 % бентонитовых или полиминеральных глин;

– применить для приготовления тампонажных растворов сульфатостойкий портландцемент М400 или М500, соответствующий кислую составу агрессивных подземных вод с высоким процентом ионов SO_4^{+2} .

Принятыми проектными решениями рекомендуется осуществлять приготовление тампонажного раствора на поверхности земли, а его нагнетание производить по высоконапорному трубопроводу, проложенному по стволу до забоя.

Нагнетание тампонажных растворов в скважины, оборудованными кондукторами с превенторами, предусмотреть по зажимной схеме заходками сверху вниз через кондуктор или с использованием механических пакерующих устройств.

Расстояние между тампонажными скважинами по окружности в забое ствола по данным графических построений принять равным 3,0 м, что обеспечит смыкание расчетных контуров распространения тампонажного раствора из соседних скважин.

Также необходимо предусмотреть контроль качества тампонажа и корректировку принятых решений в части технологических параметров нагнетания растворов.

Изложение материала и результаты. При бурении контрольно-разведочных скважин на шахтном стволе «Клетевой» были получены данные о литологическом составе пород вскрываемого месторождения, гидрогеологических условиях участка сооружения ствола и фильтрационных параметрах.

В геологическом разрезе отмечены зоны трещиноватых и раздробленных пород, потенциально опасных по притокам подземных вод в ствол, а также по обрушению пород при проходке и нарушению крепи ствола. Всего до глубины 1215 м выделена 41 опасная зона, из которых 6 — зоны дробления.

Зоны дробления и расслаивания пород залегают в интервалах 357,0–368,0 м, 456,0–466,0 м, 569,0–591,0 м, 1014,2–1022,0 м.

Геологический разрез и схема расположения тампонажных скважин в интервале 357,0–368,0 м приведены на рисунке 1.

Настоящие исследования по выбору технологии и параметров тампонажа трещиноватых и раздробленных пород, прилегающих к крупной тектонической зоне смятия в интервале 357,0–368,0 м, проводились согласно служебной записке геологической службы ООО «Шахтостроительное управление».

Основные технические решения данных исследований также могут быть использованы при пересечении шахтным стволом других опасных трещиноватых зон и зон дробления горных пород. При подходе забоя ствола к этим зонам необходимо проведение опережающего бурения разведочной скважины и только после этого — принятие решения о применении специальных способов проходки.

В конкретной ситуации, при проходке ствола «Клетевой», представляется целесообразным подавление водопритокков в зонах повышенной и сильной трещиноватости и укрепление раздробленных пород тектонической зоны смятия путем тампонирования вмещающих трещиноватых пород методом нагнетания в них специальных цементно-глинистых растворов. В результате вокруг ствола будет сформирована гидроизоляционная завеса, способная выдержать гидростатический напор подземных вод.

Исходными предпосылками по выбору специального способа проходки ствола «Клетевой» и зон трещиноватых и неустойчивых раздробленных пород являются:

– значительные ожидаемые водопритокки в ствол, достигающие 18–20 м³/час, в т. ч. из отдельных зон до 30 м³/час;

– наличие сильнотрещиноватых и неустойчивых раздробленных горных пород, в т. ч. тектонической зоны смятия, заполненной серицитизированной глинисто-щебнистой массой в интервале 366,3–367,3 м;

– опыт проходки горных выработок через тектонические зоны показывает, что само тектоническое нарушение, как прави-

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

ло, заполнено глинисто-щебеночным материалом и является водонепроводимым. Значительная водопроницаемость, а следовательно, водоприитоки приурочены к трещиноватым, оперяющим нарушение, породам, что крайне важно для правильного по-

нимания проблемы и принятия решений по технологии тампонирования таких зон;

– ствол находится в проходке, на поверхности земли располагается необходимое технологическое оборудование, сооружение и здания.

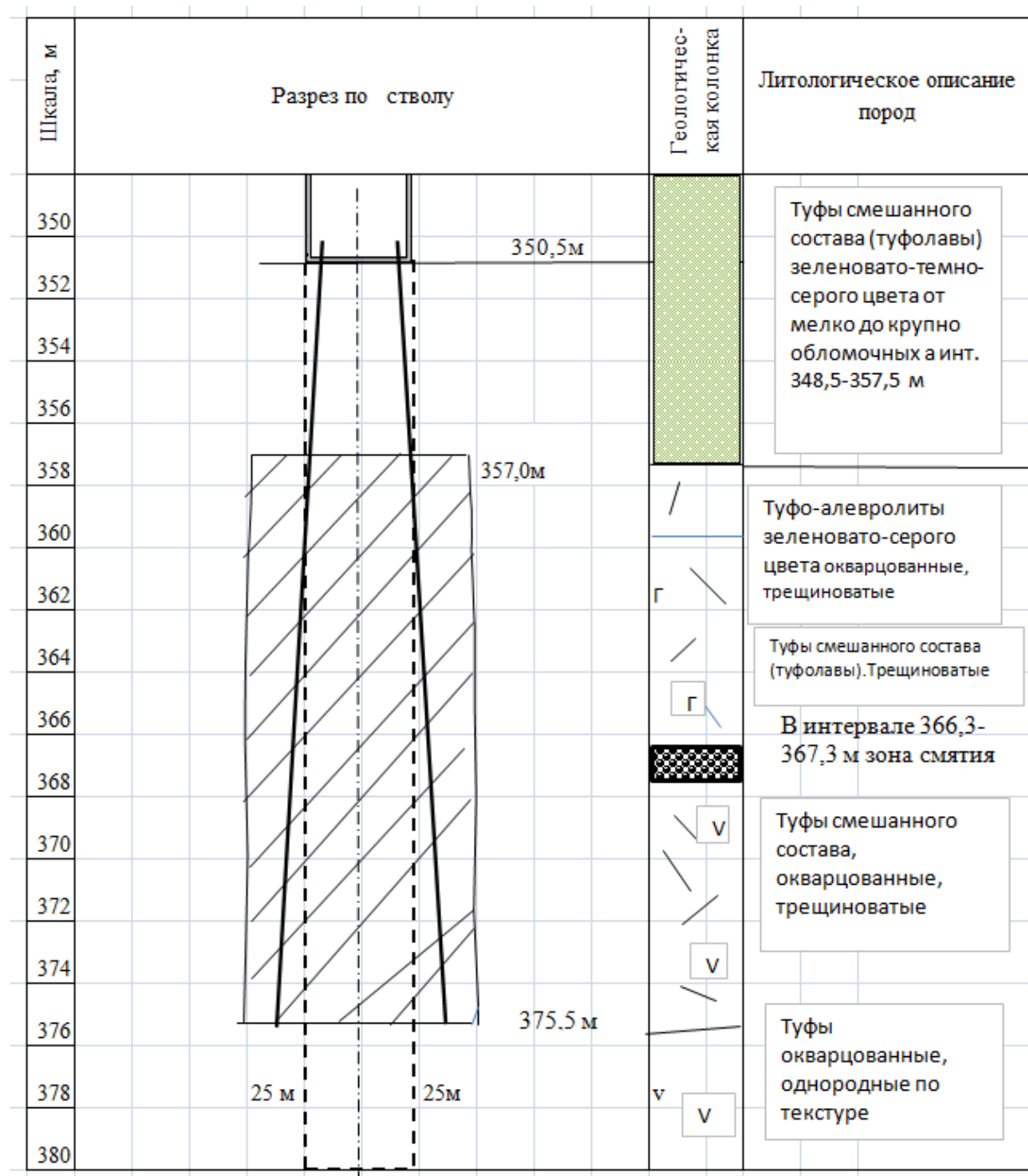


Рисунок 1 — Геологический разрез и схема расположения тампонажных скважин в интервале 357,0–368,0 м

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

С учетом этого, а также глубины опасной зоны возможны для рассмотрения два варианта водоподавления:

- предварительный тампонаж через скважины, пробуренные с земной поверхности;
- тампонаж через опережающие скважины, пробуренные из забоя ствола.

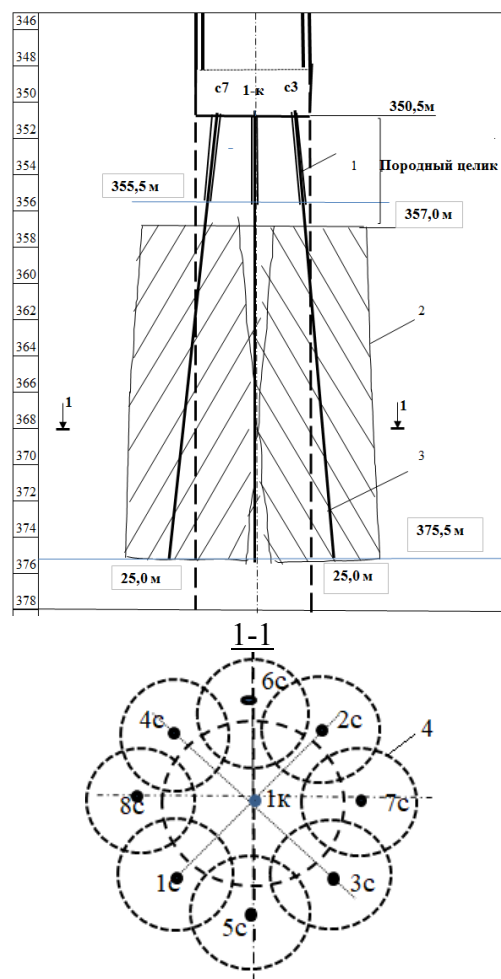
В конкретных горно-геологических условиях оптимальным является совмещенный вариант — приготовление раствора на поверхности и тампонаж из забоя, т. к. застроенность поверхности вокруг ствола и расположение технологического оборудования для проходки не позволят разместить буровое оборудование.

Характеристика основных технических решений по варианту тампонажа из забоя:

- величина заходки должна составлять не более 15–20 м, что соответствует техническим характеристикам выбранного оборудования для бурения из забоя ствола;
- отказ от сооружения в забое бетонных подушек и использование вместо них предохранительных породных целиков, под защитой которых будет выполняться бурение разведочных и тампонажных скважин, а также производиться нагнетание тампонажного раствора;
- нагнетание тампонажного раствора в скважины производить нисходящими заходками, что позволит консолидировать и укреплять раздробленные и сильно трещиноватые породы, тем самым обеспечив возможность безаварийного бурения тампонажной скважины до проектной глубины;
- тампонажное оборудование (цементационные насосы, промежуточные емкости) располагается на земной поверхности;
- оборудование для приготовления раствора (растворомешалки) размещаются на поверхности, вблизи устья ствола, а раствор на полку подается по высоконапорному трубопроводу, проложенному по стволу;
- нагнетание тампонажного раствора производится по специальному высоконапорному трубопроводу, опущенному от полка до забоя.

Учитывая наличие трещиноватых и раздробленных обводненных пород, изоляционную завесу предусматривается разместить с внешнего контура ствола. В забое ствола тампонажные скважины будут находиться в контуре сечения ствола «в проходке», как показано на рисунке 2.

При этом, расстояние от тампонажных скважин до стенок ствола в забое принимаем равным 1,0–1,5 м, что будет достаточным для размещения бурового оборудования.



1 — кондуктор тампонажной скважины; 2 — контур тампонажной завесы; 3 — тампонажная скважина; 4 — контур распространения тампонажного раствора из отдельной скважины; 1с–8с — номер и местоположение тампонажной скважины; 1к — контрольная скважина

Рисунок 2 — Схема формирования изоляционной завесы и зоны укрепления в интервале 357,0–368,0 м

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Эффективность создаваемой изоляционной завесы будет зависеть от ее мощности (толщины), для чего необходимо при нагнетании тампонажного раствора получить достаточные контуры распространения тампонажного раствора в трещиноватом массиве вокруг тампонажной скважины.

Бурение тампонажных скважин производится через зацементированные в предохранительном породном целике стальные трубы (кондуктора), с запорной арматурой для предупреждения внезапного прорыва подземных вод.

Разработка основных технических решений по тампонажу обводненных горных пород при проходке ствола «Клетевой» базируется на опыте научно-производственного объединения «Спецтампонажгеология» по подавлению водопритокков с использованием комплексного метода тампонажа обводненных горных трещиноватых пород, примененного при сооружении более чем 120 глубоких вертикальных стволов шахт в Донецком бассейне, а также при строительстве и реконструкции целого ряда объектов горнорудной промышленности в России и за рубежом [4–7].

Параметры формирования гидроизоляционной завесы. Руководствуясь конкретными горно-геологическими, гидрогеологическими и гидрохимическими

условиями Корбалихинского месторождения, для водоподавления методом тампонирувания на стволе «Клетевой» оптимальным можно считать применение цементных тампонажных растворов с добавками глинопорошков (бентонита и т. д.). Тампонажные растворы представляют собой высококонсистентные стабильные системы на водной основе, в состав которых входят глина, вода затворения и в качестве вяжущего — цемент. Содержание цемента не менее 50 %. Высокие технологические свойства таких цементных растворов позволяют тампонировать трещины с раскрытием от 0,2 мм и более. Глинистые добавки в растворы обеспечивают им хорошие водоизоляционные свойства, повышают седиментационную устойчивость в процессе их приготовления и нагнетания.

В качестве тампонажных растворов для изоляции и консолидации обводненных неустойчивых пород необходимо применять при проходке ствола соответственно цементно-глинистые растворы [8–11].

Свойства тампонажных растворов приведены в таблице 1.

Подземные воды месторождения в результате окисления сульфидов и накопления SO_4 существенно повышают агрессивность по отношению к бетону, что требует применения сульфатостойких марок цемента.

Таблица 1

Характеристика типового глиноцементного тампонажного раствора

№ п.п	Тип тампонажного раствора	Плотность, кг/м ³	Предел прочности цементного камня на сжатие, МПа			Сроки схватывания, час-мин		Допустимое напряжение сдвига, τ_0 , Па
			3 суток	7 суток	28 суток	начало	конец	
1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Цементно-глинистый В/Ц = 1/1 при добавках глинистого порошка 6 %	1545	7,7	9,8	13,7	8-00	30-00	50-66
2	Цементный В/Ц = 1/0,6	1750	18,0	24,0	25,0	4-00	15-00	28

Примечание: в качестве основного тампонажного раствора рекомендуется цементно-глинистый раствор с добавками бентонита.

Расчет параметров формирования изоляционной завесы. Необходимые размеры гидроизоляционной завесы (зоны тампонирувания) вокруг ствола определяются по уравнению

$$R = \frac{\alpha \cdot \delta_{\max} \cdot P_k}{2 \cdot [P_m]} + r_c, \text{ м}, \quad (1)$$

где R — размер гидроизоляционной завесы вокруг ствола, м;

α — коэффициент запаса прочности гидроизоляционной завесы составляет (2–4);

$\delta_{\max}$ — максимальное раскрытие трещин, м;

P_k — напор подземных вод, МПа;

$[P_m]$ — допустимая пластическая прочность тампонажного раствора, МПа,

r_c — радиус ствола в проходке, м.

Расчетный радиус изоляционной завесы вокруг ствола для трещин с возможным максимальным раскрытием 0,01 м и напором подземных вод 3,45 МПа для интервала тампонирувания 350,0–375,0 м составит 10,8 м.

Необходимое количество точек нагнетания (скважин) для формирования изоляционной завесы в заходке или конкретном водопроницаемом интервале определяется графическим путем, исходя из общих размеров завесы вокруг ствола и контура распространения тампонажного раствора из отдельной скважины, как показано на рисунке 2. При этом учитываются допустимые отклонения профилей тампонажных скважин с целью гарантированного перекрытия расчетной изоляционной завесы вокруг ствола контурами распространения тампонажного раствора из отдельных скважин.

Необходимый расчетный радиус распространения цементно-глинистого раствора в каждой из выделенных заходов, по данным графических построений (рис. 2), составляет 3,0 м.

При этом оптимальным количеством тампонажных скважин является 8, равномерно размещенных по периметру шахтного ствола. Опережающая разведочная скважина бурится в свободной зоне центральной части забоя.

Объем тампонажного раствора, необходимый для нагнетания в каждую из скважин, рассчитывается по формуле

$$V_{m.p.} = \pi \cdot r^2 \cdot M \cdot m_t, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где $V_{m.p.}$ — объем тампонажного раствора, нагнетаемый в скважину, м³;

r — расчетный радиус распространения тампонажного раствора в массиве пород, м;

M — мощность проницаемых пород в каждой заходке (или в зоне тампонажа), м;

m_t — скважность (трещинная пустотность) горных пород, дол. ед.

Объемы тампонажного раствора, закачиваемого в проницаемые горизонты вокруг тектонической зоны смятия, рассчитанные по предложенной методике, приведены в таблице 2. Общий объем тампонажного раствора, необходимый для нагнетания:

$$V = V_{m.p.} \cdot n, \quad (3)$$

где n — количество тампонажных скважин.

Результаты расчетов необходимых объемов нагнетания тампонажного раствора по всем заходкам ствола приведены в таблице 2.

Объемы нагнетания тампонажного раствора по каждой скважине подлежат корректировке в процессе производства после бурения опережающей разведочной скважины и по результатам фактического выполнения работ в заходке.

Рабочее давление нагнетания на насосе, расположенном на полке, характеризующее достижение расчетной величины контура распространения тампонажного раствора из отдельной скважины, определяется по уравнению

$$P_n = \Delta P_0 + \Delta P_{mp} + P_k + P_c, \quad (4)$$

где P_n — рабочее давление нагнетания, МПа;

ΔP_0 — перепад давления на преодоление гидравлического сопротивления в трещинах водопроницаемой зоны, МПа;

ΔP_{mp} — потери напора при течении тампонажного раствора в нагнетательном трубопроводе и скважине, МПа;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

P_k — гидростатический напор подземных вод для каждого водоносного горизонта, МПа;

P_z — гидростатическое давление столба тампонажного раствора в нагнетательной линии и скважине, МПа.

Потери напора в нагнетательном трубопроводе с внутренним диаметром 38 мм от уровня полка до устья скважины (в забое) рассчитывается по удельным потерям напора на 100 п. м. труб. Для бурильных труб Ø50 мм муфтового соединения, имеющих внутренний диаметр 38 мм, и резинового шланга высокого давления с таким же внутренним диаметром удельные потери напора определяются по [12, табл. 4]. Для цементно-глинистого раствора с плотностью 1545 кг/м³ и $\tau_0 = 0,066 \cdot 10^{-3}$ МПа при расходе 2,5 л/с удельные потери напора в нагнетательном трубопроводе составляют 1,08 МПа на 100 п. м. труб.

Исходя из этого, при расстоянии от забоя до проходческого полка, равном 10 м, потери напора раствора в нагнетательной линии составят 0,11 МПа.

Результаты расчетов рабочего давления нагнетания на насосе, расположенном на проходческом полке на отметке 340 м, обеспечивающего достижение расчетных контуров распространения тампонажного раствора, приведены в таблице 3.

Потери давления тампонажного раствора по преодолению гидравлического сопротивления при распространении в трещиноватых породах определяются из выражения

$$\Delta P = \frac{2\tau \cdot r}{\delta_{1-1}}, \quad (5)$$

где δ_{1-1} — раскрытие тампонируемых трещин, м;

ΔP — допустимый перепад давлений на преодоление гидравлического сопротивления при течении тампонажного раствора в массиве, МПа;

r — радиус распространения раствора вокруг тампонажной скважины, м;

τ — динамическое напряжение сдвига тампонажного раствора.

Таблица 2

Объемы нагнетания раствора по стволу в зоне тектонического нарушения

№ п. п.	Интервал тампонирувания, м	Интервалы заходок	Приведенная мощность, м	Радиус завесы из одной скважины, м	Скважность, %	Объем нагнетания раствора в одну скважину, м ³	Количество скважин	Общий объем раствора, м ³
1	357,0–375,5	357,0–366,3	9,7	3,0	0,5	1,40	9	12,6
		367,3–375,5	8,2	3,0	0,5	1,20	9	10,8
2	Итого					2,6		23,4

Таблица 3

Расчетные данные давлений нагнетания на забое ствола «Клетевой»

№ п. п.	Интервал тампонажных заходок	Перепад давления в трещинах ΔP , МПа	Гидростатический напор подземных вод, P_k , МПа	Потери напора в нагнетательном трубопроводе и скважине, $\Delta P_{тр}$, МПа	Гидростатическое давление столба тампонажного раствора в нагнетательном трубопроводе, $P_{г2}$, МПа	Расчетное давление нагнетания, P_n , МПа
1	357,0–366,3	1,98	3,38	0,11	0,40	5,0
2	367,3–375,5	1,98	3,47	0,11	0,54	5,0

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Исходные данные для расчетов:

δ_{1-1} — минимальное раскрытие трещин, исходя из проникающей способности тампонажного раствора, принимаем равным $2 \cdot 10^{-3}$ м;

τ_0 — динамическое напряжение сдвига тампонажного раствора, МПа. Принимаем $\tau_0 = 0,066 \cdot 10^{-3}$ МПа для цементно-глинистого раствора плотностью 1545 кг/м^3 [12].

Рабочее давление нагнетания, рассчитанное по приведенной методике, должно соответствовать техническим характеристикам насоса для нагнетания тампонажного раствора.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Водоизоляцию и укрепление трещиноватых и раздробленных пород зоны тектонического нарушения при проходке

ствола «Клетевой» на Корбалихинском месторождении полиметаллов целесообразно выполнить способом предварительного тампонажа через скважины, пробуренные из забоя ствола через предохранительный целик расчетной мощности. Нагнетание тампонажного раствора в проливаемую зону следует производить по высоконапорному трубопроводу, проложенному по шахтному стволу, тампонажное оборудование расположить на дневной поверхности около шахтного ствола.

2. Предлагаемая технология предварительного тампонажа трещиноватых пород может быть использована для других тектонических зон, выявленных в процессе бурения опережающих контрольно-разведочных скважин при строительстве шахтного ствола, что позволит исключить осложнения и аварийные ситуации при проходке.

Список источников

1. СП 103.13330.2012. *Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. Актуализированная редакция СНиП 2.06.14-85* / Минрегион России. М. : ФАУ «ФЦС» ; ООО «Аналитик», 2012. 70 с.
2. СП 116.13330.2012. *Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003*. URL: <http://minstroyrf.gov.ru/docs/1906/>.
3. *Технические предложения на выполнение комплекса укрепительных и гидроизоляционных работ при проходке вертикального ствола «Клетевой» на Корбалихинском месторождении ОАО «Сибирь-полиметаллы»*. Ростов н/Д : НТЦ «Наука и Практика», 2016. 24 с.
4. *Комплексный метод тампонажа строительстве шахт* / Э. Я. Купко [и др.]. М. : Недра, 1984. 243 с.
5. *Тампонаж обводненных горных пород : справочное пособие* / Э. Я. Купко, О. Ю. Лушников, Ю. А. Полозов [и др.]. М. : Недра, 1989. 318 с.
6. Палейчук Н. Н., Шарко А. А., Лазебник А. Ю. *Основы горно-строительного производства : учебное пособие*. Луганск : Ноулидж, 2022. 250 с.
7. Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю., Смекалин Е. С. *Обоснование технических решений и выбор способа ликвидации аварийной горной выработки* // *Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2025. Вып. 7 (81). С. 19–28. EDN GJZXJM
8. *Ликвидация водопроявлений при строительстве и эксплуатации тоннельных и притоннельных сооружений* / И. Я. Харченко, А. И. Панченко, В. А. Алексеев, А. И. Харченко // *Жилищное строительство*. 2018. № 9. С. 24–29. EDN SAFORZ
9. Полозов Ю. А., Бизянов Е. Е., Лазебник А. Ю. *Ликвидация последствий техногенной катастрофы в районе провала земной поверхности на калийном руднике* / *Сборник научных трудов ДонГТИ*. 2021. Вып. 23 (66). С. 5–12. EDN FIZKPH
10. *Method to Evaluate Lost Circulation Materials — Investigation of Effective Wellbore Strengthening Applications* / S. Savari, L. D. Whitfill, E. D. Jamison, A. A. Kumar // *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, 4-6 March 2014, Fort Worth, Texas, USA. Paper Number: SPE-167977-MS. 7 p. DOI: 10.2118/167977-MS

11. Greenwood J. A., Dautel M. R., Russell R. B. The Use of LWD Data for the Prediction and Determination of Formation Pore Pressure // Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition, 4–6 August 2009, Jakarta, Indonesia. Paper Number: SPE-124012-MS. 11 p. DOI: 10.2118/124012-MS

12. Временная инструкция по тампонажу трещиноватых горных пород комплексным методом / МУП СССР. Ворошиловград, 1978. 88 с.

© Полозов Ю. А., Смекалин Е. С., 2025

© Лазебник А. Ю., 2025

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. СГ АИГиТ ЛГУ им. В. Даля Должиковым П. Н.
к.т.н., доц. каф. ГиБП ДонГТУ Леоновым А. А.*

Статья поступила в редакцию 21.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полозов Юрий Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологий и безопасности производств

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: uapolozov@mail.ru

Смекалин Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Лазебник Александр Юрьевич, старший преподаватель каф. строительства и геоконтроля
Антрацитовский институт геосистем и технологий ЛГУ им. В. Даля,
г. Антрацит, Россия

***Polozov Yu. A., Smekalin Ye. S.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: uapolozov@mail.ru), **Lazebnik A. Yu.** (Anthracite Institute of Geosystems and Technologies of LSU named after V. Dahl, Antracite, Russia)

WATERPROOFING AND STRENGTHENING THE TECTONIC DISTURBANCE ZONE DURING SINKING OF A VERTICAL MINE SHAFT

The article presents the results of prior design preparations and technical solutions for grouting a dangerous tectonic crushing zone in order to waterproof rock reinforcement during sinking of a vertical shaft “Kletevoy” at the Korbalikhinsky deposit of OAO “Sibir-Polymetals”. There has been scientifically grounded the choice of the effective grouting solutions and the method to perform grouting operations from the shaft foot.

Key words: ore mine, mine shaft, tectonic disturbance, grouting, grouting solutions.

References

1. SP 103.13330.2012. Protection of mine workings from underground and surface waters. Updated edition of SNiP 2.06.14-85 / Minregion of Russia. M. : FAI “FCS” ; ООО “Analitik”, 2012. 70 p.

2. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic provisions. Updated edition of SNiP 22-02-2003. URL: <http://minstroyrf.gov.ru/docs/1906/>.

3. Technical proposals for the implementation of a complex of strengthening and waterproofing works during sinking of a vertical shaft “Kletevoy” at the Korbalikhinsky deposit of OAO “Sibir-Polymetals”. [Tekhnicheskie predlozheniya na vypolnenie kompleksa ukrepiteľnyh i gidroizolyacionnyh

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

rabot pri prohodke vertikal'nogo stvola «Kletevoj» na Korbalihinskom mestorozhdenii OAO «Sibir'-polimetal'ly». ООО «NTC «Nauka i Praktika». J. Rostov-on-Don : NTC "Science and Practice", 2016. 24 p.

4. Kipko E. Ya. [et al.]. *Complex method of grouting in the construction of mines [Kompleksnyj metod tamponazha stroitel'stve shaht]*. M. : Nedra, 1984. 243 p.

5. Kipko E. Ya., Lushnikova O. Yu., Polozov Yu. A. [et al.]. *Grouting of flooded rocks : a reference manual [Tamponazh obvodnennyh gornyh porod : spravocnoe posobie]*. M. : Nedra, 1989. 318 p.

6. Paliychuk N. N., Sharko A. A., Lazebnik A. Yu., Paliychuk N. N. *Fundamentals of mining and construction production : textbook [Osnovy gorno-stroitel'nogo proizvodstva : uchebnoe posobie]*. Lugansk : Noulidzh, 2022. 250 p.

7. Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu., Smekalin E. S. *Justification of technical solutions and the choice of a method for the elimination of emergency mining [Obosnovanie tekhnicheskikh reshenij i vybor sposoba likvidacii avarijnoj gornoj vyrabotki]*. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. Iss. 7 (81). Pp. 19–28. EDN GJZXJM

8. Kharchenko I.Ya., Panchenko A. I., Alekseev V. A., Kharchenko A. I. *Elimination of water occurrences during the construction and operation of tunnel and tunnel structures [Likvidaciya vodoproyavlenij pri stroitel'stve i ekspluatácii tonnel'nyh i pritonnel'nyh sooruzhenij]*. Housing construction. 2018. No. 9. Pp. 24–29. EDN SAFORZ

9. Polozov Yu.A., Bizyanov E. E., Lazebnik A.Yu., *Elimination of the consequences of a man-made disaster in the area of the sinkhole of the earth's surface at the potash mine [Likvidaciya posledstvij tekhnogennoj katastrofy v rajone provala zemnoj poverhnosti na kalijnom rudnike]*. Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2021. Vol. 23 (66). Pp. 5–12.

10. Savari S., Whitfill L. D., Jamison E. D., Kumar A. A. *Method to Evaluate Lost Circulation Materials — Investigation of Effective Wellbore Strengthening Applications. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 4–6 March, 2014, Fort Worth, Texas, USA. 2014. Paper Number: SPE-167977-MS. 7 p. DOI: 10.2118/167977-MS*

11. Greenwood J. A., Dautel M. R., Russell R. B. *The Use of LWD Data for the Prediction and Determination of Formation Pore Pressure. Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition, 4–6 August, 2009, Jakarta, Indonesia. Paper Number: SPE-124012-MS. 11 p. DOI: 10.2118/124012-MS*

12. *Temporary instructions for grouting fractured rocks by a complex method [Vremennaya instrukciya po tamponazhu treshchinovatyh gornyh porod kompleksnym metodom]*. Municipal Unitary Enterprise of the USSR. Voroshilovgrad, 1978. 88 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Polozov Yuri Arkadievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: uapolozov@mail.ru

Smekalin Yevgeniy Sergeyevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Lazebnik Aleksandr Yurievich, Senior Lecturer of the Department of Building and Geocontrol
Anthracite Institute of Geosystems and Technologies of Lugansk State University named after V. Dahl
Anthracite, Russia

УДК 622.232.32

EDN: CLZXOA

Корнеев С. В., *Доброногова В. Ю.*Донбасский государственный технический университет***E-mail: kafedra.gemio@dstu.education*

НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНЦОВ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ПОД ЗУБЧАТЫЙ СТЫК

Для обработки концов резинотканевых конвейерных лент под зубчатый стык предлагается устройство с узлом фиксации ленты, содержащим прижимной элемент в виде трафарет-копира, который по контуру повторяет форму зубьев на ленте и служит направляющим для режущего инструмента при нарезании зубьев. Устройство обеспечивает необходимую точность изготовления зубьев, что является одним из условий достижения высокой прочности стыка.

Ключевые слова: *резинотканевая конвейерная лента, зубчатый стык, геометрические параметры зубьев, устройство для разделки концов ленты, узел фиксации, трафарет-копир.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Ленточные конвейеры остаются наиболее эффективным и высокопроизводительным видом непрерывного транспорта в различных отраслях промышленности.

Функции грузонесущего и одновременно тягового органа конвейера выполняет лента, в настоящее время преимущественно с тканевым каркасом. На длинных конвейерах тяговый орган формируется из отдельных соединяемых последовательно кусков длиной не более 200 м, которые поставляются заводом-изготовителем в бухтах. Куски ленты соединяются, образуя тяговый орган, механическим способом или, если позволяют условия изготовления стыков, способами холодной или горячей вулканизации.

Стыковка конвейерных лент горячей вулканизацией признана самым эффективным способом соединения из всех существующих технологий замыкания ленты, так как позволяет получить практически монолитную структуру материала и наиболее прочный стык [1, 2].

Для многопрокладочных лент стыки традиционно представляют собой ступенчатую конструкцию нахлестного (Н) или полунахлестного (ПН) типа. Ступенчатым вулканизированным соединениям и технологии их изготовления присущи следующие

недостатки: неравномерное распределение касательных напряжений по длине каждой ступени и стыка в целом; концентрация нормальных напряжений в тканевых прокладках, которые прилегают к разрезанным; снижение усталостной прочности стыка в результате действия нормальных («отрывающих») напряжений в связующем слое, появление которых обусловлено жесткостью тканевых прокладок и резиновых обкладок ленты в зоне крайних ступеней стыка при его взаимодействии с барабанами и роликами конвейера; некачественная поверхность ступеней стыка, которая образуется при подготовке ступеней стыка; невозможность качественной обработки бортов ленты в зоне стыка, что не позволяет получить полное соприкосновение соединяемых поверхностей вдоль бортов, особенно это негативно сказывается на прочности и долговечности соединений, выполненных холодной вулканизацией; высокая трудоемкость изготовления стыков, так как основная часть операций при подготовке кромок осуществляется ручным способом; невозможность использования ступенчатых стыков для соединения конвейерных лент с цельнотканым каркасом; в соединениях ПН типа число ступеней на единицу меньше числа прокладок в ленте, что существенно ослабляет прочность стыка [3, 4].

Постановка задачи. Среди альтернативных конструкций стыковых соединений, свободных от отмеченных недостатков ступенчатых соединений, наиболее разработанными являются зубчатые [3–7]. Концы соединяемых лент представляют собой ряд в виде трапеции или параллелограмма (рис. 1). Боковые поверхности зубьев имеют форму клина, т. е. боковые грани выступов наклонены под некоторым углом к поверхности ленты.

Концы лент соединяют встык, укладывая выступы одного конца ленты во впадины другого.

В технологическом процессе изготовления зубчатых стыков наиболее ответ-

ственной и трудоемкой операцией является разделка концов ленты под стык.

В ДонГТУ разработан стенд [8], на котором проводились исследования отдельных операций по нарезанию зубьев на конце резиноканевой конвейерной ленты. Стенд по сути представляет собой устройство для нарезания зубьев, но в силу конструктивных особенностей не может быть применен в условиях производства. В процессе исследований выявлены недостатки, установлена работоспособность и намечены пути модернизации отдельных узлов, которые вошли в состав разработанных впоследствии устройств для разделки концов лент под зубчатый стык.

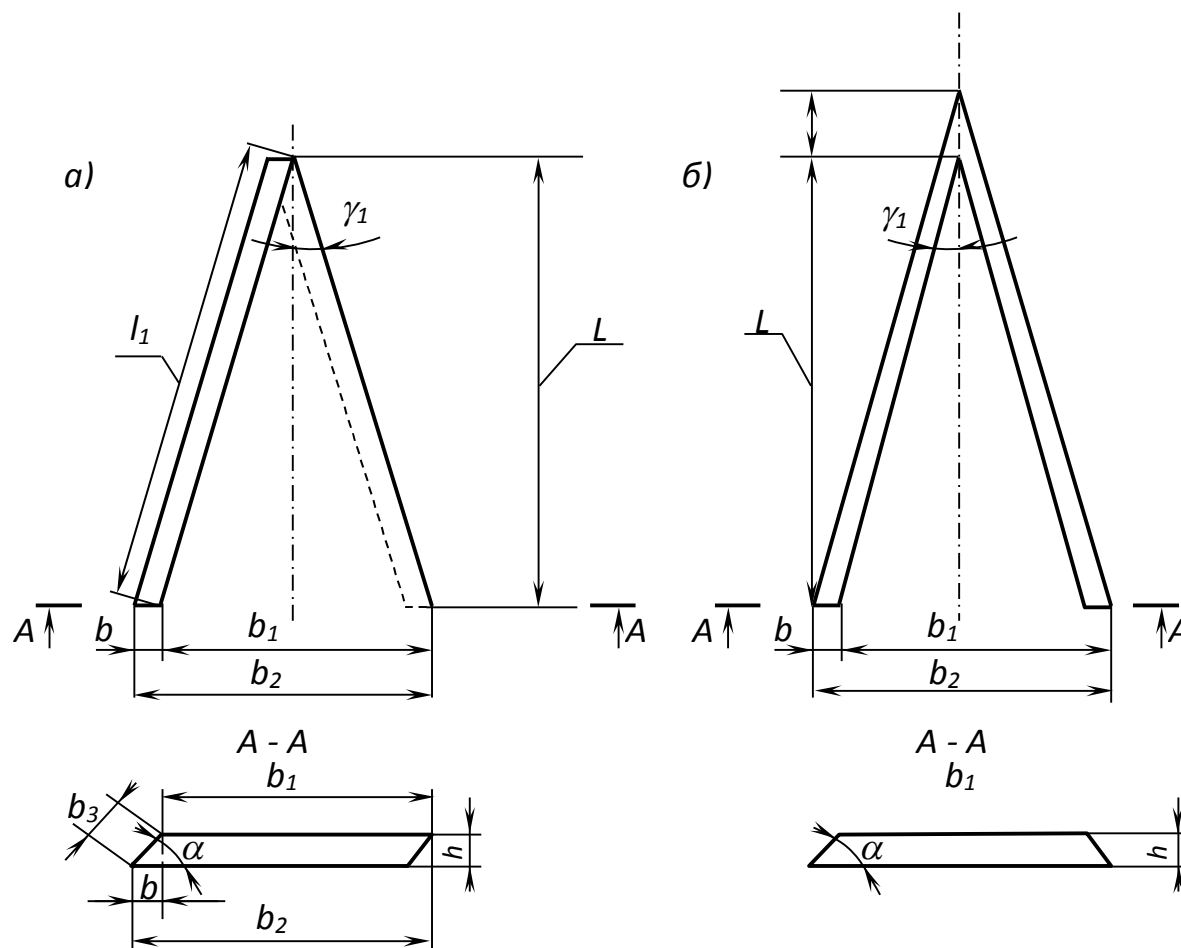


Рисунок 1 — Геометрия зубьев зубчатого стыка конвейерных лент с сечением зуба:
а — в виде параллелограмма, б — в виде трапеции

Известно устройство [9] для обработки концов конвейерных лент (рис. 2), которое состоит из рамы, выполненной в виде шарнирного параллелограмма, противоположные звенья которого одинаковые по конструкции и назначению. Одна из пар звеньев исполнена в виде направляющих 1 с консолями на концах, в которых жестко закреплены вертикальные оси 2 с резьбами. Другая пара звеньев выполнена в виде талрепов 3 и состоит из муфт 4 с левой и правой резьбами на торцах, ввинченных в них ушек 5 с отверстиями в их плоских частях. Талрепы 3 установлены отверстиями ушек 5 на вертикальные оси 2 направляющих 1, а между талрепами 3 размещены повторяющие внешнюю форму направляющих 1 ползуны 6 с полками, в которых жестко закреплены вертикальные оси 7. Для жесткого крепления ползунов 6 на направляющей 1 установлены болты 8. Направляющая 9 круглого сечения со шпоночным пазом 10 по всей длине по конструкции аналогична талрепам 3 и установлена на вертикальных осях 7 ползунов 6; причем ось направляющей 9 находится в одной горизонтальной плоскости с осями талрепов 3, и эти оси параллельны между собой. На направляющей 9 установлена с возможностью продольного перемещения каретка 11 с жестко закрепленным корпусом 12 салазок ножа и шпонкой 13, которая взаимодействует со шпоночным пазом 10 направляющей 9. Корпус 12 выполненный в виде коробчатой направляющей, в которой с помощью винта 14 перемещаются салазки 15 с закрепленным на них ножом плоской формы 16, положение которого фиксируется болтом 17; причем продольная ось ножа 16 перпендикулярна оси направляющей 9, которая установлена на ползунах 6 с возможностью поворота вокруг своей оси. На одной из ушек 5 направляющей 9 жестко закреплена консоль 18 с ручной лебедкой 19, тяговый орган 20, которой выполнен из стальной ленты и закреплен на каретке 11 посредством узла соединения в виде плоской втулки 21.

Устройство работает следующим образом. На раме конвейера жестко крепится деревянный щит, размеры которого не меньше размеров устройства. После этого на щите укладывают концы конвейерной ленты внакладку или встык и предварительно крепят гвоздями, струбцинами или с помощью клея. После этого на ленту устанавливают устройство, выставляют и фиксируют угол α рамы. Жестко крепят ленту к щиту или раме конвейера, затем вращением направляющей 9 выставляют и фиксируют угол β наклона ножа к поверхности ленты и положение направляющей 9 относительно направляющих 1. Далее винтом 14 нож 16 внедряют в ленту на необходимую глубину и фиксируют болтом 17. После этого лебедкой 19 перемещают каретку 11 вдоль направляющей 9, разрезая ленту в нужном направлении. Для проведения следующего реза, параллельного первому, раскрепляют ползуны 6, 18 и перемещают направляющую 9 на шаг резания.

Данное устройство, как следует из анализа его конструктивных особенностей и принципа работы, не может обеспечить заданную точность геометрических параметров зубьев. Причиной этому являются:

- 1) ручная разметка зубьев на поверхности ленты;
- 2) установка вручную всех подвижных элементов устройства относительно ленты;
- 3) недостаточная жесткость сборной конструкции рамы, определяемая жесткостью фиксаторов ползунов 6 на направляющих 1;
- 4) отжатие ножом в поперечном направлении нарезаемых на концах ленты зубьев, а также, в зависимости от направления резания, вытяжка или сжатие зубьев в продольном направлении, увеличивающиеся на их концах.

Нарушения параметров и формы зубьев приводят к несовпадению зубьев и впадин при сборке стыка и вследствие этого к снижению его качества. Также при нарезании грани зуба предполагается несколько проходов ножом, что повышает трудоемкость процесса разделки ленты.

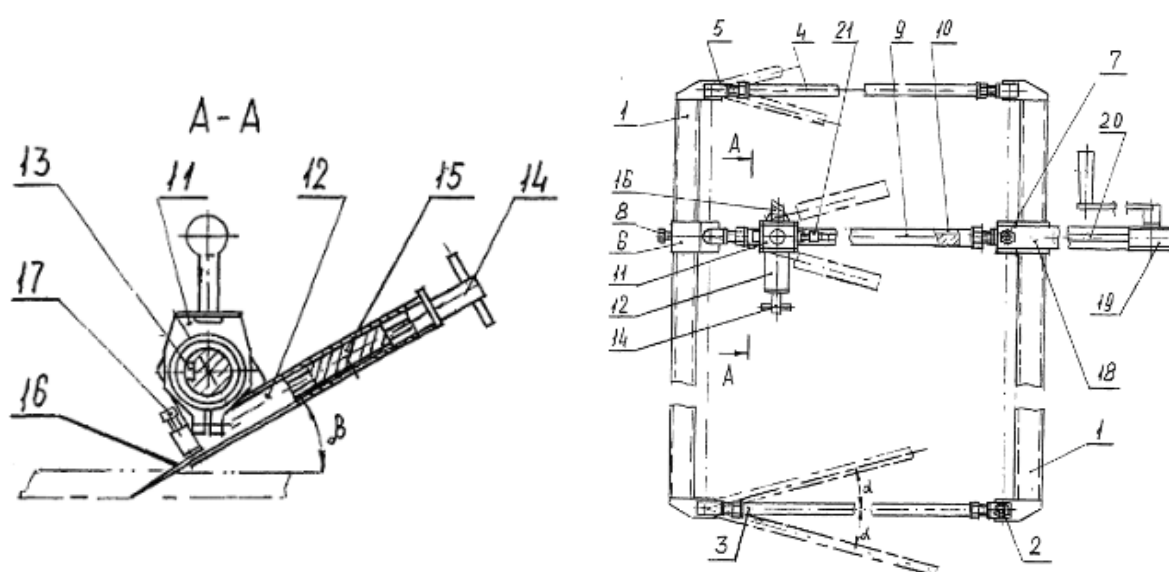


Рисунок 2 — Устройства для профильной обработки концов ленты с трансформируемой рамой

Таким образом, для изготовления качественных зубчатых соединений прежде всего необходимо разработать устройство для механизированной разделки концов лент, свободное от отмеченных выше недостатков.

Цель работы — синтез устройства для обработки концов резинотканевых конвейерных лент под зубчатый стык, содержащий прижимные элементы, обеспечивающие заданную форму и необходимую точность геометрических параметров зубьев.

Задачи исследования:

- формирование структуры устройства для обработки соединяемых концов ленты под зубчатый стык;

- разработка узла фиксации концов конвейерной ленты в устройстве обработки концов ленты, предотвращающего деформации и смещения зубьев при их нарезании.

Объект исследования — конструкция устройства для обработки концов резинотканевых конвейерных лент под зубчатый стык.

Предмет исследования — узел фиксации конца конвейерной ленты с прижимными элементами.

Методика исследования — анализ известных конструктивных решений при создании устройств для разделки концов

ленты под стык и синтез нового устройства, отвечающего поставленной цели.

Изложение материала. Разработано устройство для разделки концов резинотканевых лент под стыковку (рис. 3), содержащее узел резания 1, узел фиксации 3, винты 4 крепления узла резания 1 к узлу фиксации 3. Узел 3 может иметь самостоятельное значение при ручной разделке концов ленты.

Узел резания 1 концов ленты 2 отличается от аналогичного узла, применяемого в рассмотренном выше устройстве с трансформируемой рамой [9], телескопической направляющей для каретки с режущим инструментом.

Узел резания 1 (рис. 4) содержит раму 5 с двумя поперечными относительно оси устройства коробчатыми направляющими для продольной телескопической балки, состоящей из внешнего цилиндра 8, имеющего по всей длине с боковых сторон лыски, а сверху — паз, и внутреннего выдвижного цилиндра 9, входящего во внешний цилиндр 8. Цилиндры 8 и 9 своими внешними концами шарнирно соединены с ползунами 6, расположенными на направляющих рамы 5. Ползуны 6 в нужном положении закрепляются на раме 5 винтами-фиксаторами 10, а их движение ограничивается винтами 11.

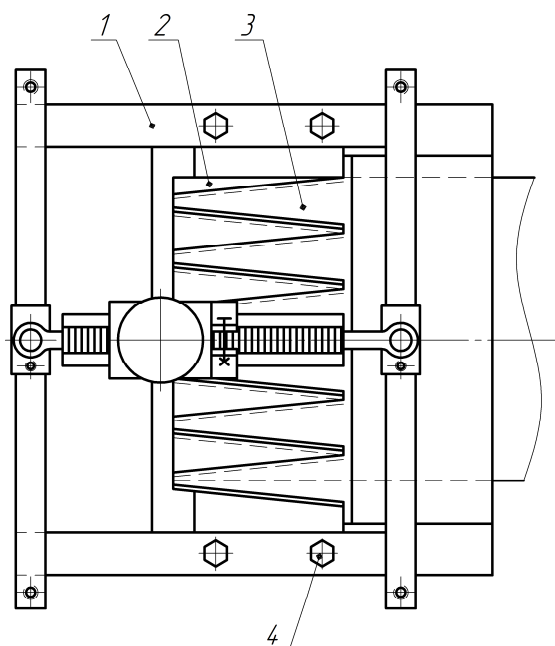


Рисунок 3 — Устройство для разделки концов резиноканевых лент под зубчатый стык

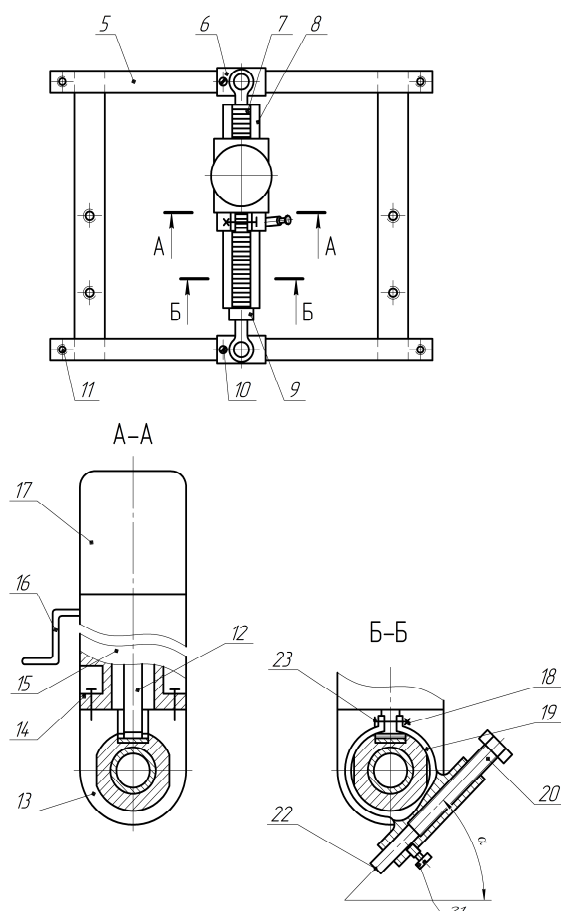


Рисунок 4 — Узел резания ленты при разделке ее конца под зубчатый стык

На внешнем цилиндре 8 сверху в пазе закреплена рейка 7, на него же надета каретка 13. На каретке 13 со стороны рейки 7 выполнена продольная проточка, над которой винтами 14 закреплен редуктор 15, приводное колесо 12 которого через проточку в каретке 13 входит в зацепление с рейкой 7 и приводится в движение съемной рукояткой 16 или от электродвигателя 17. Сбоку на каретку 13 надевается держатель ножа 19, который вместе с кареткой 13 охватывает внешний цилиндр 8. На каретке 13 держатель ножа 19 крепится стяжным болтом 23 с гайкой 18. В держатель ножа 19 вставлены нож 22, винт 20 подачи ножа 22, винт 21, являющийся фиксатором ножа 22.

Основная идея создания устройства заключается в применении узла фиксации ленты с прижимным копиром-трафаретом.

Узел фиксации 3 ленты 2 (рис. 3) содержит (см. рис. 5): две соединенные снизу поперечными уголками 31 продольные рамные боковины 30 с продольным пазом на боковой поверхности, обращенной внутрь устройства 3; нижний копир-трафарет 28 (в дальнейшем — просто нижний копир) с рабочим контуром в виде зубьев, повторяющих заданный контур зубьев на нижней поверхности ленты 2, с фасками, угол которых равен острому углу α между боковыми гранями зубьев, нарезаемых на концах ленты 2, и ее поверхностью; верхний копир-трафарет 26 (в дальнейшем — просто верхний копир), аналогичный нижнему копиру 28, но отвечающий заданному контуру зубьев на верхней поверхности ленты 2; опорно-ограничительную планку 26; прижимной винт 27; планки 24 и 29, обеспечивающие смещение оси устройства от оси ленты в поперечном направлении на четверть шага зубьев; корректирующие планки 32 и 33, обеспечивающие при заданной толщине ленты 2 при нарезании граней зуба ленты 2 расположение поверхностей фасок соответствующих зубьев на копиях 25 и 28 в одной плоскости.

Монтаж устройства и разделка конца ленты под стык осуществляются в следующей последовательности.

В продольные пазы боковин 30 узла фиксации 3 до упора устанавливается нижний копир 28. С двух сторон копира 28 укладываются корректирующие планки 33 и 32.

На нижний копир нижней (нерабочей) поверхностью укладывается лента 2 так, чтобы ее кромка совпадала с концами зубьев этого копира 28, а для ее поперечного смещения на четверть шага зуба с двух сторон укладываются планки 24 и 29.

Одновременно опорно-ограничительная планка 26 служит ограничителем хода режущего инструмента, предотвращающим резание режущим инструментом копиров. При нарезании зубьев копиры 25 и 28 служат направляющими для ножа 22. В зависимости от типа копиров могут быть обеспечены те или иные геометрические параметры и форма поперечного сечения зуба, например, в виде трапеции или параллелограмма. При небольшой толщине ленты 2 резание может осуществляться вручную, причем сразу по всей толщине, начиная со стороны кромки ленты 2, за один проход режущего инструмента.

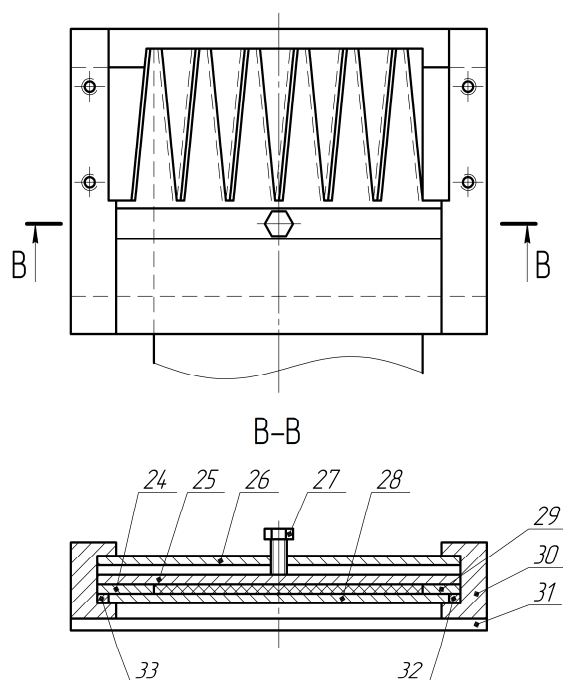


Рисунок 5 — Узел фиксации ленты при разделке ее конца под зубчатый стык

В пазы на ленту 2 также до упора укладывается верхний копир 25. На верхний копир 25 на заданном расстоянии от вершин зубьев копира укладывается опорно-ограничительная планка 26, в нее ввинчивается прижимной винт 27, сжимающий пакет из копиров 25, 28 и ленты 2. Таким образом, лента зажимается между копиями 25 и 28 с силой, достаточной для удержания зубьев ленты 2 при резании за счет сил трения, возникающих между лентой и копиями 25, 28.

Для механической разделки конца ленты к узлу фиксации 3 винтами 4 присоединяется рама 5 узла резания 1. В исходном положении фиксаторы 10 ползунов 6, стяжной болт 23 держателя ножа 19 и фиксатор 21 ножа 22 отпущены. Перед нарезанием первой грани зуба одновременно устанавливаются ползуны 6 так, чтобы каретка 13 располагалась вблизи нарезаемой грани и обеспечивала резание, параллельное этой грани, также каретка 13 с держателем ножа 19 устанавливается перед кромкой ленты 2. При этом держатель ножа 19 поворачивается, а нож 22 выдвигается до его касания боковых поверхностей верхнего и нижнего копиров 25 и 28. После этого ползуны 6, держатель ножа 19 и нож 22 фиксируются соответственно фиксаторами 10, стяжным болтом 23 и винтом 21.

Последующее резание по копиям 25 и 28 осуществляется приводом вручную с применением съемной рукоятки 16 или посредством электродвигателя 17 через редуктор 15, начиная от кромки ленты. При этом образуется боковая поверхность зуба, наклоненная к поверхности ленты 2 на заданный угол α . Для нарезки следующей параллельной грани производится переустановка ползунов 6, после чего цикл повторяется. Нож 22 при резании должен прилегать плоской стороной к копиям 25 и 28. Поэтому в случае нарезания противоположных граней зуба нож заменяется или, если он обоюдоострый (сечение ножа имеет форму трапеции), переустанавливается.

Разделка конца присоединяемой ленты осуществляется этим же устройством аналогично, причем при его перестановке верхний и нижний копиры 25 и 28 меняются местами и переворачиваются. При перестановке устройства его продольная ось оказывается отстоящей от оси ленты на половину шага зубьев, что при сборке стыка обеспечивает совпадение зубьев одного конца ленты с впадинами другого конца.

В обоих случаях поперечные недорезы во впадинах зубьев устраняются вручную специальным ножом штыкового типа.

Устройство является достаточно простым в эксплуатации и изготовлении, имеет сравнительно небольшой вес, не требует для установки специального щита, может работать как от электрического, так и от ручного привода, что позволяет применять его во взрывоопасных горных выработках или помещениях. Его работоспособность и рациональные геометрические параметры зубьев ленты обоснованы расчетами и мо-

делированием. Сокращение числа и длительности операций при изготовлении стыка позволяет снизить трудоемкость процесса стыковки.

Выводы и направление дальнейших исследований. Техническим результатом разработанного устройства является:

1) обеспечение заданных геометрических параметров зубчатого профиля соединяемых концов ленты и, таким образом, повсеместного соблюдения заданного технологического зазора между соединяемыми поверхностями, заполняемого связующим вулканизационным материалом, при изготовлении стыка, что приводит к повышению его прочности;

2) нарезание грани зуба за один проход ножа;

3) снижение трудоемкости процесса изготовления стыка.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку режимов резания зубьев режущим инструментом.

Список источников

1. Инструкция по выбору, монтажу и эксплуатации конвейерных лент / Г. З. Векслер, О. Г. Карбасов, В. М. Костин, Ю. С. Мельников ; под ред. И. И. Леонова, Л. Б. Томчина. М. : Химия, 1971. 35 с.
2. Прушак В. Я., Миранович О. Л. Оценка эффективности соединений конвейерных лент // Вестник БНТУ. 2006. № 4. С. 18–22. EDN SCXVRX
3. Кузьменко В. И., Доброногова В. Ю. Определение напряжений в элементах соединений конвейерных лент с тканевым каркасом // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2005. Вып. 20. С. 92–98.
4. Кузьменко В. И. Состояние вопроса и проблемы эксплуатации конвейерных лент // Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке : сб. науч. тр., посвящ. 45-летию ДГМИ. Алчевск : ДГМИ, 2002. С. 141–150.
5. Способ соединения конвейерных лент : а. с. 1548075 СССР / В. И. Кузьменко, Е. Х. Завгородний, А. В. Переселков, Т. Н. Бородин ; № 4451867/31-05 ; заявл. 30.06.88 ; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9. 2 с.
6. Способ соединения конвейерных лент : пат. 41552А Украина / В. И. Кузьменко, В. Ю. Доброногова ; № 2000020684 ; заявл. 08.02.2000 ; опубл. 17.09.2001, Бюл. № 8.
7. Способ соединения конвейерных лент : пат. 51459А Украина / В. И. Кузьменко, В. Ю. Доброногова ; № 2002042729 ; заявл. 05.04.2002 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
8. Стенд для исследования элементов конвейерной ленты : пат. 26882 Украина / В. И. Кузьменко, В. А. Сурело, В. Ю. Доброногова ; № 200705885 ; заявл. 29.05.2007 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.
9. Устройство для обработки концов конвейерных лент : пат. на полезную модель 194452 Украина / В. И. Кузьменко, В. Ю. Доброногова, В. А. Сурело ; № 200607068 ; заявл. 26.06.2006 ; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. зав. каф. общинженерных дисциплин
Стахановского инженерно-педагогического института (филиала)
ЛГУ им. В. Даля Сафоновым В. И.,
к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А.*

Статья поступила в редакцию 05.06.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. горных энергомеханических систем
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Доброногова Виктория Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. горных энергомеханических систем
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: kafedra.gemio@dstu.education

Korneev S. V., *Dobronogova V. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia,
*e-mail: kafedra.gemio@dstu.education)

NEW DEVICE FOR PROCESSING THE ENDS OF FABRIC-PLY BELTS IN A TOOTHED JOINT

For processing the ends of fabric-ply belts in a toothed joint, a device with a belt fixation unit is proposed, containing a clamping element in the form of a stencil-copier, which follows the shape of teeth on the belt along the contour and serves as a guide for a cutting tool when cutting teeth. The device provides the necessary accuracy of teeth manufacturing, which is one of the conditions for achieving high joint strength.

Key words: fabric-ply belt, toothed joint, teeth geometrics, device for cutting the ends of belt, fixation unit, stencil-copier.

References

1. Veksler G. Z., Karbasov O. G., Kostin V. M., Mel'nikov Yu. S. Instructions for selection, installation and operation of conveyor belts [Instrukciya po vyboru, montazhu i ekspluatatsii konvejnyh lent]. Eds. Leonova I. I., Tomchina L. B. M. : Himiya, 1971. 35 p.
2. Prushchak V. Ya., Miranovich O. L. Evaluation of conveyor belt joint efficiency [Ocenka effektivnosti soedinenij konvejnyh lent]. Repository BNTU. 2006. No. 4. Pp. 18–22. EDN SCXVRX
3. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. Determination of stresses in elements of joints of conveyor belts with fabric frame [Opredelenie napryazhenij v elementah soedinenij konvejnyh lent s tkanevym karkasom]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. 2005. Iss. 20. Pp. 92–98.
4. Kuz'menko V. I. State of the art and problems of conveyor belts operation [Sostoyanie voprosa i problemy ekspluatatsii konvejnyh lent]. Perspektivy razvitiya ugol'noj promyshlennosti v XXI veke : sb. nauch. tr., posvyashch 45-letiyu DGMI. Alchevsk : DGMI, 2002. Pp. 141–150.
5. Kuz'menko V. I., Zavgorodnij E. H., Pereselkov A. V., Borodina T. N. Method of connecting conveyor belts : a. s. 1548075 USSR ; No. 4451867/31-05 ; submitted 30.06.88 ; published 07.03.90, Bulletin No. 9. 2 p.
6. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. Method of connecting conveyor belts : Patent 41552A Ukraine ; No. 2000020684 ; submitted 08.02.2000 ; published 17.09.2001, Bulletin No. 8.
7. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. Method of connecting conveyor belts : Patent 51459A Ukraine ; No. 2002042729 ; submitted 05.04.2002 ; published 15.11.2002, Bulletin No. 11.
8. Kuz'menko V. I., Surelo V. A., Dobronogova V. Yu. Bench for research of conveyor belt elements : Patent 26882 Ukraine ; No. 200705885 ; submitted 29.05.2007 ; published 10.10.2007, Bulletin No. 16.
9. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu., Surelo V. A. Device for processing conveyor belt ends : Patent 194452 UA for utility model ; No. 200607068 ; submitted 26.06.2006 ; published 15.12.2006, Bulletin No. 12.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korneev Sergey Vasiliyevich, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Mining Energy-mechanical Systems
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Dobronogova Viktoriya Yuriyevna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Mining Energy-mechanical Systems
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: kafedra.gemio@dstu.edu

МЕТАЛУРГИЯ

METALLURGY

УДК 669.187.2

EDN: JMUNFJ

Кухарев А. Л.*Донбасский государственный технический университет**E-mail: alex.kuharev@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ РАСПЛАВА

Приведена математическая модель и результаты численных исследований процесса перемешивания расплава электровихревыми течениями в установке с осесимметричными электродами с использованием метода переноса пассивной примеси. При оценке качества перемешивания проанализировано изменение во времени значений пяти критериев, характеризующих неоднородность расплава, построенных на основе подходов математической статистики. Показано, что при принятых условиях моделирования наиболее удобно использовать критерий, представляющий собой нормированное среднее линейное отклонение концентрации примеси. При моделировании оценена интенсивность турбулентной диффузии по сравнению с конвективным переносом примеси и молекулярной диффузией. Адекватность гидродинамических расчетов подтверждена путем сопоставления модельного поля скорости с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *расплав, перемешивание, электровихревое течение, примесь, моделирование.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В дуговых сталеплавильных и рудовосстановительных печах протекание электрического тока через расплав приводит к возникновению электровихревых течений (ЭВТ), которые могут способствовать гомогенизации химического состава и температуры в объеме плавильной ванны [1].

В жидких металлах скорость гомогенизации определяется в основном конвективным переносом и турбулентной диффузией, а молекулярная диффузия не оказывает существенного влияния на перемешивание [2, 3].

Для исследования процесса перемешивания в работах [2, 3] используется метод переноса пассивной примеси. Этот метод заключается в том, что в исследуемый объём вводится примесь с такими же физическими свойствами, что и основное вещество. По изменению концентрации примеси можно делать выводы об эффективности процесса перемешивания.

Перенос примеси в расплаве различных технологических установок численно изучался в работах [2–7], при этом некоторые авторы проводили расчеты в двухмерной

постановке [2, 3], что негативно сказывается на учете качественных характеристик турбулентных течений.

Для оценки качества перемешивания используются различные критерии, характеризующие неоднородность (гетерогенность) расплава. В основном эти критерии строятся на основе подходов математической статистики, т. е. представляют собой различные показатели вариации концентрации примеси [2–7]. С увеличением времени моделирования градиенты концентрации примеси уменьшаются. В большинстве исследований считается, что расплав является перемешанным, когда степень неоднородности уменьшается до 5 % [8].

Постановка задачи. В работе [2] исследован отдельно механизм молекулярной диффузии в ванне расплава установки с осесимметричными электродами при ЭВТ. Описание данной установки будет приведено далее. Показано, что при времени перемешивания 10^4 с степень неоднородности расплава еще достаточно высока (более 60 %).

Отметим, что в анализируемых работах, посвященных численным исследованиям переноса примеси [2–7], оценка интенсив-

ности турбулентной диффузии по сравнению с интенсивностью конвективного переноса примеси не проводилась.

В связи с этим **целью** настоящей работы является моделирование процессов перемешивания в ванне расплава и анализ основных показателей качества перемешивания.

Объект исследования — токопроводящие расплавы в технологических установках.

Предмет исследования — процессы перемешивания расплава при электровихревых течениях.

Задачи исследования:

- разработка математической модели переноса примеси с учетом конвективного переноса, молекулярной и турбулентной диффузии;
- анализ структуры электровихревых течений и процессов перемешивания расплава;
- анализ критериев оценки качества перемешивания расплава и роли турбулентной диффузии.

Методика исследования. В качестве объекта моделирования была принята установка, разработанная Объединенным институтом высоких температур РАН [9]. Ванна расплава, заполненная эвтектическим сплавом «индий — галлий — олово» с содержанием по весу In — 67 %, Ga — 20,5 %, Sn — 12,5 % (температура плавления сплава +10,5 °C), представляла собой медный полусферический контейнер диаметром 188 мм. В центре свободной поверхности жидкого металла размещался первый электрод, представляющий собой медный стержень с полусферическим торцом, диаметр которого составлял 5 мм. Электрод погружался в расплав на глубину своего радиуса. Второй электрод располагался в нижней части медного контейнера. Для электропитания установки использовался источник постоянного тока. Выбор данной установки в качестве объекта моделирования обусловлен достаточно большим объемом экспериментальных данных скорости течений, что упрощает процедуру верификации модели. Кроме того, экспе-

риментально подтвержден турбулентный характер течений ($Re \approx 3 \cdot 10^4$) [9]. В целом профиль ванны рассматриваемой установки подобен профилю ванны дуговых сталеплавильных печей постоянного тока [1].

Поле скоростей рассчитывалось на основе стационарного моделирования с использованием модели магнитогидродинамических процессов, детально описанной нами в [1, 10]. При расчете переноса пассивной примеси во временной области поле скоростей оставалось постоянным.

Изложение материала. Геометрическая модель исследуемой установки представлена на рисунке 1. В объем ванны на глубину 35 мм вдоль ее оси введена дополнительная область в виде куба со стороной 10 мм, заполненная примесью.

Расчетная сетка для исследуемой области составляла более 9 млн тетрагональных элементов, причем дополнительное сгущение сетки было выполнено в области верхнего электрода. Моделирование проводилось при следующих свойствах сплава $In-Ga-Sn$: $\rho = 6482 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0,00209 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma = 3300000 \text{ См/м}$ [2].

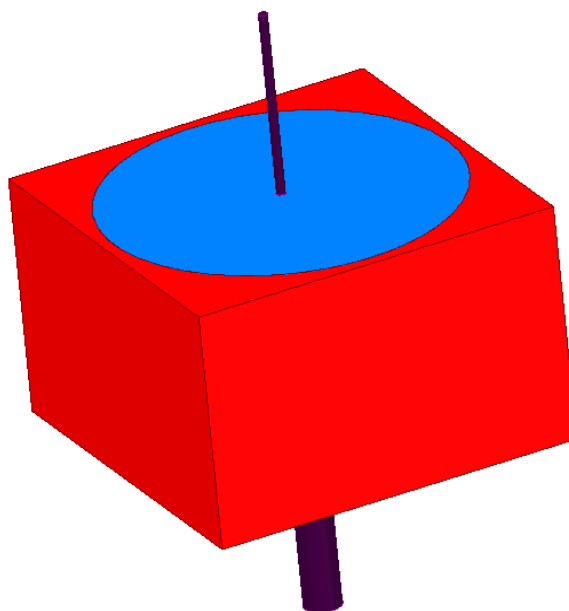


Рисунок 1 — Геометрическая модель исследуемой установки

Результаты расчета гидродинамического поля в пакете Star CCM+, а также сопоставление расчетных и экспериментальных данных при токе в электродах 250 А приведено на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, а, ЭВТ в такой осесимметричной системе имеет форму торoidalного вихря, при этом максимальная скорость в струе расплава достигает ~0,18 м/с. Отметим, что среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5 %, что свидетельствует об адекватности используемой модели.

Для моделирования процесса перемешивания примеси при ЭВТ система уравнений магнитной гидродинамики с учетом турбулентности [1, 10] дополняется уравнением переноса пассивной примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) C = (D + D_T) \nabla^2 C, \quad (1)$$

где C — концентрация примеси; $\vec{v}$ — скорость движения расплава, м/с; D — коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; Па·с; D_T — коэффициент турбулентной диффузии, м²/с, который определялся по формуле

$$D_T = \frac{\eta_T}{\rho \cdot Sc_T}, \quad (2)$$

где η_T — коэффициент турбулентной вязкости Па·с; ρ — плотность, кг/м³; Sc_T — турбулентное число Шмидта.

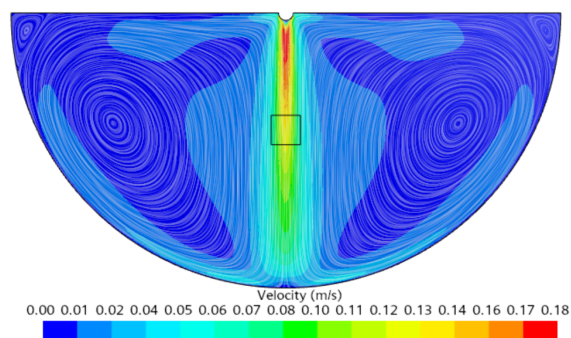
Начальное распределение примеси считается равномерным и равным для дополнительной области C_0 и нулевым для остальной части ванны:

$$\begin{aligned} C_{\partial.o.}|_{t=0} &= C_0(x, y, z), \\ C_{\partial}|_{t=0} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

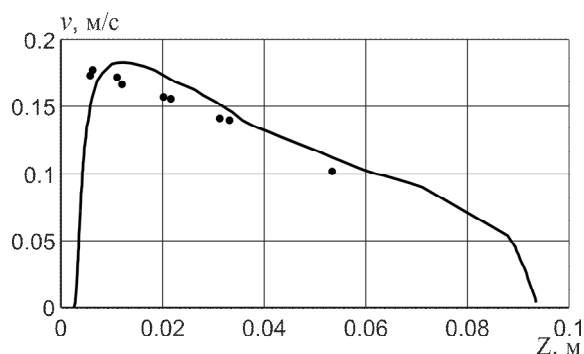
На всех внешних границах использовалось граничное условие второго рода, характеризующее отсутствие потока массы через границу:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \hat{n}} \right|_{\partial} = 0, \quad (4)$$

где $\hat{n}$ — внешняя нормаль на соответствующей поверхности.



а



б

— расчет; • эксперимент;

Рисунок 2 — График распределения скорости ЭВТ (а — в сечении ванны; б — вдоль оси ванны)

Моделирование процесса перемешивания проводилось при следующих параметрах: $C_0 = 10^4$ о. е., $D = 5 \cdot 10^{-9}$ м²/с [2], $Sc_T = 0,9$ с использованием алгоритма PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators), который показал высокую эффективность в нестационарных задачах. Шаг по времени составлял $\Delta t = 10^{-3}$ с, при этом число Куранта $Co \approx 0,1$.

Распределение концентрации примеси в относительных единицах в различные моменты времени представлено на рисунке 3.

В начальный момент времени примесь находится только в дополнительной области (рис. 3, а). Примерно через 1 с примесь переносится течением в нижнюю часть ванны, разделяясь на две зоны (рис. 3, б), при этом максимальная концентрация примеси уменьшается более чем в 5 раз.

Далее примесь медленно растекается к периферии, поднимаясь вдоль стенок, а вблизи поверхности направляется к оси ванны, где вновь вовлекается ЭВТ вглубь расплава. При $t \approx 60$ с (рис. 3, *e*) значения концентрации уменьшаются приблизительно на четыре порядка от начальной, при этом состояние расплава близко к полному перемешиванию. Минимальные

значения концентрации наблюдаются вблизи боковых стенок ванны. С момента $t \approx 40$ с и далее четко наблюдается некоторая несимметрия распределения концентрации примеси относительно оси ванны.

Далее рассмотрим особенности применения в нашей задаче критериев, характеризующих неоднородность расплава.

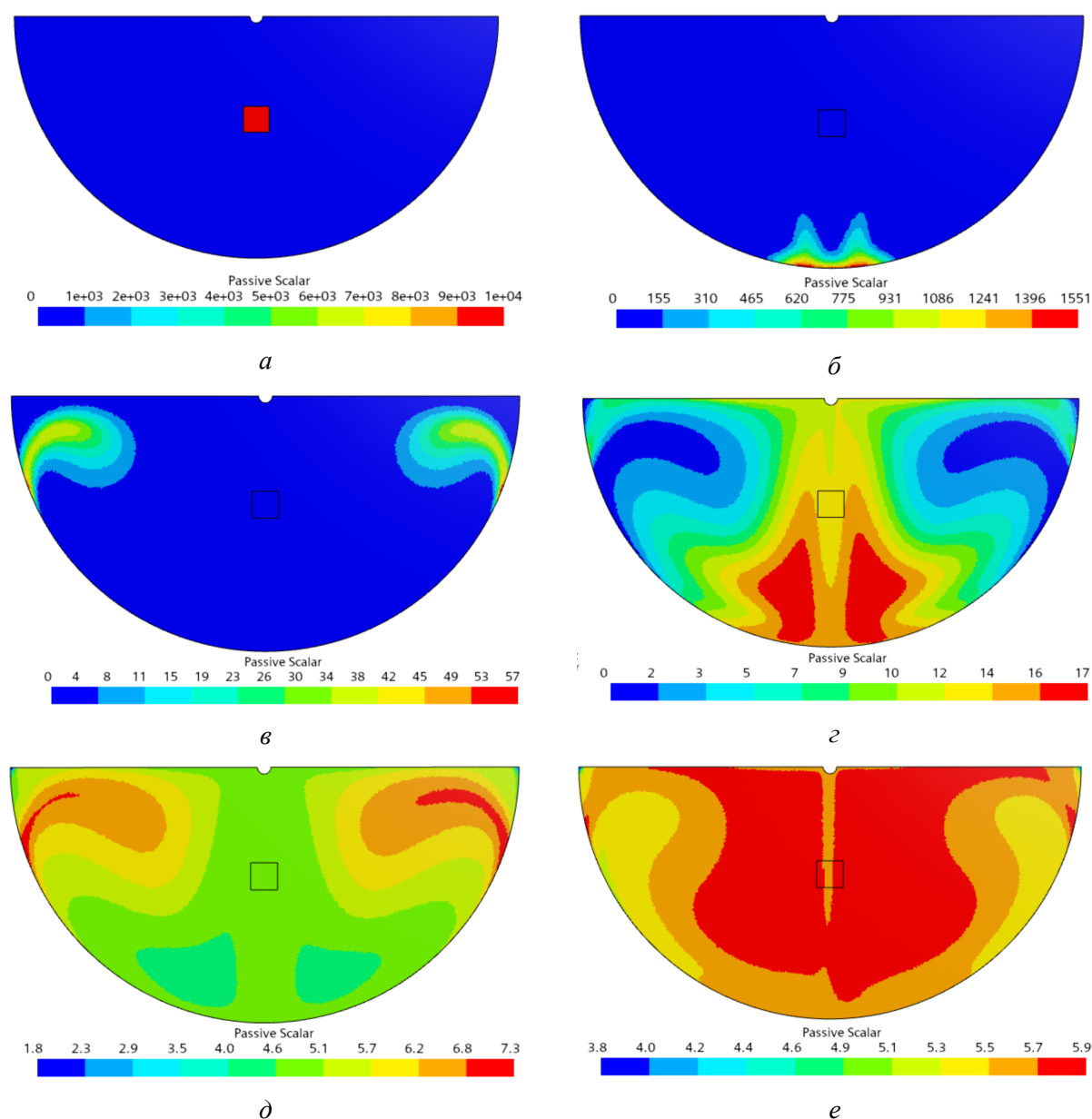


Рисунок 3 — Графики распределения концентрации примеси в сечении ванны в различные моменты времени
(*a* — $t=0$ с; *б* — $t=1$ с; *в* — $t=8$ с; *г* — $t=16$ с; *д* — $t=40$ с; *е* — $t=60$ с)

В работе [3] предложено использовать критерий, представляющий собой среднеквадратичное отклонение концентрации примеси во всех ячейках расчетной области от конечной концентрации при полном перемешивании:

$$K_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C}^*)^2 V_i}{V}}, \quad (5)$$

где C_i — концентрация примеси в i -й ячейке; $\bar{C}^* = \frac{1}{V} \int C_i^* dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N C_i^* V_i$ — среднее значение концентрации примеси по объему ванны при полном перемешивании; V_i — объем i -й ячейки, м³; V — полный объем, м³; N — количество ячеек в расчетной области.

В работе [4] использовался критерий, представляющий собой коэффициент осцилляции:

$$K_2 = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\bar{C}^*}, \quad (6)$$

где $C_{\max}$, $C_{\min}$ — соответственно одномоментные максимальное и минимальное значения концентрации примеси в объеме ванны.

Отметим, что для обеспечения наглядности и объективности отображения графиков распределения примеси степень неоднородности расплава выражают в долях единицы, тогда при принятых условиях моделирования критерии K_1 и K_2 необходимо нормировать. В работе [3] использовалась нормировка критерия K_1 по максимуму. Также недостатками критериев K_1 и K_2 является использование значений концентрации примеси при полном перемешивании $\bar{C}^*$, что усложняет анализ результатов моделирования.

В работе [11] использовался критерий, представляющий собой коэффициент вариации:

$$K_3 = \frac{\sigma}{\bar{C}}, \quad (7)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2 V_i}{V}}$ — среднеквадратическое отклонение концентрации примеси; $\bar{C} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N C_i V_i$ — среднее значение концентрации примеси по объему ванны в текущий момент времени.

В работе [2] использовался критерий, предложенный П. Данквертсом, являющийся среднеквадратичным отклонением концентрации примеси с более сложным нормировочным множителем:

$$K_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2 V_i}{\bar{C} (C_{\max}|_{t=0} - \bar{C}) V}. \quad (8)$$

В работе [12] применялся критерий, представляющий собой нормированное среднее линейное отклонение:

$$K_5 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C}) V_i}{2 \bar{C} V}. \quad (9)$$

В диссертации [7] отмечается, что работы по созданию оптимального критерия оценки качества перемешивания все еще продолжаются. Разрабатываются критерии, основанные на базе анализа энтропии, тензора скоростей деформации, тензора завихренности и других параметров.

На рисунке 4 приведены зависимости значений рассмотренных критериев от времени. На графике критерии K_1 и K_2 нормированы по максимуму.

Из рисунка 4 следует, что скорость снижения критериев K_1 , K_2 и K_4 очень высокая. Уже при $t = 8$ с значения этих критериев меньше 0,1, что не соответствует рисунку 3 и неточно отражает особенности процесса перемешивания. Аналогичная скорость снижения критерия K_2 зафиксирована и в работе [2]. При $t \leq 12,35$ с значения критерия K_3 больше 1, а в остальном диапазоне $K_3 < 1$. При $t = 60$ с $K_3 \approx 0,03$. Т. е. изменение критерия K_3 во времени

также не в полной мере отражает моделируемые процессы перемешивания.

Наиболее приемлемым является критерий K_5 . Его график изменения во времени находится между графиками критериев K_1 , K_2 , K_4 и графиком критерия K_3 . Значения критерия K_5 в достаточной степени соответствуют наблюдаемым картинам распределения примеси в ванне. Отметим, что степень гомогенности расплава K_2 связана с коэффициентом неоднородности K следующим выражением [12]:

$$K_2 = 1 - K, \quad (10)$$

где K далее будем считать равным критерию K_5 (9).

Для данного моделирования можно считать, что время перемешивания (при достижении $K=0,05$) составляет ~42 с.

Далее рассмотрим влияние турбулентной диффузии на процессы перемешивания. Из уравнения (2) следует, что турбулентная диффузия существенно зависит от коэффициента турбулентной вязкости η_t , график распределения которого приведен на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5, имеются четко выраженные максимумы коэффициента турбулентной вязкости в нижней части ванны и вблизи центров вихрей (см. рис. 2, а). При этом максимальные значения турбулентной вязкости превышают молекулярную вязкость более чем в 50 раз.

Нами проведено дополнительное моделирование переноса пассивной примеси при коэффициенте турбулентной диффузии, равном нулю, т. е. $D_t=0$ в уравнении 1. В этом случае в переносе примеси участвуют только конвективный перенос и молекулярная диффузия. В качестве примера на рисунке 6 приведен график распределения концентрации примеси при $t=16$ с.

Из рисунка 6 видно, что без учета турбулентной диффузии перенос примеси происходит в виде достаточно узких областей вдоль линий тока ЭВТ, при этом неоднородность расплава достаточно высока ($K=0,83$).

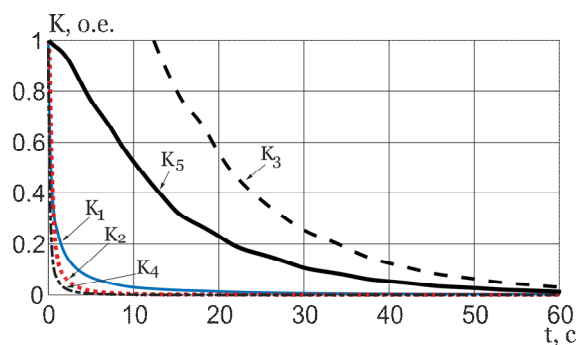


Рисунок 4 — График зависимостей от времени критериев неоднородности расплава

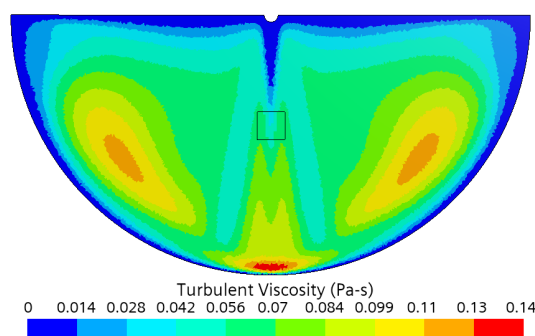


Рисунок 5 — График распределения коэффициента турбулентной вязкости в сечении ванны

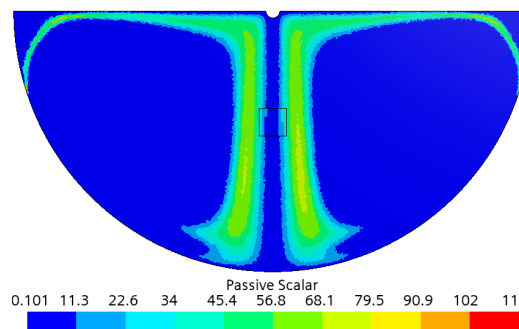


Рисунок 6 — График распределения концентрации примеси в сечении ванны без учета турбулентной диффузии при $t=16$ с.

С учетом турбулентной диффузии (рис. 3, г) коэффициент неоднородности расплава значительно ниже ($K=0,3$). Таким образом, турбулентная диффузия существенно расширяет области распределения примеси, при этом степень гомогенности расплава, рассчитанная по формуле (10), увеличивается более чем в 4 раза.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1 В результате проведенных исследований методом математического моделирования уточнены закономерности переноса пассивной примеси в ванне расплава установки с осесимметричными электродами.

2. В результате количественного анализа пяти критериев неоднородности расплава показано, что при принятых условиях моделирования критерии, построенные на основе среднеквадратического отклонения и коэффициента осцилляции, неточно отражают процессы перемешивания расплава за счет большой скорости снижения их

значений во времени, при этом наиболее адекватным является критерий, построенный на основе нормированного среднего линейного отклонения.

3. Оценена роль турбулентной диффузии, которая существенно расширяет области распределения примеси в расплаве и более чем в 4 раза увеличивает степень его однородности.

4. Приведенная методика может применяться при исследовании процессов гомогенизации и рафинирования расплавов в плавильных агрегатах и рудовосстановительных печах, а также в агрегатах для внепечной обработки и разливки.

Список источников

1. Кухарев А. Л. Электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы в многоэлектродных печных установках : монография. Луганск : изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2021. 276 с.
2. Vinogradov D., Teplyakov I., Ivochkin Yu. Stirring of liquid metal in electrovortex flow in a hemispherical volume under the influence of external magnetic field // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1809. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1809/1/012034. EDN YOMIAX
3. Оборин П. А., Хрипченко С. Ю. Генерация течения жидкого металла и перенос пассивной примеси в прямоугольной полости беззатухающим магнитным полем // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. № 2. С. 207–213. DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.2.24. EDN NPRBWX
4. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока / С. А. Смирнов [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. Вып. 1. С. 74–83. EDN KZYGZT
5. The impact of flow induced by rotating magnetic fields on processes in a molten conductive medium / R. I. Khalilov, A. D. Mamykin, R. S. Okatev, I. V. Kolesnichenko // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2023. № 3. Р. 6–16. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.006-016. EDN HHNSPI
6. Мелешко В. В., Краснополянская Т. С. Смешивание вязких жидкостей // *Нелинейная динамика*. 2005. Т. 1. № 1. С. 69–109. EDN KBXBEP
7. Сухарев Т. Ю. Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания : дис. ... канд. техн. наук. М. : [б. и.], 2019. 127 с. EDN YZMHQM
8. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy / P. Gajjar [et al.] // *Engineering Science and Technology*. 2019. Vol. 22. № 2. P. 538–547. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.11.010
9. Ивочкин Ю. П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами : дис. ... д-ра техн. наук. М. : [б. и.], 2015. 407 с.
10. Моделирование электромагнитных сил и электровихревых течений в установке «ковшовая печь» / А. Л. Кухарев, М. И. Мокрицкий, С. А. Сбитнев, Т. В. Яковенко // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2024. № 5 (79). С. 49–55. EDN MQVUOE
11. Ottino J. M. *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport*. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 363 p.
12. Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction / H. Weltens [et al.] // *SAE Technical Paper 930780*. 1993. P. 131–151. DOI: 10.4271/930780

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,
начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 21.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кухарев Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированного управления и инновационных технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev A. L. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru)
MODELING OF MIXING PROCESSES IN ELECTRO-VORTEX MELT FLOWS

The article describes a mathematical model and the results of numerical investigations of the melt mixing process by electro-vortex flows in a unit with axisymmetric electrodes, using the passive impurity transfer method. When assessing the quality of mixing, we analyzed the change in time of the values of five criteria characterizing the melt heterogeneity, constructed on the basis of mathematical statistics approaches. It is shown that under the accepted modeling conditions the criterion, representing the normalized mean linear deviation of the impurity concentration, is the most convenient to use. The simulations assess the intensity of turbulent diffusion in comparison with convective impurity transport and molecular diffusion. The adequacy of hydrodynamic calculations was confirmed by comparing the model velocity field with experimental data.

Key words: melt, mixing, electro-vortex flow, impurity, modeling.

References

1. Kukharev A. L. Electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes in multi-electrode furnace units : a monograph [Elektromagnitnye, gidrodinamicheskie i teplovye processy v mnogoelektroodnykh pechnykh ustanovkakh : monografiya]. Lugansk : izd-vo LGU im. V. Dal'ya, 2021. 276 p.
2. Vinogradov D., Teplyakov I., Ivochkin Yu. Stirring of liquid metal in electrovortex flow in a hemispherical volume under the influence of external magnetic field. *Journal of Physics : Conference Series*. 2021. 1809. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1809/1/012034. EDN YOMIAX
3. Oborin P. A., Khripchenko S. Yu. Generation of liquid metal flow and transfer of passive impurity in a rectangular vugh by a running magnetic field [Generaciya techeniya zhidkogo metalla i perenos pas-sivnoj primesi v pryamougol'noj polosti begushchim magnitnym polem]. *Computational Continuum Mechanics*. 2013. Vol. 6. No. 2. Pp. 207–213. DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.2.24. EDN NPRBWX
4. Smirnov S. A. [et al.]. Mathematical modeling of electromagnetic mixing of liquid steel in DC arc furnace [Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnogo peremeshivaniya zhidkoj stali v dugovoj pechi postoyannogo toka]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2010. Vol. 48. Iss. 1. Pp. 74–83. EDN KZYGZ
5. Khalilov R. I., Mamykin A. D., Okatev R. S., Kolesnichenko I. V. The impact of flow induced by rotating magnetic fields on processes in a molten conductive medium. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2023. No. 3. Pp. 6–16. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.006-016. EDN HHNSPI
6. Meleshko V. V., Krasnopol'skaya T. S. Mixing viscous fluids [Smeshivanie vyazkih zhidkostej]. *Nonlinear Dynamics*. 2005. Vol. 1. No.1. Pp. 69–109. EDN KBXBEP
7. Sukharev T. Yu. Numerical modeling of processes of hydrodynamic mixing : thesis ... of PhD in Engineering [Chislennoe modelirovanie processov gidrodinamicheskogo peremeshivaniya : dis. ... kand. tekhn. nauk]. M. : n. p., 2019. 127 p. EDN YZMHQM
8. Gajjar P. [et al.]. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy. *Engineering Science and Technology*. 2019. Vol. 22. No. 2. Pp. 538–547. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.11.010

9. Ivochkin Yu. P. *Investigation of mechanisms of thermohydrodynamic and MHD processes with liquid-metal working bodies : thesis... of Doctor in Techn. Sciences [Issledovanie mekhanizmov termogidrodinamicheskikh i MGD processov s zhidkometallicheskimy rabochimi telami : dis. ... d-ra tekhn. nauk]. M. : n. p., 2015. 407 p.*

10. Kukharev A. L., Mokrickiy M. I., Sbitnev S. A., Yakovenko T. V. *Modeling of electromagnetic forces and electro-vortex flows in the “ladle-furnace” unit [Modelirovanie elektromagnitnyh sil i elektrovihrevykh techeniy v ustanovke “kovsh-pech”]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. No. 5 (79). Pp. 49–55. EDN MQVUOE*

11. Ottino J. M. *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 363 p.*

12. Weltens H. [et al.]. *Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction. SAE Technical Paper 930780. Detroit : Society of Automotive Engineers, 1993. Pp. 131–151. DOI: 10.4271/930780*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kukharev Aleksey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation Management and Innovation Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

УДК 669.018.44

EDN: JTWFY

***Рябичева Л. А., Бабич И. Н., Белозир И. И.**
Луганский государственный университет им. В. Даля
*E-mail: ryabic80@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В статье рассмотрено влияние полугорячей деформации на сфероидизацию цементита и механические свойства стали У8А при сжатии. Установлено, что при сжатии одновременно с динамическим возвратом и рекристаллизацией происходит сфероидизация цементита, зависящая от температуры и степени деформации. С ростом температуры и степени деформации пластинчатый перлит превращается в зернистый с образованием сфер цементита. С ростом температуры до температур фазового превращения происходит увеличение прочности и пластичности вследствие начала разрушения пластинок и образования сфер. В интервале температур фазового превращения свойства прочности сначала уменьшаются, а затем к концу интервала превращений увеличиваются в результате реализации режима деформации аустенита.

Ключевые слова: микроструктура, механические свойства, сфероидизация, пластинчатый перлит, зернистый перлит, выдавливание, деформационно-термический режим.

Стойкость инструмента для обработки металлов давлением зависит от вида материала, применяемого для его изготовления, и режимов обработки. Углеродистая сталь У8А перлитного класса применяется для изготовления режущих инструментов, деталей с высокой твердостью и износостойкостью. Перлит любой углеродистой стали содержит 0,8 % С. Строение перлита таково, что дисперсные частицы цементита равномерно расположены в ферритной основе [1]. В литой, горячекатаной и ковальной стали присутствует пластинчатый перлит, состоящий из пластинок феррита и цементита. В зависимости от режима отжига можно получить структуру либо зернистого, либо пластинчатого перлита. Изменение структуры влечет за собой изменение механических свойств [2].

Армирующие пластинки цементита в составе зерен перлита существенно повышают механические и эксплуатационные характеристики перлитных сталей. Пластичный перлит является нестабильной структурной составляющей. В процессе длительной эксплуатации различных деталей при повышенных рабочих температурах происходит сфероидизация цементита [3].

Нестабильность пластинчатого перлита прежде всего обусловлена большим запасом свободной энергии пластинок, имеющих развитую поверхность. Наименьшей поверхностной энергией обладает шар, поэтому структурные составляющие металла стремятся принять сферическую форму. Сфероидизация существенно ускоряется с повышением температуры. Освобождающиеся при разложении перлита пластинки феррита сливаются с ферритными зёрнами [4].

Целью работы является исследование влияния полугорячей деформации на сфероидизацию цементита и механические свойства стали У8А при сжатии.

Исследования выполняли на эвтектоидной стали У8А перлитного класса. Химический состав стали У8А: 80 % С, 0,21 % Si, 0,27 % Mn, 0,28 % Cr. Изготавливали образцы для деформирования сжатием диаметром 25 мм и высотой 50 мм.

Отжиг выполняли в вакууме 10^{-3} мм рт. ст. при температуре 750 °С, с выдержкой 2 часа, охлаждением с печью до 300 °С, затем на воздухе. Получена структура пластинчатого перлита.

Сжатие в области температур фазовых превращений 680–740 °С выполняли на

испытательной машине Z/D 10/90 максимальным усилием 100 кН при скорости деформации $0,476 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 1 показана установка для сжатия при повышенных температурах. Она состоит из жестко закрепленных и соосных верхнего 1 и нижнего 8 пуансонов, электропечи 7 с нихромовой обмоткой 2 и двух термопар 3, 4.

Температуру в печи и образца контролировали термопарами вольфрам-рений (3, 4) с точностью до $\pm 2^\circ$. Деформирование образца 5 осуществляли верхним (1) и нижним (8) пуансонами, выполненными из стали Р6М5. На их торцах запрессованы вставки 6 из жаропрочного сплава ВК6. Для уменьшения трения между пуансонами и образцом в качестве смазки использовался графит, разбавленный ацетоном. По диаграмме сжатия строили кривые течения в октаэдрических координатах: $\tau_8 - g_8$ [5]. Октаэдрическое напряжение определяли по формуле

$$\tau_8 = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_0 = \text{const},$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения;

σ_0 — предел текучести.

Октаэдрический сдвиг определяли по формуле:

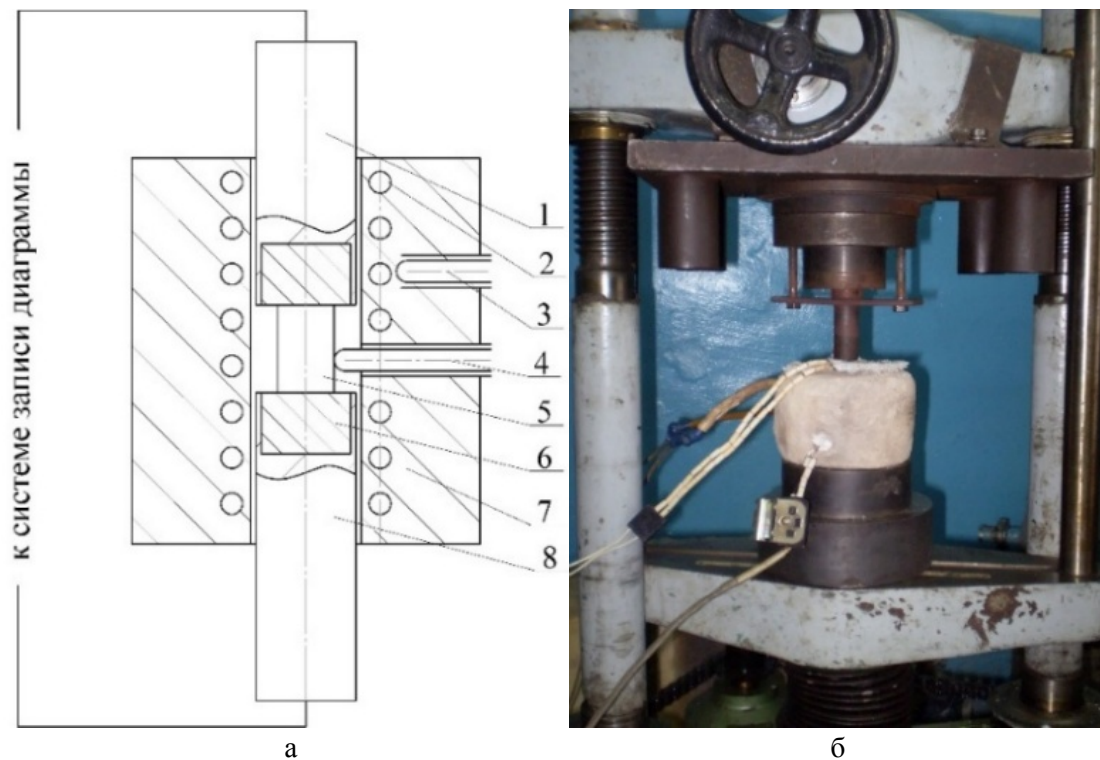
$$g_8 = \sqrt{2} e_i.$$

При обработке диаграмм сжатия учитывали, что

$$e_i = 2 \ln \frac{d_x}{d_0},$$

где d_x, d_0 — начальный диаметр и в каждый данный момент, соответственно.

Микроструктуру изучали на растровом электронном микроскопе РЭММА-102. Механические свойства исследовали путем сжатия образцов, выточенных из деформированных полугорячей деформацией.



а — схема; б — фото

Рисунок 1 — Установка для деформирования при повышенных температурах

На рисунке 2 показана зависимость октаэдрического напряжения от октаэдрического сдвига стали У8А при температурах 680 и 720 °С. Наблюдается резкое возрастание напряжения при степенях деформации 5–10 %, небольшое его изменение до достижения максимального значения при дальнейшем увеличении степени деформации. Выделяются два участка: участок падения напряжения и участок установившегося течения. Установлено, что на начальном участке наряду с упрочнением развиваются процессы динамического разупрочнения, интенсивность которых определяется температурой и степенью деформации [6].

Динамическое разупрочнение происходит за счет процессов возврата, полигонизации, рекристаллизации и сфероидизации цементита. При сжатии происходит перестройка пластинчатой структуры в сфероидизованную [3]. На рисунке 3, а показана микроструктура стали после отжига на пластинчатый перлит, где четко видны его колонии. Следует учитывать, что такую форму цементит принимает, когда аустенит превращается в перлит при температуре фазового превращения. Цементит является очень твердым, но и очень хрупким. После сжатия со степенью деформации 0,32 и температуре 680 °С (рис. 3, б) начинается деформация в виде изгиба и дробление цементитных пластин. С увеличением температуры и степени деформации этот процесс интенсифицируется (рис. 3, в). При температуре 720 °С и степени деформации 1,28 сталь имеет перлитную структуру с изогнутыми сфероиди-

зованными мелкодисперсными частицами цементита с наличием незначительных колоний пластинчатого цементита (рис. 3, г).

Когда цементит из пластинчатого становится сфероидизованным, то механические свойства стали становятся близкими к свойствам матричной фазы. Это дает возможность обрабатывать сталь в интервале фазовых превращений, когда происходит перестройка пластинок цементита.

Выполнены исследования механических свойств стали У8А после полугорячей деформации [7]. Получено, что с возрастанием температуры до 700 °С наблюдается увеличение предела текучести до 950 МПа, что связано с развитием упорядочения субструктуры исходного феррита по механизму динамической полигонизации. Одновременно повышается пластичность деформированного металла: относительная степень деформации по высоте увеличивается до 10 % вследствие развития динамической сфероидизации цементита. Увеличение температуры до 720 °С приводит к падению предела текучести до 650 МПа и пластичности до 7,5 %. При этой температуре усиленно развивается динамическое разупрочнение за счет сфероидизации цементита и полигонизации феррита. Охлаждение такой структуры приводит к большой ее неоднородности, получаемой в результате диффузионного распада. Металл, несмотря на значительную дисперсность микроструктуры вследствие высоких внутренних напряжений между зернами, имеет пониженные прочностные и пластические свойства.

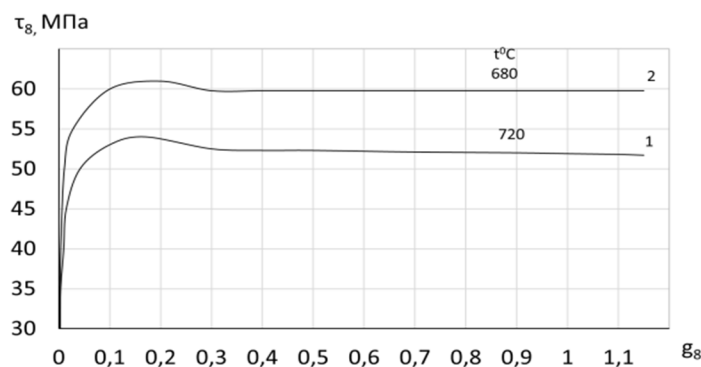
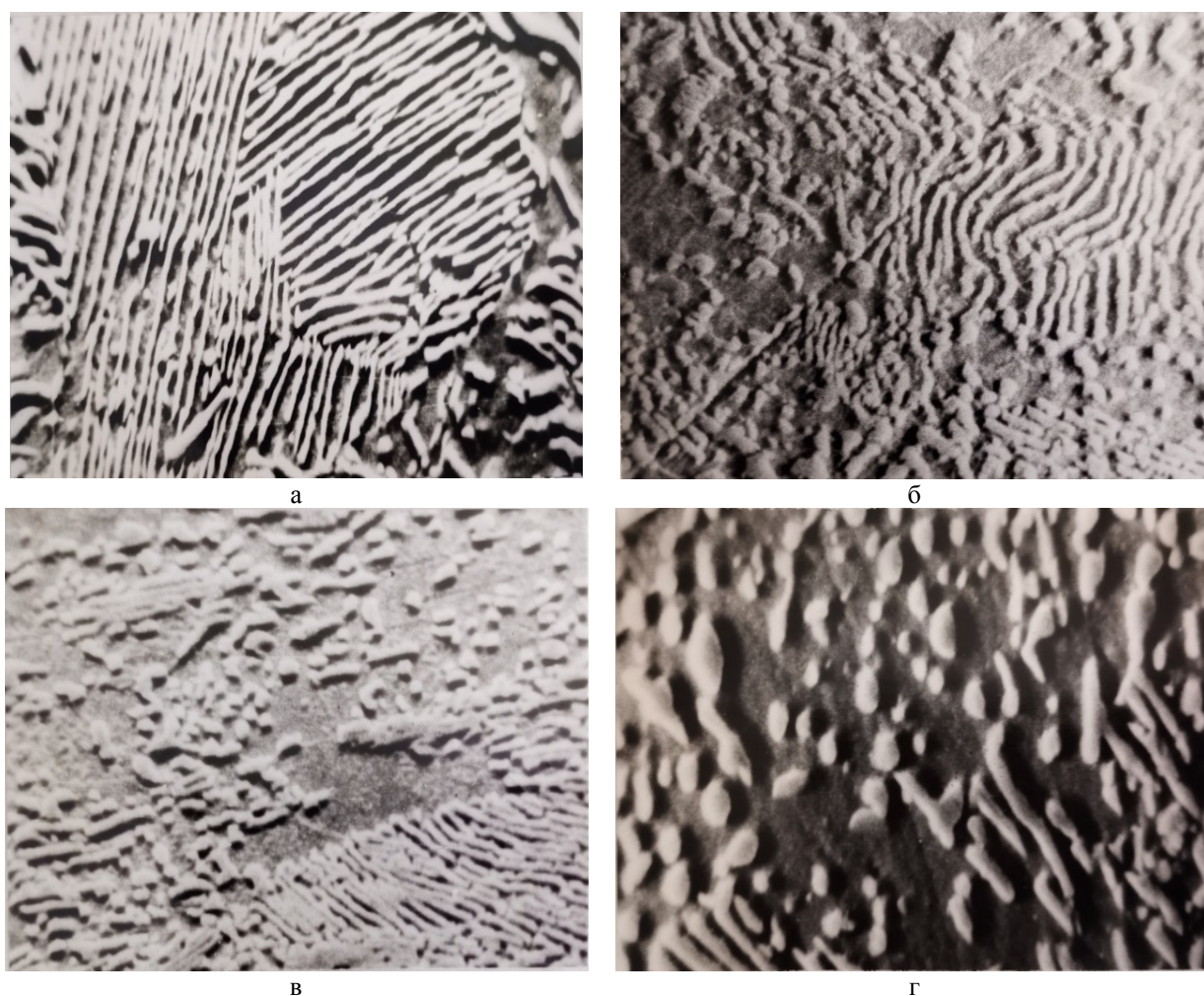


Рисунок 2 — Кривые течения стали У8А, полученные полугорячим сжатием



а — отожженная; б — после сжатия при температуре 680 °С со степенью деформации 0,32;
в — после сжатия при температуре 720 °С со степенью деформации 0,73;
г — после сжатия при температуре 720 °С со степенью деформации 1,28×3000

Рисунок 3 — Микроструктура стали У8А после деформации сжатием

Дальнейшее повышение температуры приводит к реализации режима деформации аустенита, образовавшегося в результате фазовой перекристаллизации и претерпевшего возврат и рекристаллизацию. После охлаждения получается структура пластинчатого перлита с частично сфероидизованным цементитом.

Режим полугорячего сжатия использован для штамповки призматических деталей «палец», применяемых для изготовления скребковых конвейеров. Технология изготовления этой детали состоит из операций токарной обработки и фрезерования, которые имеют значительную трудо-

емкость и низкий коэффициент использования металла. Применена точная объемная штамповка полугорячим выдавливанием в разъемных матрицах при температуре 750 °С, при которой протекает процесс сфероидизации цементита. Получена твердость НВ 293–295, что соответствует пределу текучести 580 МПа, пределу прочности 850 МПа. Такая технология позволяет устранить улучшение в результате применяемого деформационно-термического режима.

Изучено изменение микроструктуры и механических свойств при полугорячей деформации сжатием в интервале температур фазовых превращений образцов из стали

У8А. Получено, что при сжатии одновременно с динамическим возвратом и рекристаллизации происходит сфероидизация цементита, что приводит к изменению механических свойств. Установлено, что процесс сфероидизации зависит от температуры и степени деформации. С ростом температуры и степени деформации пластинчатый перлит превращается в зернистый с образованием сфер цементита. Механиче-

ские свойства изменяются неоднозначно. С ростом температуры до температур фазового превращения происходит увеличение прочности и пластичности вследствие начала разрушения пластинок и образования сфер. В интервале температур фазового превращения свойства прочности сначала уменьшаются, а затем к концу интервала превращений увеличиваются в результате реализации режима деформации аустенита.

Список источников

1. Герасимов В. В. Сравнительная морфология сфероидизированной перлитной стали оптическим и электронно-микроскопическим методами // Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 55–59. EDN UYCPUN
2. Долженков И. Е., Долженков И. И. Сфероидизация карбидов в стали. М. : Металлургия, 1984. 143 с.
3. Герасимов В. В. Идентификация новообразования цементита вблизи тройного стыка зерен в сфероидизированной теплоустойчивой перлитной стали // Проблемы энергетики. 2016. № 1–2. EDN TSMSEH
4. Арефьева Л. П., Дука В. В., Дроган Е. Г. Исследование морфологии и топологии пластинчатого и зернистого перлита стали У8 на субмикронном уровне // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. Вып. 15. С. 239–245. DOI: 10.26456/pcascpn/2023.15.239. EDN PVCTZE
5. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М. : Машиностроение, 1971. 424 с. EDN XXLTKN
6. Рябичева Л. А., Лецинская Е. М. Технологические основы термомеханически регламентированных процессов горячей штамповки // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 10–12.
7. Лецинский В. М., Рябичева Л. А. Механические свойства штамповой стали 4Х2В5ФМ после термомеханически регламентированной обработки // Материаловедение. 1997. № 3. С. 28–30.

© Рябичева Л. А., Бабич И. Н., Белозир И. И., 2025

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМД и сварки ЛГУ им. В. Даля Стояновым А. А., к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.

Статья поступила в редакцию 22.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рябичева Людмила Александровна, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия, e-mail: ryabic80@mail.ru

Бабич Ирина Николаевна, доцент каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия

Белозир Ирина Ивановна, старший преподаватель каф. материаловедения Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Россия

***Ryabicheva L. A., Babich I. N., Belozir I. N.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, Russia, *e-mail: ryabic80@mail.ru)

EFFECT OF SEMI-HOT DEFORMATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON STEEL

The article considers the influence of semi-hot deformation on the spheroidization of cementite and the mechanical properties of U8A steel under compression. It was found that during compression, the spheroidization of cementite occurs simultaneously with dynamic return and recrystallization, depending on temperature and degree of deformation. With increasing temperature and degree of deformation, the lamellar pearlite transforms into granular pearlite with the formation of cementite spheres. As the temperature rises to the phase transformation temperatures, the strength and plasticity increase due to the onset of lamellar fracture and sphere formation. In the interval of phase transformation temperature, the strength properties first decrease and then increase at the end of the transformation range resulting in realization of the austenite deformation mode.

Key words: microstructure, mechanical properties, spheroidizing, lamellar pearlite, spheroidal pearlite, extrusion, thermomechanical regime.

References

1. Gerasimov V. V. Comparative morphology of spheroidized pearlitic steel by optical and electron-microscopic methods [Sravnitel'naya morfologiya sferoidizirovannoj perlitnoj stali opticheskim i elektronno-mikroskopicheskim metodami]. Power engineering: research, equipment, technology. 2015. No. 7–8. Pp. 55–59. EDN UYCPUN
2. Dolzhenkov I. E., Dolzhenkov I. I. Spheroidization of carbides in steel [Sferoidizaciya karbidov v stali]. M.: Metalurgija, 1984. 143 p.
3. Gerasimov V. V. Identification of cementite new formation near the triple grain junction in spheroidized heat-resistant pearlitic steel [Identifikaciya novoobrazovaniya cementita vblizi trojnogo styka zeren v sferoidizirovannoj teploustojchivoj perlitnoj stali]. Power engineering: research, equipment, technology. 2016. No. 1–2. EDN TSMSEH
4. Aref'eva L. P., Duka V. V., Drozan E. G. Study of morphology and topology of lamellar and granular pearlite of U8 steel at submicron level [Issledovanie morfologii i topologii plastinchatogo i zernistogo perlita stali U8 na submikronnom urovne]. Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. 2023. Iss. 15. Pp. 239–245. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.239. EDN PVCTZE
5. Storozhev M. V., Popov E. A. Theory of metal pressure treatment [Teoriya obrabotki metallov davleniem]. M.: Mashinostroenie, 1971. 424 p. EDN XXLTKN
6. Ryabicheva L. A., Leshchinskaya E. M. Technological bases of thermomechanically regulated hot stamping processes [Tekhnologicheskie osnovy termomekhanicheski reglamentirovannyh processov goryachej shtampovki]. Vestnik mashinostroeniya. 1997. No. 2. Pp. 10–12.
7. Leshchinskiy V. M., Ryabicheva L. A. Mechanical properties of stamp steel 4Cr2W5VMo after thermomechanically regulated treatment [Mekhanicheskie svoystva shtampovoj stali 4H2V5FM posle termomekhanicheski reglamentirovannoj obrabotki]. Material Science. 1997. No. 3. Pp. 28–30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryabicheva Lydmila Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia, e-mail: ryabic80@mail.ru

Babich Irina Nikolayevna, Assistant Professor of the Department of Material Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia

Belozir Irina Nikolayevna, Senior Lecturer of the Department of Materials Science

Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia

¹Яковченко А. В., ²Денищенко П. Н., ^{2,*}Чумак Н. Ю.

¹Донецкий национальный технический университет,

²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: nikolay31302@gmail.com

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАПРЯЖЕНИИ ТЕЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Повышение несущей способности профилей для крепи горных выработок имеет высокую актуальность. На практике их получают горячей прокаткой в основном из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа. Решена задача выбора для указанных профилей конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа, и разработки для нее базы цифровой информации о напряжении течения металла при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с⁻¹ и температуры в диапазоне 900–1200 °С.

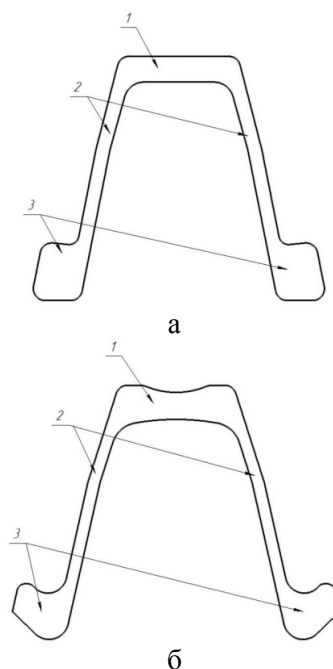
Ключевые слова: профили для крепи горных выработок, конструкционная низколегированная сталь; напряжение течения металла, горячая пластическая деформация, степень деформации, скорость деформации, температура металла.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Потребность в горячекатаных профилях для крепи горных выработок составляет сотни тысяч тонн в год. Поэтому обоснование параметров профилей для крепи горных выработок и совершенствование технологии их прокатки являются актуальными задачами.

Известные профили СВП [1] (рис.1, а) и СПА [2] (рис.1, б) характеризуются рациональным распределением металла по их сечениям и, соответственно, наиболее высокими статическими показателями. Они отвечают основным требованиям, предъявляемым конструкционному материалу для крепи горных выработок, и превосходят по ним известные отечественные и зарубежные аналоги. Этим обоснован их выбор для выполнения исследований.

Горячекатаный профиль для крепи горных выработок СВП включает полку, имеющую постоянную толщину, симметрично сопряженные с ней наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах, у которых верхняя и нижняя поверхности выполнены плоскими. Спец-профиль СВП, разработанный и освоен-

ный в 50-е годы прошлого столетия, до настоящего времени находит широкое применение на практике.



1 — полка; 2 — стойки; 3 — фланцы

Рисунок 1 — Профили для крепи горных выработок: а — СВП [1]; б — СПА [2]

Горячекатаный профиль для крепи горных выработок СПА включает полку, имеющую переменную толщину, симметрично сопряженные с ней наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах, у которых верхняя и нижняя поверхности выполнены под острым углом к горизонтальной плоскости. СПА разработан в начале 21-го столетия с целью получения повышенных статических показателей за счет перераспределения массы в сечении профиля и реализации возможности принудительного зацепления по фланцам спецпрофилей при их сопряжении.

Профили для крепи горных выработок в основном прокатывают из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 (нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа).

Арочные крепи для капитальных и подготовительных выработок шахт должны выдерживать значительные нагрузки горного давления. Поэтому к спецпрофилям для них, которые работают на сжатие и изгиб, предъявляются требования высокой прочности и устойчивости сечения. Для выполнения этих требований актуально использование сталей высокой прочности.

Известно, что изготовление арочной крепи из профилей, прокатанных из конструкционной легированной стали 14Х2ГМР (высокой прочности с пределом текучести до 700 МПа), позволило существенно повысить их несущую способность. Вместе с тем изыскание более дешевых высокопрочных сталей для арочных крепей имеет высокую актуальность [3].

Для решения этой задачи, а также повышения несущей способности крепи горных выработок актуально обосновать для горячекатаных профилей СВП и СПА замену конструкционной углеродистой стали Ст5 на конструкционную низколегированную сталь высокой прочности с пределом текучести не менее 450 МПа. Поэтому требуется выполнение конечно-элементного моделирования процессов нагружения профилей для крепи горных выработок

СВП и СПА из указанных сталей, работающих на сжатие и изгиб, с целью исследования их прочности и устойчивости. Актуальна оценка напряженно-деформированного состояния элементов профилей СВП и СПА от действия эксплуатационных нагрузок. Схемы нагружения должны моделировать различные эксплуатационные ситуации и, соответственно, нагрузки, которые имеют место на практике. Напряженное состояние элементов профилей необходимо сравнивать как по абсолютным значениям напряжений, так и по склонности элементов профилей к концентрации наибольших напряжений в одних и тех же зонах при различных вариантах нагружения.

Также актуально выполнить конечно-элементное моделирование процессов прокатки профилей для крепи горных выработок СВП и СПА по способу [4], позволяющему совместить в фасонных проходах высотную деформацию их элементов с интенсивным растяжением боковых наклонных стенок. Способ может обеспечить высокую технологичность на сортовых прокатных станах. Для совершенствования технологии прокатки на базе этого способа необходимо получение расширенных представлений о механизме процесса высотной деформации элементов профилей с интенсивным растяжением боковых наклонных стенок.

Постановка задачи. В работе поставлена задача выбора для профилей крепи горных выработок СВП и СПА конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа, и разработки для нее базы цифровой информации о напряжении течения металла при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с^{-1} и температуры в диапазоне 900–1200 °С.

Изложение материала и его результаты. Рационально профили СВП и СПА получать прокаткой из конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не ме-

нее 450 МПа, которая будет более дешевой по сравнению с конструкционными легированными сталями типа 14Х2ГМР, 14ХГН, имеющими предел текучести не менее 700 МПа. При этом также целесообразно выбрать сталь, у которой напряжение течения металла при горячей пластической деформации будет соответствовать кривым течения стали 14ХГН, для которой в работе [5] по указанным кривым имеется экспериментальная информация.

В итоге анализа механических характеристик ряда конструкционных низколегированных сталей и оценки их стоимости выбрана сталь 18Г2АФД, которая имеет предел текучести 450 МПа, что более чем на 50 % выше предела текучести конструкционной углеродистой стали Ст5. Сталь 18Г2АФД применяется для изготовления сварных конструкций различного назначения, несущих элементов сварных конструкций, проката высокой прочности и повышенной стойкости против атмосферной коррозии, применяемого в конструкциях со сварными, клепанными и болтовыми соединениями.

Совершенствование технологии прокатки профилей СВП и СПА на полунепрерывном стане 600 возможно на базе результатов конечно-элементного моделирования процессов деформации металла в сложных фасонных калибрах в системе DEFORM 3D. Для реализации моделирования требуется разработка базы цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с^{-1} и температуры металла в диапазоне 900–1200 °С.

Методика разработки базы цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации следующая. На первом этапе в окне программы (рис. 2), созданной в работе [6], выполняется проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим рас-

четным значениям, полученным на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД.

На следующем этапе с использованием метода и компьютерной программы, созданных в работе [8], а также с учетом экспериментальных данных [5] по напряжению течения стали 14ХГН выполняется уточнение констант, определяющих термокинетические параметры в методе [7] расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации (рис. 3, 4).

Затем повторно в окне программы, показанном на рисунке 5, выполняется проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям для стали 18Г2АФД, полученным на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры.

На заключительном этапе разрабатывается база цифровой информации о напряжении течения конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации на базе формул метода [7] и уточненных с использованием метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры.

На рисунке 2 в области факторного пространства, определенного экспериментальными кривыми течения для стали 14ХГН [5], выполнена проверка точности аппроксимации экспериментальной информации. Для заданных значений факторов выполнено определение напряжения течения металла путем сплайн-интерполяции экспериментальной информации по методу, изложенному в работе [6]. Соответствующие расчетные значения, получены на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД, который был задан в таблице в правом верхнем углу окна программы (рис. 2). Проверка выполнялась в точках, определенных планируемым экспериментом (более подробно методика планируемого

МЕТАЛЛУРГИЯ

эксперимента для рассматриваемого класса задач приведена в [6]). Средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации составила 14,8 %. В отдельных опытах ошибка достигала 29,8 %. В указанном окне программы выполнена также проверка адекватности формул метода [7] с помощью критерия Фишера.

На следующем этапе выполнены исследования, направленные на повышение точности аппроксимации экспериментальных данных. Подробно методика уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формулах метода [7] приведена в работе [8]. Уточненные константы показаны в правой части окна программы, представленного на рисунке 3, ниже опции «Выполнить». Соответствующие экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения сталей показаны на рисунке 4.

После этого выполнена повторная проверка точности аппроксимации экспериментальной информации. Проверка выполнялась аналогично приведенной на рисунке 2. Отличие заключалось в использовании уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формулах метода [7]. Указанные константы были заданы в таблице, расположенной в правой части окна программы, представленного на рисунке 5. При этом средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации составила 6,5 %. В отдельных опытах ошибка достигала 15 %. То есть ошибка уменьшилась практически в два раза. Результаты проверки адекватности формул метода [7] с учетом уточненных констант с помощью критерия Фишера также существенно улучшились.

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микрелегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Конструкционные стали\3. Конструкционные легированные стали\14ГН, [1], стр.119, рис.49

Пределы изменения факторов

$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	0.693	0.5	50	900	1200

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.18
Si (0 - 1.65)	0.17
Mn (0.03 - 1.55)	1.55
Cr (0 - 0.3)	0.3
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.03
S (0 - 0.05)	0.03
V (0 - 0.26)	0.12
Cu (0 - 0.28)	0.15

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)
-1.2154	-1	0	+1.2154
0.051	0.1079	0.3720	0.693
0.5	4.886	25.250	45.614
900	926.584	1050.000	1173.416

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{экс.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1079	4.886	926.584	107.501
2	+1	-1	-1	0.6361	4.886	926.584	155.602
3	-1	+1	-1	0.1079	45.614	926.584	144.743
4	+1	+1	-1	0.6361	45.614	926.584	216.474
5	-1	-1	+1	0.1079	4.886	1173.416	49.220
6	+1	-1	+1	0.6361	4.886	1173.416	73.420
7	-1	+1	+1	0.1079	45.614	1173.416	75.449
8	+1	+1	+1	0.6361	45.614	1173.416	107.949
9	-1.2154	0	0	0.051	25.250	1050.000	80.741
10	+1.2154	0	0	0.693	25.250	1050.000	138.517
11	0	-1.2154	0	0.3720	0.5	1050.000	69.118
12	0	+1.2154	0	0.3720	50	1050.000	149.590
13	0	0	-1.2154	0.3720	25.250	900	183.634
14	0	0	+1.2154	0.3720	25.250	1200	79.773
15	0	0	0	0.3720	25.250	1050.000	125.814

Результаты расчета

σ (МПа)	Δ (%)
136.670	27.133
178.086	14.450
187.889	29.808
238.817	10.321
63.446	28.904
66.975	8.779
81.251	7.690
97.224	9.936
90.004	11.472
136.229	1.652
83.266	20.470
151.511	1.284
234.795	27.860
89.262	11.895

$\Delta_{\text{ср}} (\%)$ 14.829

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)

Грасс 23.306 Гтабл 3.59 Грасс > Гтабл (адекватность обоснована)

Формула: $\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$

Параметры: n1, m1, n2, m2, n3, m3, n4, m4

Q: 370523.373

A: 64229148367103.586

Методы: Q по формуле В.С. Солода и др., Q по формуле S.F. Medina и др., Q по объединенной формуле, Усовершенствованный метод

Кнопки: Выполнить Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 2 — Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям, полученным на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод, уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.

Количество марок стали 1

Пределы изменения факторов

	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	$U_{\min} (1/c)$	$U_{\max} (1/c)$	$T_{\min} (\text{град.С})$	$T_{\max} (\text{град.С})$
18Г2АФД	0.051	2.0	0.5	50	900	1200

Расчет напряжения течения металла

Химический состав (%)

Наименование	18Г2АФД
C (0.05 - 1.1)	0.18
Si (0 - 1.65)	0.17
Mn (0.03 - 1.55)	1.55
Cr (0 - 0.3)	0.3
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.03
S (0 - 0.05)	0.03
V (0 - 0.26)	0.12
Cu (0 - 0.28)	0.15

по экспериментальным кривым упрочнения

Количество ε 300

Количество T 25

Количество U 25

Переход к каталогу

Удалить марку стали

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

n	$\sigma_{\text{расч.}} (\text{МПа})$	$\Delta (\%)$
123643	118.543	12.088
123644	118.748	11.762
123645	118.933	11.439
123646	119.096	11.119
123647	119.240	10.800
123648	119.366	10.483
123649	119.473	10.167
123650	119.562	9.852
123651	119.635	9.537
123652	119.692	9.222
123653	119.734	8.908
123654	119.761	8.593

Начальные параметры

n	$\sigma_{\text{расч.}} (\text{МПа})$	$\Delta (\%)$
123643	102.511	3.071
123644	103.019	3.041
123645	103.512	3.010
123646	103.989	2.976
123647	104.452	2.942
123648	104.900	2.907
123649	105.333	2.871
123650	105.753	2.836
123651	106.160	2.801
123652	106.553	2.768
123653	106.933	2.735

Новая итерация

Выполнить

Рисунок 3 — Расчет уточненных констант для стали 18Г2АФД

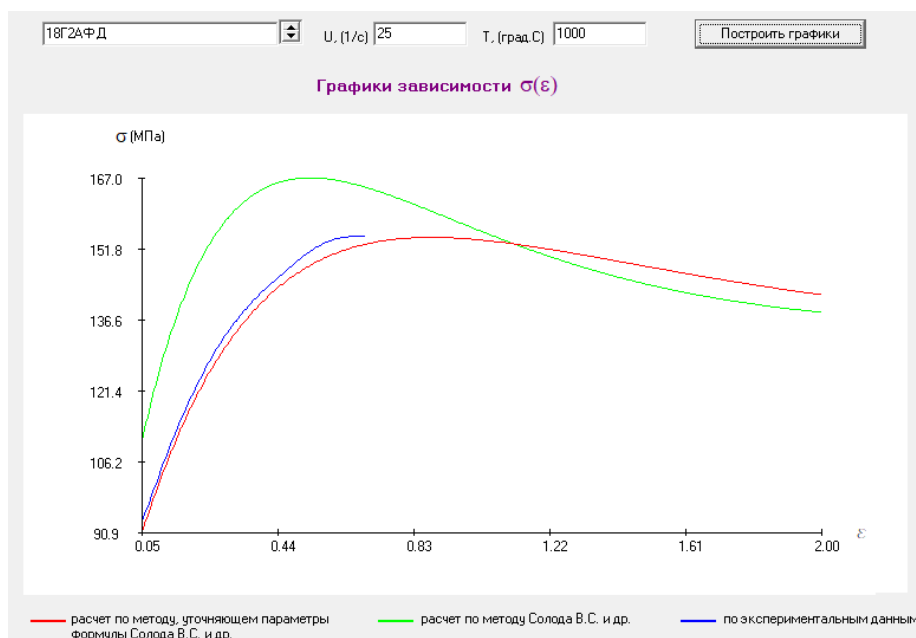


Рисунок 4 — Экспериментальная и расчётные кривые напряжения течения сталей $\sigma=f(\varepsilon)$ при фиксированных значениях U, T :
экспериментальная кривая для стали 14ХГН (синий);
расчетная кривая для стали 18Г2АФД, на базе метода [7] (зеленый);
расчетная кривая для стали 18Г2АФД, на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры (красный)

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микрелегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ
Конструкционные стали
Конструкционные
легированные стали\14ГН,
[1], стр.113, рис.49

Пределы изменения факторов

$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	0.693	0.5	50	900	1200

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.18
Si (0 - 1.65)	0.17
Mn (0.03 - 1.55)	1.55
Cr (0 - 0.3)	0.3
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.03
S (0 - 0.05)	0.03
V (0 - 0.26)	0.12
Cu (0 - 0.28)	0.15

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)
-1.2154	-1	0	+1
0	0	0	0
+1	+1	0	+1
+1.2154	+1	0	+1

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1079	4.886	926.584	107.501
2	+1	-1	-1	0.6361	4.886	926.584	155.602
3	-1	+1	-1	0.1079	45.614	926.584	144.743
4	+1	+1	-1	0.6361	45.614	926.584	216.474
5	-1	-1	+1	0.1079	4.886	1173.416	49.220
6	+1	-1	+1	0.6361	4.886	1173.416	73.420
7	-1	+1	+1	0.1079	45.614	1173.416	75.449
8	+1	+1	+1	0.6361	45.614	1173.416	107.949
9	-1.2154	0	0	0.051	25.250	1050.000	80.741
10	+1.2154	0	0	0.693	25.250	1050.000	138.517
11	0	-1.2154	0	0.3720	0.5	1050.000	69.118
12	0	+1.2154	0	0.3720	50	1050.000	149.590
13	0	0	-1.2154	0.3720	25.250	900	183.634
14	0	0	+1.2154	0.3720	25.250	1200	79.773
15	0	0	0	0.3720	25.250	1050.000	125.814

Результаты расчета

σ (МПа)	Δ (%)
110.530	2.818
160.472	3.130
148.859	2.844
204.991	5.305
48.840	0.772
77.669	5.787
64.616	14.358
101.154	6.295
74.418	7.832
131.833	4.826
79.727	15.350
129.570	13.384
192.076	4.597
83.976	5.269

$\Delta_{\text{ср}} (\%)$ 6.453

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)

Грассч 102.485 Гтабл 3.59 Грассч > Гтабл (адекватность обоснована)

Химический состав (%)

n1	72.667443
m1	0.117357
n2	62.057918
m2	0.119338
n3	0.313946
m3	0.091329
n4	0.544188
m4	0.074865

$Q = 370523.373$
 $A = 64229148367103.586$

☐ Q по формуле В.С. Солода и др.
☐ Q по формуле S.F. Medina и др.
☐ Q по объединенной формуле
☒ Усовершенствованный метод

Рисунок 5 — Повторная проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям для химического состава стали 18Г2АФД, полученным на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры

Полученные результаты позволили по формулам метода [7] и уточненным с использованием метода [8] константам, определяющим термокинетические параметры, разработать базу цифровой информации о напряжении течения конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации (табл. 1).

Таблица 1

База цифровой информации о напряжении течения (МПа) конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации

Скорость деформации $U, \text{с}^{-1}$	Степень деформации ε												
	0,05	0,1	0,15	0,25	0,3	0,5	0,7	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
Температура деформации $t = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$													
0,5	78,7	89,8	99,2	113,7	119,2	132,9	137,8	138,2	137,5	134,6	131,3	128,3	125,8
5	111,6	122,4	131,9	147,2	153,4	170,3	178,3	179,4	181,3	179,6	176,5	173,1	169,9
25	141,5	152,1	161,6	177,3	183,9	202,7	213,0	214,6	218,7	218,5	216,1	212,8	209,3
50	156,6	167,1	176,5	192,4	199,0	218,6	229,9	231,7	236,9	237,4	235,4	232,3	228,7
100	173,0	183,4	192,8	208,8	215,5	235,9	248,1	250,2	256,4	257,7	256,2	253,4	249,9
200	191,1	201,3	210,7	226,7	233,6	254,7	267,7	270,1	277,3	279,5	278,7	276,1	272,8

МЕТАЛЛУРГИЯ

Продолжение таблицы 1

Скорость деформации $U, \text{с}^{-1}$	Степень деформации ε												
	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Температура деформации $t = 1000^\circ\text{C}$													
0,5	49,2	60,5	69,6	82,5	87,0	96,1	97,4	97,2	94,5	91,4	88,8	86,9	85,7
5	70,8	82,0	91,3	105,5	110,8	123,5	127,5	127,7	126,4	123,3	120,1	117,3	115,2
25	90,7	101,7	111,2	126,1	131,9	146,8	153,0	153,7	153,9	151,4	148,0	144,8	142,0
50	100,8	111,7	121,1	136,3	142,3	158,2	165,3	166,2	167,2	165,1	161,9	158,5	155,5
100	111,8	122,6	132,1	147,5	153,6	170,5	178,6	179,7	181,6	179,9	176,8	173,4	170,1
200	123,9	134,7	144,1	159,7	166,0	183,8	192,8	194,1	196,9	195,9	193,0	189,6	186,2
Температура деформации $t = 1100^\circ\text{C}$													
0,5	32,4	43,7	52,3	63,5	66,9	72,2	71,3	70,8	67,8	65,3	63,7	62,8	62,3
5	47,3	58,6	67,6	80,4	84,8	93,5	94,6	94,3	91,6	88,5	86,0	84,2	83,1
25	61,1	72,3	81,6	95,4	100,3	111,5	114,4	114,4	112,4	109,2	106,2	103,8	102,0
50	68,2	79,3	88,6	102,8	108,0	120,2	123,9	124,1	122,6	119,5	116,3	113,6	111,6
100	75,9	87,0	96,4	110,8	116,3	129,6	134,2	134,5	133,6	130,6	127,3	124,4	122,1
200	84,5	95,5	104,9	119,6	125,3	139,6	145,1	145,7	145,4	142,7	139,3	136,2	133,6
Температура деформации $t = 1200^\circ\text{C}$													
0,5	22,4	33,5	41,5	50,9	53,3	55,7	53,8	53,2	50,6	49,0	48,2	47,8	47,6
5	33,0	44,3	52,9	64,1	67,6	73,0	72,2	71,7	68,7	66,2	64,6	63,6	63,1
25	43,0	54,3	63,2	75,6	79,7	87,6	88,1	87,7	84,8	81,8	79,6	78,0	77,1
50	48,1	59,3	68,4	81,3	85,7	94,6	95,7	95,5	92,8	89,6	87,1	85,3	84,1
100	53,7	65,0	74,1	87,4	92,1	102,0	104,0	103,8	101,4	98,2	95,4	93,3	91,9
200	60,0	71,2	80,4	94,1	99,0	110,0	112,8	112,8	110,7	107,5	104,5	102,1	100,4

Выводы:

1. В работе с целью повышения несущей способности крепи горных выработок, изготавливаемой из профилей СВП и СПА, решена задача выбора конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД (высокой прочности с пределом текучести 450 МПа) для замены широко используемой на практике конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 (нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа).

2. Для реализации конечно-элементного моделирования процессов прокатки в си-

стеме DEFORM 3D разработана база цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200с^{-1} и температуры металла в диапазоне $900\text{--}1200^\circ\text{C}$.

Направление дальнейших исследований связано с обоснованием параметров профилей для крепи горных выработок СВП и СПА и совершенствованием технологии их прокатки на полунепрерывном стане 600.

Список источников

1. ГОСТ 18662-2023. Профили горячекатаные специальные взаимозаменяемые (СВП) для крепи горных выработок. Сортамент. М. : Российский институт стандартизации, 2023. 7 с.
2. Новый профиль для крепления горных выработок / М. Б. Луцкий, В. Я. Кириченко, В. А. Луценко, К. М. Козлов // *Proceedings of the school of underground mining 2002 : International mining forum, Szczyrk. Cracow, 2002. P. 363–368.*
3. Жербин М. М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование). К. : Будівельник, 1974. 160 с.

4. Новый способ прокатки специальных взаимозаменяемых профилей / М. Б. Луцкий [и др.] // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2004. Вып. 18. С. 231–235.
5. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. М. : Металлургия, 1983. 352 с.
6. Яковченко А. В., Снитко С. А., Ивлева Н. И. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации : учебное пособие. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.
7. Солод В. С., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. № 7–8. 2006. С. 52–56.
8. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2022. № 26 (69). 2022. С. 29–39. EDN EPXNZL

© Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Чумак Н. Ю., 2025

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Коробко Т. Б.,
начальником СПЦ ООО «ЮГМК» Клепач Э. Н.*

Статья поступила в редакцию 05.06.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковченко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. обработки металлов давлением
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия

Денищенко Павел Николаевич, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Чумак Николай Юрьевич, аспирант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: nikolay31302@gmail.com

Yakovchenko A. V. (Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia), **Denishchenko P. N.,**
***Chumak N. Yu.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: nikolay31302@gmail.com)

DEVELOPMENT OF A DIGITAL INFORMATION BASE ON FLOW STRESS OF STRUCTURAL LOW-ALLOY STEEL DURING ROLLING OF PROFILES FOR MINE WORKING SUPPORT

It is highly relevant to increase the load-bearing capacity of profiles for mine working sup-port. In practice, they are mainly produced by hot rolling from normal-strength structural carbon steel St5 with a yield strength of up to 300 MPa. The task of selecting high-strength, structural low-alloy steel 18Mn2NWCu with a yield strength of at least 450 MPa for specified profiles, and developing a digital database on metal flow stress during hot plastic deformation, considering deformation up to 2,0, strain rates up to 200 s⁻¹ and temperatures between 900 and 1200 °C, has been solved.

Key words: profiles for mine working support, structural low-alloy steel, metal flow stress, hot plastic deformation, strain degree, strain rate, metal temperature.

References

1. GOST 18662-2023. Hot-rolled special interchangeable profiles (SIP) for the mine working support. Sortiment. Intr. 2023-08-01 M. : Russian standardization institute, 2023. 7 p.

2. Luckiy M. B., Kirichenko V. Ya., Lucenko V. A., Kozlov K. M. A new profile for mine working support [Novyj profil' dlya krepleniya gornyh vyrabotok]. Proceedings of the school of underground mining 2002. International mining forum, Szczyrk. Cracow, 2002. Pp. 363–368.

3. Zherbin M. M. High-strength construction steels (characteristics, application area, calculation and design) [Vysokoprochnye stroitel'nye stali (harakteristiki, oblast' primeneniya, raschet i proektirovanie)]. K. : Budivel'nik, 1974. 160 p.

4. Luckiy M. B., Dorozhko I. K., Lucenko V. A., Chichkan A. A., Ligus N. N. New method of rolling special interchangeable profiles [Novyj sposob prokatki special'nyh vzaimozamenyaemyh profilej]. Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. 2004. Iss. 18. Pp. 231–235.

5. Polukhin P. I., Gun G. Ya., Galkin A. M. Plastic deformation resistance of metals and alloys : a reference book [Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov : spravochnik]. M. : Metalurgija, 1983. 352 p.

6. Yakovchenko A. V., Snitko S. A., Ivleva N. I. Methods of computer modeling of metal stress flow in hot plastic deformation processes : a textbook [Metody komp'yuternogo modelirovaniya napryazheniya techeniya metalla v processah goryachej plasticheskoy deformacii : uchebnoe posobie]. Moscow ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023. 276 p.

7. Solod V. S., Bejgel'zimer Ya. E., Kulagin R. Yu. Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels [Matematicheskoe modelirovanie soprotivleniya deformacii pri goryachej prokatke uglerodistykh stalej]. Metal and Casting of Ukraine. No. 7–8. 2006. Pp. 52–56.

8. Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravcova S. I., Ivleva N. I. Method of specifying constants determining thermokinetic parameters in the formula for calculating the metal flow tension [Metod utochneniya konstant, opredelyayushchih termokineticheskie parametry v formule rascheta napryazheniya techeniya metalla]. Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2022. No. 26 (69). Pp. 29–39. EDN EPXNZL

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovchenko Aleksandr Vasil'evich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia

Denishchenko Pavel Nikolayevich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Chumak Nikolay Yurievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: nikolay31302@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

^{1,*}Сотников А. Л., ²Ковальчик Р. В., ³Орлов А. А.

¹Донецкий национальный технический университет,

²Приазовский государственный технический университет,

³Донбасский государственный технический университет

*E-mail: 0713019870@mail.ru

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрен процесс разработки архитектуры веб-приложения для автоматизированной детекции объектов на рентгеновских снимках сварных соединений с использованием нейросетевой модели YOLOv5. Представлена структура проекта, включающая серверную часть, реализованную на основе асинхронного фреймворка FastAPI, и клиентский интерфейс, разработанный с использованием HTML и JavaScript. Описаны основные этапы работы приложения: загрузка изображения, его предобработка с помощью библиотеки OpenCV, выполнение инференса модели и возврат результатов пользователю в формате JSON с последующей визуализацией обнаруженных объектов. Интерфейс приложения интуитивно понятный и удобный в использовании; он обеспечивает загрузку изображения, его предварительный просмотр и отображение результатов детекции в реальном времени. Приложение развернуто на тестовом сервере под управлением операционной системы Ubuntu 22.04. Результаты тестирования подтвердили корректное функционирование всех компонентов системы и высокую точность детекции объектов. Продемонстрирован потенциал предложенного решения для автоматизации анализа рентгеновских снимков с применением систем поддержки принятия решений на основе технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: веб-приложение, YOLOv5, рентгеновский снимок, сварное соединение, маркировочные знаки, детекция объектов, FastAPI, компьютерное зрение, нейросетевые модели.

Введение. Анализ рентгеновских снимков сварных соединений является важной частью неразрушающего контроля качества, однако традиционные методы требуют значительных временных и человеческих ресурсов, а также подвержены субъективным ошибкам.

Предложенная в работе [1] классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений позволяет учитывать специфику типовых дефектов при выборе оптимальных подходов контроля и может быть полезна при дальнейшем развитии автоматизированной обработки рентгеновских снимков. Развитие технологий цифровой обработки изображений и искусственного интеллекта открывает возможность автоматизации данного процесса, позволяя повысить точность и скорость обнаружения дефектов. Разработка веб-приложения, объединяющего современные

нейросетевые модели и удобный интерфейс пользователя, представляет собой актуальное решение, способное внедряться в промышленные системы поддержки принятия решений [2–4].

При создании таких приложений краеугольным вопросом является разработка их архитектуры. Архитектура приложения представляет собой стратегически организованную структуру, определяющую взаимодействие компонентов системы и принципы их проектирования. Она охватывает как дизайн, отвечающий за пользовательский опыт, так и технические аспекты, включая интеграцию с данными и инфраструктурой. Выбор архитектуры напрямую влияет на производительность, масштабируемость и экономическую эффективность приложений, что делает разработку архитектуры критически важным этапом проектирования систем автоматизированной об-

работки визуальной информации и систем поддержки принятия решений [5, 6].

Современные веб-приложения, такие как одностраничные (SPA), демонстрируют, как эволюция архитектурных подходов позволяет решать новые задачи. Переход от статических HTML-страниц к динамическим интерфейсам, где сервер предоставляет данные через API, а клиентская часть реализует логику с помощью JavaScript, потребовал переосмысления серверной архитектуры [7]. Включая использование микросервисов для обработки запросов [8] и интеграцию с внешними системами, такими как нейронные сети для анализа данных [9].

Разработка архитектуры требует баланса между текущими потребностями и будущими вызовами. Принципы SOLID способствуют созданию гибких систем, снижая затраты на внедрение новых функций [5]. Использование современных инструментов, таких как фреймворки для SPA, ускоряет разработку, но требует согласованности между клиентской и серверной частями [6].

В системах с элементами искусственного интеллекта архитектура играет ключевую роль в организации взаимодействия между компонентами. Например, анализ визуальных данных требует координации между брокером сообщений, файловым хранилищем и нейронной сетью. При этом трехуровневые клиент-серверные модели сохраняют актуальность, разделяя ответственность между клиентом, сервером и базой данных для оптимизации производительности.

Интеграция новых технологий подчеркивает необходимость продуманной архитектуры, объединяющей разнородные компоненты в единую систему. Это включает обеспечение безопасности, масштабируемости и отказоустойчивости, что остается основой успешной разработки как традиционных веб-приложений, так и сложных систем автоматизированной обработки визуальной информации и систем поддержки принятия решений [6, 9].

Цель и задачи работы. *Целью* данной работы является разработка архитектуры веб-приложения для загрузки и обработки рентгеновского снимка сварного соединения с последующей детекцией на нём различных объектов — дефектов и артефактов.

Задача реализована на основе предобученной в среде Google Colaboratory искусственной нейронной сети YOLOv5. Серверная часть приложения реализована с использованием современного асинхронного фреймворка FastAPI, клиентский интерфейс — с применением HTML и JavaScript.

Основное функциональное требование: приложение должно обеспечивать удобную загрузку пользователем файла одиночного изображения через веб-интерфейс, его последующую обработку на сервере (детекцию объектов) и отображение результатов непосредственно в браузере.

Основные *задачи*, реализованные при разработке веб-приложения:

- создание серверного API для загрузки изображений методом POST;
- выполнение предобработки изображений с использованием библиотеки OpenCV;
- интеграция предварительно обученной модели нейронной сети YOLOv5 для детекции объектов;
- возврат обработанного изображения и результатов детекции в формате JSON;
- разработка фронтенда для загрузки изображения и отображения результатов пользователю.

Дополнительные требования заключаются в обеспечении устойчивой работы приложения на сервере под управлением операционной системы Ubuntu, а также в возможности дальнейшего масштабирования решения.

Структура проекта. Структура проекта представлена на рисунке 1. В корневой директории, названной «ODProject», расположены папки и файлы проекта, включая реализацию архитектуры YOLOv5. Оптимальные веса нейросети сохранены в файле best.pt.

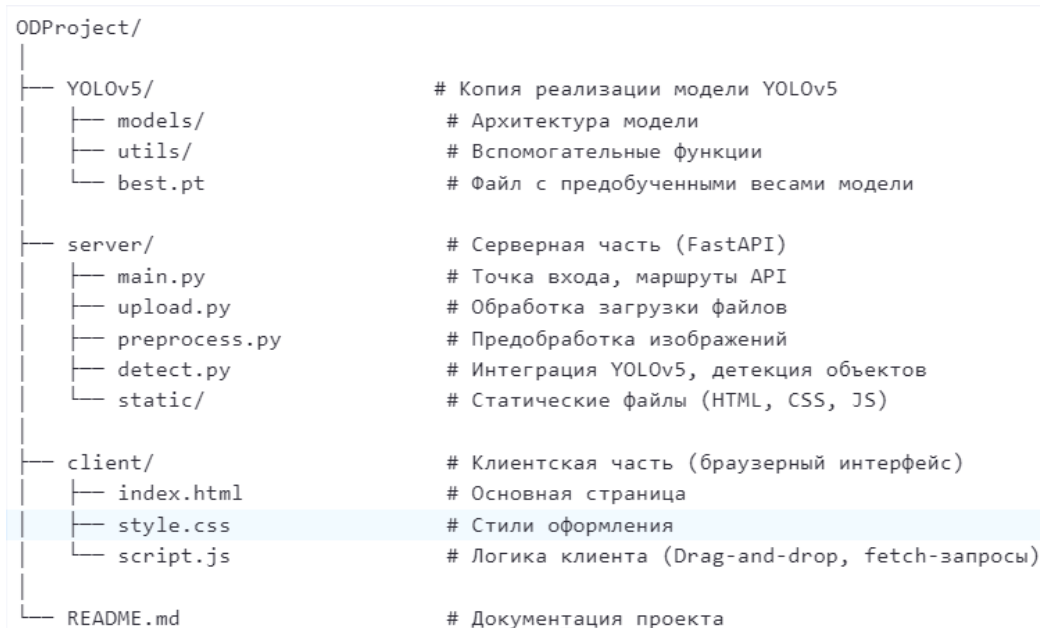


Рисунок 1 — Структура проекта

Реализация серверной части. Для реализации серверной части был выбран фреймворк FastAPI, обеспечивающий высокую скорость обработки запросов [10] и удобство разработки благодаря встроенной поддержке асинхронности и автоматической генерации OpenAPI-документации [11].

Основные компоненты серверной части включают в себя:

- **обработку файлов:** приём изображений в формате multipart/form-data;
- **предобработку изображений:** преобразование байтового потока в массив NumPy с использованием OpenCV (cv2.imdecode), масштабирование изображения до размера 640×640 пикселей;
- **интеграцию модели YOLOv5:** применение предобученной нейросети YOLOv5 для детекции объектов на полученных изображениях;
- **формирование ответа:** кодирование обработанного изображения обратно в формат Base64 для передачи клиенту и возврат списка обнаруженных объектов.

Для удобства обслуживания статических файлов подключен модуль StaticFiles фреймворка FastAPI.

Реализация клиентской части. Клиентская часть реализована с использованием HTML5, CSS3 и нативного JavaScript. Основные элементы пользовательского интерфейса включают:

- **загрузку изображения методом Drag-and-Drop:** возможность загрузки файла перетаскиванием в выделенную область;
- **предпросмотр изображения:** отображение оригинального снимка до начала обработки;
- **индикацию загрузки:** визуальную анимацию, сигнализирующую о процессе отправки данных на сервер;
- **отображение результатов:** визуализацию обработанного изображения и списка найденных объектов с указанием классов и уровня уверенности.

Асинхронный обмен данными между клиентом и сервером осуществляется через API fetch, что обеспечивает плавную работу интерфейса без перезагрузки страницы.

Реализация обработки изображений. Преобразование изображения. После получения изображения с клиента сервер выполняет следующие этапы обработки:

1. Преобразование байтов в массив NumPy:

```
python
np_arr = np.frombuffer(file_bytes, np.uint8)
img = cv2.imdecode(np_arr, cv2.IMREAD_COLOR)
```

2. Масштабирование изображения до размеров, соответствующих входу модели YOLOv5:

```
python
img_resized = cv2.resize(img, (640, 640))
```

3. При необходимости — преобразование цветового пространства из BGR в RGB.

Детекция объектов. На подготовленном изображении выполняется инференс модели YOLOv5:

```
python
results = model(img_resized)
detections =
results.pandas().xyxy[0].to_dict(orient="records")
```

Из результатов извлекаются координаты ограничивающих прямоугольников (bounding boxes), классы обнаруженных объектов и значения уверенности модели.

Возврат данных клиенту. Обработанное изображение кодируется в формат base64 для передачи:

```
python
_, buffer = cv2.imencode('.jpg',
img_with_boxes)
img_base64 =
base64.b64encode(buffer).decode('utf-8')
```

Данные о детекциях структурируются в JSON-объект и отправляются клиенту вместе с изображением в виде строки Base64.

Развертывание на сервере Ubuntu. Проект был успешно развернут на сервере под управлением операционной системы Ubuntu 22.04. Настройка включала следующие этапы:

- установку Python 3.11 и необходимых библиотек требуемых версий (fastapi, uvicorn, opencv-python, torch, ultralytics и др.), перечисленных в файле requirements.txt;

- клонирование репозитория YOLOv5 и его локальную установку с учетом всех зависимостей;

- настройку виртуального окружения для изоляции проекта;

- запуск серверного приложения с помощью Uvicorn на порту 8000;

- настройку сетевого доступа через IP-адрес.

Функциональные возможности веб-приложения. Веб-приложение, интерфейс которого представлен на рисунке 2, предназначено для загрузки и автоматической обработки одиночного рентгеновского снимка сварного соединения с целью детекции объектов — дефектов и различных артефактов. Интерфейс включает центральную зону, куда пользователь может перетащить файл (метод drag-and-drop) или выбрать его вручную с помощью кнопки «Выберите файл». Приложение поддерживает форматы изображений JPG, PNG, TIF и TIFF с ограничением на размер файла не более 1 МБ.

После загрузки изображение отправляется на сервер для анализа, где с помощью алгоритмов компьютерного зрения выполняется поиск и распознавание объектов. В текущей версии приложения реализована детекция таких элементов, как цифры, символы и обозначения, расположенные рядом со сварными швами — так называемые маркировочные знаки.

В нижней части интерфейса предусмотрена возможность обратной связи с разработчиками.

На рисунке 3 продемонстрирован результат работы приложения. Слева показан исходный рентгеновский снимок без обработки, на котором присутствуют реальные цифровые обозначения (например, «12», «7», «2»), а также могут располагаться буквенно-цифровые метки. Справа — то же изображение после обработки: зоны, где система обнаружила маркировочные знаки, выделены зелеными рамками.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

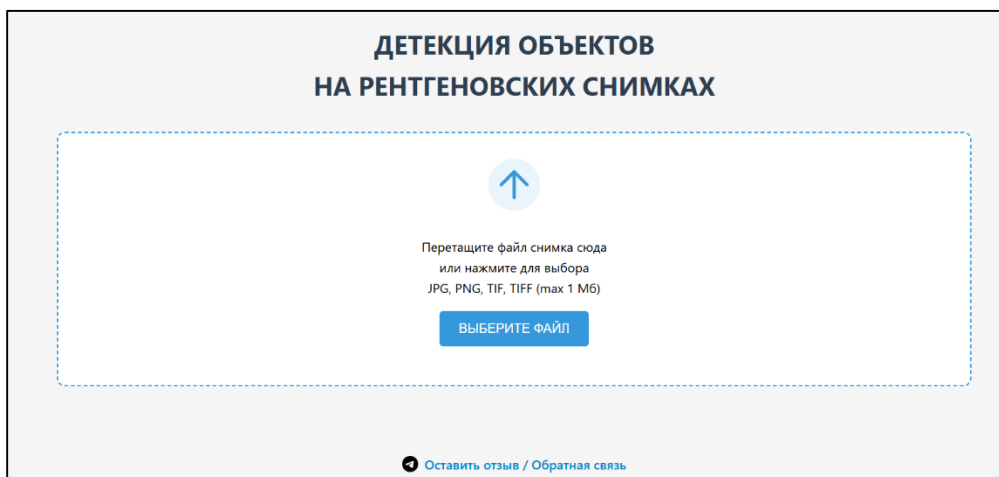


Рисунок 2 — Интерфейс веб-приложения

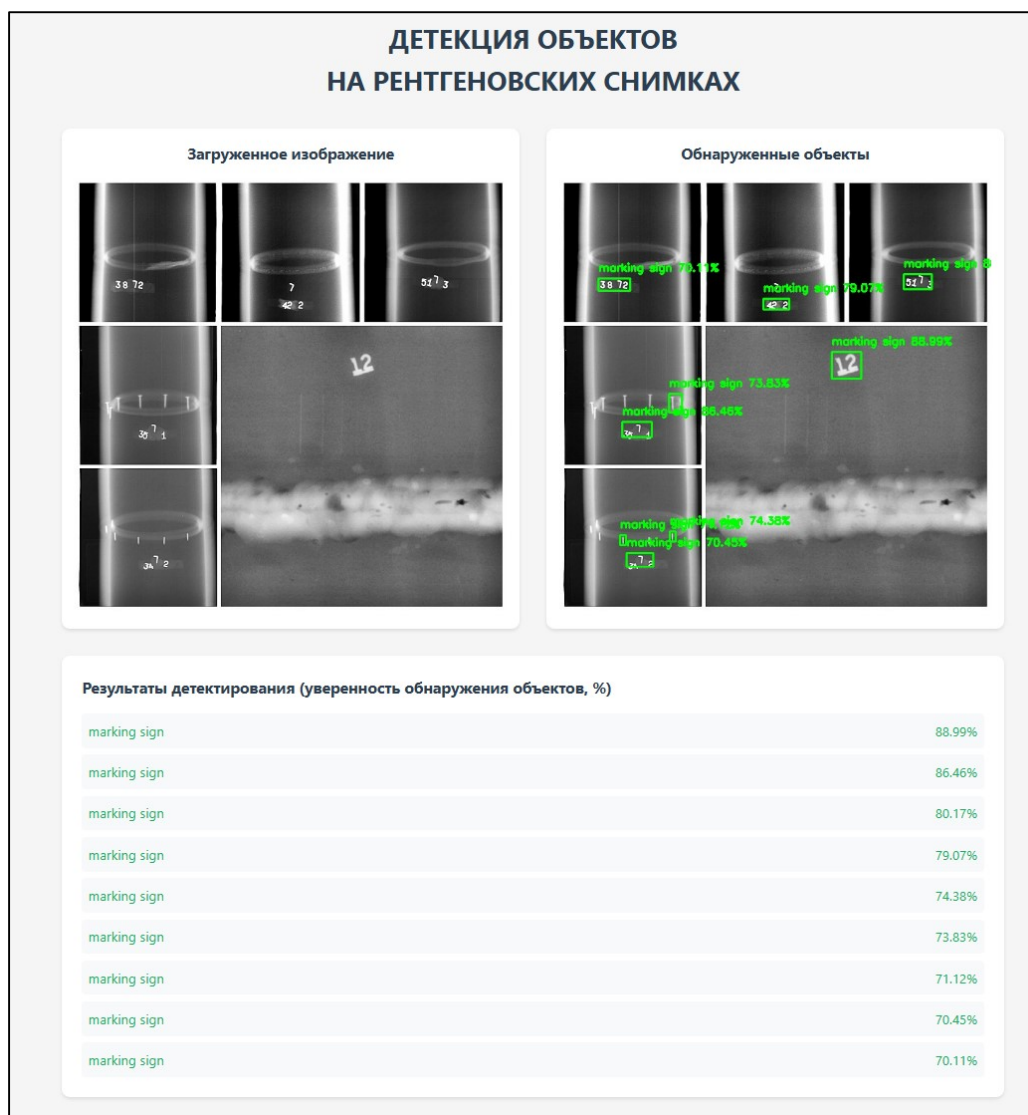


Рисунок 3 — Результат работы веб-приложения

Рядом с каждой рамкой указано название распознанного объекта (marking sign) и уровень уверенности в его обнаружении. Ниже размещена таблица, в которой перечислены все найденные объекты с соответствующими значениями уверенности, варьирующимися от 70,11 до 88,99 %. Эти результаты демонстрируют высокую эффективность и точность алгоритма детекции, что открывает возможность использования системы в дальнейшем для автоматизированного анализа и протоколирования результатов радиационного контроля сварных соединений.

Веб-приложение доступно для открытого тестирования по адресу <http://weldmarker.ru>.

Выводы. В результате проведенной работы было спроектировано и реализовано веб-приложение для загрузки и автоматизированной обработки рентгеновских снимков сварных соединений.

Научная новизна работы заключается в разработке модульной архитектуры веб-приложения, обеспечивающей эффективную интеграцию нейросетевой модели YOLOv5 в асинхронное серверное окружение на базе FastAPI. Предложенная структура позволяет выполнять детекцию объектов на рентгеновских снимках сварных соединений в режиме реального времени, обеспечивая высокую производительность за счет оптимизации обработки изображений и параллелизма запросов. Особенностью решения является использование современных веб-технологий для построения удобного интерфейса, совместимого с дальнейшим масштабированием и внедрением в автоматизированные системы контроля качества.

Решение демонстрирует высокую скорость обработки изображений и точность распознавания маркировочных знаков, что подтверждается тестированием на реальных снимках. Полученные результаты позволяют рассматривать разработанное приложение как перспективный инструмент для ав-

томатизации анализа радиографических изображений в рамках неразрушающего контроля качества сварных соединений.

Ключевые достижения проекта:

- реализация модульной архитектуры, допускающей масштабирование и последующее внедрение новых функций;
- обеспечение корректной работы всех компонентов системы (загрузка, предобработка, инференс, визуализация);
- достижение высокого уровня точности детекции объектов (уверенность от 70 до 89 %) на ограниченном наборе классов;
- создание интуитивно понятного веб-интерфейса, поддерживающего drag-and-drop загрузку изображений и мгновенное отображение результатов.

Дальнейшее развитие проекта может включать следующие направления:

- интеграцию асинхронной очереди задач (например, Celery) для повышения отказоустойчивости и возможности обработки множества изображений параллельно;
- расширение набора детектируемых объектов за счет обучения модели на новых типах объектов и артефактов, присущих рентгеновским снимкам сварных соединений;
- внедрение механизма сохранения истории обработки изображений и формирования отчетов;
- оптимизацию модели YOLOv5 под конкретные аппаратные средства (например, использование TensorRT или ONNX Runtime);
- публикацию API для внешних систем и интеграцию с комплексами цифровой радиографии.

Таким образом, разработанное веб-приложение представляет собой эффективное решение в области автоматизированного анализа рентгеновских снимков и может быть использовано в качестве основы для создания системы поддержки принятия решений специалистами радиационных методов контроля.

Список источников

1. Сотников А. Л., Муховатый А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Сварка и Диагностика*. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19. EDN UENENG

2. Косач А. А., Ковшов Е. Е. Автоматизация обработки данных неразрушающего контроля на основе искусственной нейронной сети // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 3. С. 524–531. EDN XXYINV
3. Бадалян В. Г., Вовилкин А. Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (Обзор) // *Контроль. Диагностика*. 2022. Т. 25. № 5. С. 12–25. DOI: 10.14489/td.2022.05.pp.012-025. EDN ALYROO
4. Копылов Д. А., Агешин Е. С., Хомутская О. В. Формирование синтетических данных для обучения системы компьютерного зрения // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2022. № 4 (18). С. 18–28. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-18-28. EDN BRJMSF
5. Бежик А. А., Мажей Я. В. Архитектура приложений. Чем является? Для чего используется? Основные виды и критерии хорошей архитектуры // *Столыпинский вестник*. 2022. № 9. С. 4998–5008. EDN YAFIJQ
6. Егорян В. В., Калугин А. В. Роль архитектурного подхода при разработке программных приложений // *Столыпинский вестник*. 2022. № 9. С. 5110–5122. EDN FDWPDW
7. Жиренкин А. В., Старосельский А. К. Развитие элементов архитектуры современных веб-приложений и их влияние на разработку // *Вестник науки*. 2023. № 6 (63). Т. 3. С. 869–872. EDN ZNMGYR
8. Городничев М. Г., Полонский Р. В. Оценка возможности использования микросервисной архитектуры при разработке пользовательских интерфейсов клиент-серверного программного обеспечения // *Экономика и качество систем связи*. 2020. № 3. С. 33–43. EDN MBNNLI
9. Десятов И. В., Свечников А. А., Кузнецов А. В. Архитектура веб-приложения для оценки пользовательских интерфейсов // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2024. № 4. С. 31–34. EDN TVXEVT
10. Кенжебай Э. Б. Выбор архитектуры и технологий для мобильного приложения такси // *In The World Of Science and Education*. 2025. С. 42–45.
11. Загумёнов А. А., Наумова В. В., Ерёмов В. С. Облачный сервис многомерной обработки количественных данных для решения геологических задач // *Вестник НГУ*. 2021. Т. 19. № 3. С. 40–49. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-3-40-49. EDN EWGGBU

© Сотников А. Л., 2025

© Ковальчик Р. В., 2025

© Орлов А. А., 2025

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТУ Денисовой Н. А.,
д.т.н., доц., научным руководителем ООО «Маллер» Лысенко И. Е.**

Статья поступила в редакцию 22.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сотников Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия, e-mail: 0713019870@mail.ru

Ковальчик Роман Владиславович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части
Приазовский государственный технический университет,
г. Мариуполь, Россия

Орлов Андрей Андреевич, старший преподаватель каф. машин металлургического комплекса
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Sotnikov A. L. (Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, e-mail: 0713019870@mail.ru), **Kovalchik R. V.** (Priazovskiy National Technical University, Mariupol, Russia), **Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia)

DEVELOPMENT OF WEB APPLICATION ARCHITECTURE FOR OBJECT DETECTION ON X-RAY IMAGES OF WELDED JOINTS

The process of developing a web-application architecture for the automated detection of objects in X-ray images of welded joints using the YOLOv5 neural network model is examined. The project's structure is presented, including the server part, which is based on the asynchronous FastAPI framework, and the client interface, which is developed using HTML and JavaScript. The main stages of application operation are described: image loading, its preprocessing with the OpenCV library, model inference and returning results to the user in JSON format with subsequent visualization of detected objects. The self-explanatory and easy-to-use application interface provides image loading, its previewing, and real-time display of detection results. The application is deployed on a test server running Ubuntu 22.04 operating system. The test results confirmed the correct functioning of all system components and high accuracy of object detection. The potential of the proposed solution for automating X-ray image analysis using the decision support systems based on artificial intelligence technologies.

Key words: web application, YOLOv5, X-ray image, welded joint, identifying symbols, object detection, FastAPI, computer vision, neural model.

References

1. Sotnikov A. L., Mukhovaty A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for copper welded joints obtained by friction stir welding [Klassifikatsiya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenij iz medi, poluchennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Welding and Diagnostics*. 2022. No. 3. Pp. 19–24 DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19. EDN UENENG
2. Kosach A. A., Kovshov E. E. Automation of nondestructive testing data processing based on artificial neural network [Avtomatizatsiya obrabotki dannykh nerazrushayushchego kontrolya na osnove iskusstvennoj nejronnoj seti]. *Cloud of Science*. 2018. Vol. 5. No. 3. Pp. 524–531. EDN XXYINV
3. Badalyan V. G., Vopilkin A. Kh. Application of neural networks in ultrasonic nondestructive testing (Review) [Primenenie nejronnykh setej v ul'trazvukovom nerazrushayushchem kontrole (Obzor)]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2022. Vol. 25. No. 5. Pp. 12–25. DOI: 10.14489/td.2022.05.pp.012-025. EDN ALYROO
4. Kopylov D. A., Ageshin E. S., Khomutskaya O. V. Synthetic data generation for training of computer vision system [Formirovanie sinteticheskikh dannykh dlya obucheniya sistemy komp'yuternogo zreniya]. *Automation and Modelling in Design and Management*. 2022. No. 4 (18). Pp. 18–28. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-18-28. EDN: BRJMSF
5. Bezhih A. A., Mazhei Ya. V. Application Architecture. What is it? What is it used for? Basic types and criteria of a good architecture [Arhitektura prilozhenij. Chem yavlyaetsya? Dlya chego ispol'zuetsya? Osnovnye vidy i kriterii horoshej arhitektury]. *Stolypinsky Vestnik*. 2022. No. 9. Pp. 4998–5008. EDN YAFIJQ
6. Egoryan V. V., Kalugin A. V. The role of architectural approach in software application development [Rol' arhitekturnogo podhoda pri razrabotke programmykh prilozhenij]. *Stolypinsky Vestnik*. 2022. No. 9. Pp. 5110–5122. EDN FDWPDW
7. Zhirenkin A. V., Staroselskiy A. K. Development of modern web applications architecture elements and their influence on development [Razvitie elementov arhitektury sovremennykh veb-prilozhenij i ih vliyanie na razrabotku]. *Vestnik Nauki*. 2023. No. 6 (63). Vol.3. Pp. 869–872. EDN ZNMGYR
8. Gorodnichev M. G., Polonskiy R. V. Evaluation of capability for using microservice architecture in developing client-server software user interfaces [Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya mikroservisnoj arhitektury pri razrabotke pol'zovatel'skih interfejsov klient-servernogo programmnogo obespecheniya]. *Economics and Quality of Communication Systems*. 2020. No. 3. Pp. 33–43. EDN MBNNLI

9. Desyatov I. V., Svechnikov A. A., Kuznetsov A. V. *Web application architecture for evaluating user interfaces [Arhitektura veb-prilozheniya dlya ocenki pol'zovatel'skih interfejsov]*. Vestnik of Penza state university. 2024. No. 4. Pp. 31–34. EDN TVXEVT

10. Kenzhebai Ə. B. *Architecture and technology selection for a cab mobile app [Vybor arhitektury i tekhnologij dlya mobil'nogo prilozheniya taksi]*. In *The World Of Science and Education*. 2025. Pp. 42–45.

11. Zagumyonov A. A., Naumova V. V., Eryomenko V. S. *A cloud service for the multidimensional processing of quantitative data to solve geological problems [Oblachnyj servis mnogomernoj obrabotki kolichestvennyh dannyh dlya resheniya geologicheskikh zadach]*. Vestnik NSU. 2021. Vol. 19. No. 3. Pp. 40–49. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-3-40-49. EDN EWGGBU

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sotnikov Aleksey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after professor Sedush V. Ya. Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, e-mail: 0713019870@mail.ru

Kovalchik Roman Vladislavovich, PhD in Engineering, Senior Researcher of the Scientific Research Department Priazovskiy National Technical University, Mariupol, Russia

Orlov Andrei Andreievich, Senior lecturer of the Department of Metallurgical Complex Machines Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia

УДК 621.785

EDN: PTCMML

^{1,*}Левченко О. А., ¹Зинченко А. М., ²Павленко А. Т., ¹Левченко М. Э., ¹Левченко Э. П.¹Донбасский государственный технический университет,²Луганский государственный университет им. В. Даля

*E-mail: oksamito@rambltr.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Работа посвящена разработке математической модели, описывающей динамику работы одновалковой зубчатой дробилки. Рассмотрены много- и двумассные математические модели, позволяющие оценивать безрезонансную работу машины на основе коэффициента динамичности машинного агрегата.

Ключевые слова: одновалковая зубчатая дробилка, динамика, многомассная модель, двумассная модель, резонанс, коэффициент динамичности машинного агрегата.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одной из главных проблем при получении качественного сырья для производства чугуна является выпуск годного агломерата, удовлетворяющего наилучшим условиям по крупности для питания доменных печей [1, 2].

В подавляющем большинстве для дробления агломерационного спека, полученного методом горячего спекания, широкое распространение нашли одновалковые зубчатые дробилки с длинными зубьями, работающие по принципу продавливания массива спечённого коржа железорудного агломерата через зазоры в колосниковой решетке с помощью вращающихся зубьев звездочек ротора [3, 4].

Однако крупность готового продукта, выходящего из машины, при этом не всегда отвечает оптимальным условиям, т. к. обеспечивается большая вероятность образования кусков достаточно крупных размеров, сравнимых с высотой спекания шихты.

С целью стабилизации и выравнивания готового агломерата по фракциям предприятиями постоянно проводится поиск путей усовершенствования конструкции одновалковых зубчатых дробилок. Например, уменьшение расстояния между колосниками приводит к существенному возрастанию износа рабочих органов машины, а повышение частоты вращения массивного ротора, массой более 3 т, может приводить к возникно-

влению повышенных вибраций из-за влияния дисбаланса неуравновешенных масс [5].

Круглосуточный режим работы предприятий черной металлургии не способствует качественному проведению научных исследований и сопряжен с существенными трудностями технологического, организационного и научного характера, что не приветствуется руководством таких предприятий и создает большие неудобства самим исследователям.

Поэтому одним из актуальных направлений исследований расширения возможностей одновалковой зубчатой дробилки могут выступать методы математического моделирования [6, 7] на основе использования уже существующих и прошедших апробацию известных методик.

Постановка задачи. Одним из важных рабочих органов одновалковой зубчатой дробилки выступает узел ротора с размещенными на нем девятью звездочками с длинными зубьями, диаметр которых составляет 1300 мм. С целью обеспечения устойчивой работоспособности машины, ротор приводится в движение с достаточно малой частотой вращения, составляющей 4,7 об/мин, что обеспечивается редуцированием вращения вала ротора электродвигателя с достаточно большим передаточным числом, достигающим до 140, посредством многоступенчатого редуктора.

Это позволяет минимизировать влияние неуравновешенных масс на динамику работы машины. Однако при значительном повышении частоты вращения её рабочие органы и другие элементы могут претерпевать значительные нагрузки, неблагоприятно сказывающиеся на работоспособности и снижающие надежность конструкции в целом.

В связи с этим, *целью* настоящей работы является разработка математической модели описания динамических режимов одновалковой зубчатой дробилки при её работе на повышенных частотах вращения.

Объект исследования — технологический процесс дробления агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке горячего агломерата.

Предмет исследования — закономерности описания динамических процессов, связанных с вращением массивного ротора на основе много- и двумассной моделей одновалковой зубчатой дробилки.

Задачи исследования:

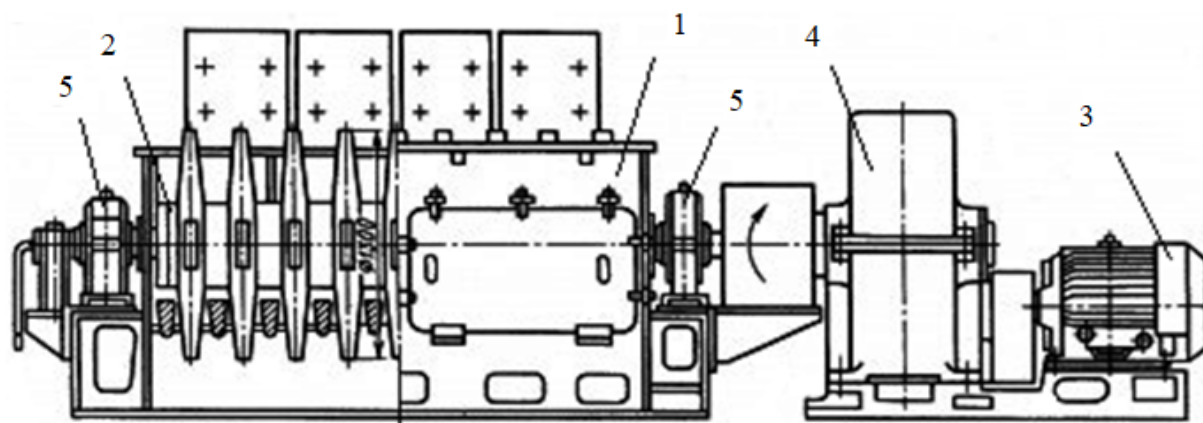
- оценка механических процессов, отражающих динамику работы одновалковой зубчатой дробилки;
- разработка многомассной математической модели, учитывающей наиболее полное влияние узлов и деталей ротора;

– разработка двумассной математической модели для упрощения численных расчетов динамики машины.

Методика исследования. Исследование динамики работы одновалковой зубчатой дробилки проводили аналитическим путем на основе теоретического обоснования. Более полное математическое обоснование динамических процессов, происходящих в дробилке, описывали её многомассной моделью. Для упрощения численных расчетов определения влияния параметров разрабатывалась двумассная динамическая модель рассматриваемой машины.

Изложение материала. Конструкция одновалковой зубчатой дробилки представляет собой массивный корпус, в котором на подшипниках качения установлен вал с набором звездочек (рис. 1). Ниже имеется горизонтально расположенная колосниковая решетка, составленная из набора отдельных элементов.

Описание механических процессов, происходящих в дробильной машине при дроблении агломерационного спека, имитируется многомассной математической моделью с учетом динамических процессов, характерных для работы одновалковой зубчатой дробилки [8, 9] на основе структуры, показанной на рисунке 2.



1 — корпус; 2 — зубчатый ротор; 3 — электродвигатель; 4 — редуктор; 5 — подшипниковые узлы

Рисунок 1 — Конструктивная схема одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата

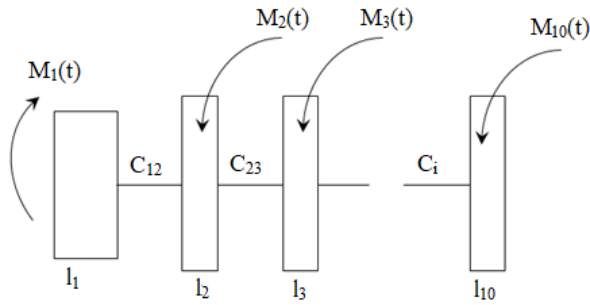


Рисунок 2 — Схема многомассной модели одновалковой зубчатой дробилки

Крутящий момент, создаваемый асинхронным трехфазным электродвигателем рассматриваемой конструкции дробильной машины, выразим через $M_1 = M_{\partial\partial}$. Он определяется по математической формуле, приведенной ниже:

$$M_{\partial\partial} = M_n \cdot \frac{\omega_0 - \omega_{\partial\partial}}{\omega_0 - \omega_n}, \quad (1)$$

где ω_0 — синхронная угловая скорость вращения вала ротора электродвигателя; ω_n — номинальная угловая скорость вращения вала ротора электродвигателя; $\omega_{\partial\partial}$ — действительная угловая скорость вала электродвигателя.

Составим уравнения вращающихся на валу масс (без учета редуктора) [9]:

$$\begin{cases} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_1 - M_{1,2} \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = M_{1,2} - M_2 - M_{2,3} \\ \dots \\ I_i \cdot \ddot{\varphi}_i = M_{i-1,i} - M_i - M_{i,i+1} \\ \dots \\ I_{10} \cdot \ddot{\varphi}_{10} = M_{9,10} - M_{10}, \end{cases} \quad (2)$$

где I_i — момент суммы мощностей приводимых моментов i -ого ряда дробящих звездочек относительно оси вращения ротора машины ($i=2, 10$); I_1 — момент инерции вала электродвигателя; $\varphi_i = \varphi_i(t)$ — угловое положение i -той массы; $M_2, \dots, M_{10}$ — результирующие моменты внешних сил, действующие

на каждую массу; M_{ji} — моменты сопротивления упругой деформации в соединениях; C_{ji} — жесткости соответствующих упругих связей различных дискретных масс.

Для учета углов поворотов и моментов упругостей воспользуемся соотношениями

$$\begin{cases} M_{1,2} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \\ M_{2,3} = C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) \\ \dots \\ M_{i-1,i} = C_{i-1,i} \cdot (\varphi_{i-1} - \varphi_i) \\ \dots \\ M_{9,10} = C_{9,10} \cdot (\varphi_9 - \varphi_{10}). \end{cases} \quad (3)$$

Ввиду того, что момент M_1 от трехфазного асинхронного электродвигателя задается формулой (1), система (2) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_n \cdot \frac{\omega_0 - \omega_{\partial\partial}}{\omega_0 - \omega_n} - M_{1,2} \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = M_{1,2} - M_2 - M_{2,3} \\ \dots \\ I_i \cdot \ddot{\varphi}_i = M_{i-1,i} - M_i - M_{i,i+1} \\ \dots \\ I_{10} \cdot \ddot{\varphi}_{10} = M_{9,10} - M_{10}. \end{cases} \quad (4)$$

Так как системы (3) и (4) имеют девятнадцать уравнений и столько же неизвестных функций $\varphi_1 = \varphi_1(t), \dots, \varphi_{10} = \varphi_{10}(t)$; $M_{12} = M_{12}(t), \dots, M_{9,10} = M_{9,10}(t)$, то можем исключить из уравнений (3) и (4) десять неизвестных функций от φ_1 до φ_{10} .

$$\begin{aligned} C_{1,2} \cdot \left(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2 \right) &= - \frac{M_n \cdot C_{1,2} \cdot \ddot{\varphi}_1}{(\omega_0 - \omega_n) \cdot I_1} - \\ &- \frac{\dot{M}_{1,2} \cdot C_{1,2}}{I_1} - \frac{\dot{M}_{1,2} \cdot C_{1,2}}{I_2} + \\ &+ \frac{\dot{M}_2 \cdot C_{1,2}}{I_2} + \frac{\dot{M}_{2,3} \cdot C_{1,2}}{I_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для этого выполним деление первого и второго уравнения (4) соответственно на I_1 и на I_2 , а затем вычтем из первого уравнения второе, продифференцировав полученную разность [9].

Получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \ddot{M}_{1,2} - C_{1,2} \cdot \frac{\dot{M}_{2,3}}{I_2} + \beta_{1,2} \cdot \dot{M}_{1,2} = \\ = C_{1,2} \cdot \frac{\dot{M}_2}{I_2} - \frac{M_n \cdot C_{1,2} \cdot \varphi_1}{(\omega_0 - \omega_n) \cdot I_1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\beta_{1,2}$ — циклическая частота, характеризующая собственные колебания двумассной системы:

$$\beta_{1,2} = \sqrt{C_{1,2} \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_1 \cdot I_2}}. \quad (7)$$

Прибавим и отнимем величину $\frac{M_n \cdot C_{1,2} \cdot \varphi_1}{(\omega_0 - \omega_n) \cdot I_1}$ из правой части (6). При этом

изменим значение φ_2 , как во втором уравнении (4). Тогда получим

$$\begin{aligned} + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{1,2}}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} - \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_{2,3}}{I_2} - \\ - \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{2,3}}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} = \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_2}{I_2} + \\ + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_2}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Разделим второе и третье составляющие системы уравнений (4) соответственно на I_2 и I_3 . После этого из третьего уравнения отнимем второе с умножением оставшихся составляющих (4) на $C_{2,3}$. Таким образом, будем иметь зависимости (9), представленные ниже.

А так как можно предположить, что все ряды рабочих элементов дробилки работают в примерно равных геометрических и

механических условиях, можно допустить соотношения (10), приведенные в последующем изложении.

Тогда с учётом (7) математические зависимости (5) и (6) будут преобразованы в соотношения (11).

$$\begin{aligned} \ddot{M}_{2,3} - \frac{C_{2,3} \cdot M_{1,2}}{I_2} + \beta_{2,3}^2 \cdot M_{2,3} - \\ - \frac{C_{2,3} \cdot M_{3,4}}{I_3} = \frac{C_{2,3} \cdot M_2}{I_2} + \frac{C_{2,3} \cdot M_3}{I_3}, \\ \dots \dots \dots \ddot{M}_{8,9} - \frac{C_{8,9} \cdot M_{7,8}}{I_9} + \beta_{8,9}^2 \cdot M_{8,9} - \\ - \frac{C_{8,9} \cdot M_{8,9}}{I_9} = \frac{C_{8,9} \cdot M_8}{I_8} + \frac{C_{8,9} \cdot M_9}{I_9}, \\ \dots \dots \dots \ddot{M}_{9,10} - \frac{C_{9,10} \cdot M_{8,9}}{I_{10}} + \beta_{9,10}^2 \cdot M_{9,10} = \\ = \frac{C_{9,10} \cdot M_9}{I_9} + \frac{C_{9,10} \cdot M_{10}}{I_{10}}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_2 = I_3 = \dots = I_{10} = I, \\ C_{2,3} = C_{3,4} = \dots = C_{9,10} = C, \\ \beta_{2,3}^2 + \beta_{3,4}^2 \dots \beta_{9,10}^2 = \beta^2, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\beta^2 = \frac{2 \cdot C}{I}, \quad \beta_{1,2}^2 = C_{1,2} \cdot \frac{I_1 + I}{I_1 \cdot I}.$$

$$\begin{aligned} \ddot{M}_{1,2} + \frac{M_n \cdot \ddot{M}_{1,2}}{(\omega_0 - \omega_n) \cdot I_1} + \beta_{1,2}^2 \cdot \dot{M}_{1,2} + \\ + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{1,2}}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} - \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_{2,3}}{I_2} - \\ - \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{2,3}}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} = \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_2}{I_2} + \\ + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_2}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_n)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученная система уравнений (12) содержит девять неоднородных дифферен-

циальных уравнений и девять неизвестных, к которым относятся крутящие моменты $M_{12}, M_{23}, M_{34}, \dots, M_{89}, M_{9,10}$.

$$\left\{ \begin{aligned} & \ddot{M}_{1,2} + \frac{M_n \cdot \ddot{M}_{1,2}}{I_2 \cdot (\omega_0 - \omega_n)} + \beta_{1,2}^2 \cdot \dot{M}_{1,2} + \\ & + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{1,2}}{(I_1 + I) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} - \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_{2,3}}{I} - \\ & - \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_{2,3}}{(I_1 + I) \cdot (\omega_0 - \omega_n)} = \frac{C_{1,2} \cdot \dot{M}_2}{I} + \\ & + \frac{\beta_{1,2}^2 \cdot M_n \cdot M_2}{(I_1 + I) \cdot (\omega_0 - \omega_n)}, \\ & \ddot{M}_{8,9} - \frac{C \cdot M_{7,8}}{I} + \beta^2 \cdot M_{8,9} - \\ & - \frac{C \cdot M_{9,10}}{I} = -\frac{C \cdot M_8}{I} + \frac{C \cdot M_9}{I}, \\ & \ddot{M}_{9,10} - \frac{C \cdot M_{8,9}}{I} + \beta^2 \cdot M_{9,10} = \\ & = \frac{C \cdot M_9}{I} + \frac{C \cdot M_9}{I}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Моменты $M_2(t) \dots M_{10}(t)$ зависят от внешних нагрузок, возникающих от взаимодействия зубьев звездочек и раздробливаемого агломерата на рабочие органы машины. Следовательно, их можно считать заданными величинами.

Для более равномерной нагрузки на двигатель и зубья звездочек дробилки, а также с целью некоторого снижения крупности готового продукта звездочки устанавливают в окружном направлении равномерно смещенными относительно друг друга [8] на угол φ_i ($i = 3, 4, \dots, 10$). Тогда

$$\begin{aligned} M_1(t) &= M_1(t), \\ M_2(t) &= M_2(t + \varphi_2), \\ M_3(t) &= M_2(t + \varphi_3), \\ &\dots, \\ M_{10}(t) &= M_2(t + \varphi_{10}). \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, полученная многомассная математическая модель динамики работы одновалковой зубчатой дробилки создает возможность анализа динамики её работы на основе учета действия сил, оказывающих влияние на рабочие органы, подвергающиеся воздействию рабочих нагрузок. Это может использоваться при совершенствовании и модернизации конструкции с целью повышения её эффективности работы.

Так как анализ многомассной модели сопряжен с чрезмерной трудоемкостью её решения, то целесообразно рассмотрение двумассной динамической модели машины, где приведенная масса характеризует дробящие звездочки (рис. 3).

Математическое описание движения масс будет дано в следующем виде:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 &= M_1 - M_0, \\ I \cdot \ddot{\varphi}_2 &= M_0 - M, \end{aligned} \quad (14)$$

где I_1 — момент инерции ротора электродвигателя; I — момент инерции узла вала; C — жесткость, определяющая упругие свойства редуктора в динамических расчетах; M_0 — момент, возникающий из-за упругости соединения масс; φ_i — угловое положение i -той массы при повороте; M — реакционный момент от действия аглопи-рога; M_1 — крутящий момент асинхронного двигателя, который рассчитывается по формуле

$$M_1 = M_n \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_n}, \quad (15)$$

где M_n — номинальный крутящий момент; ω_0 — синхронная угловая скорость магнитного поля электродвигателя; ω_n — заявленная угловая скорость якоря двигателя.

$$M_0 = C \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (16)$$

В данном случае

$$\omega(t) = \dot{\varphi}_1(t). \quad (17)$$

МАШИНОСТРОЕНИЕ

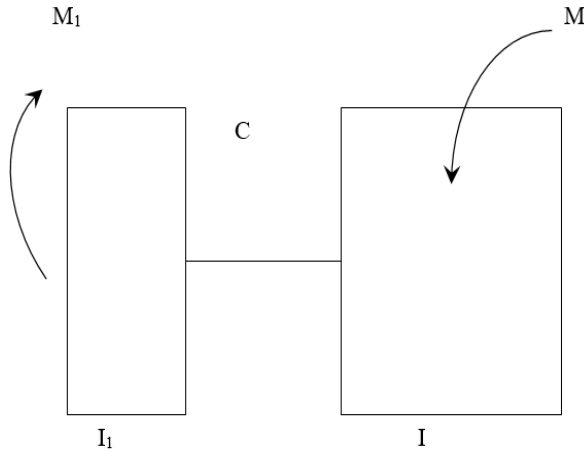


Рисунок 3 — Двумассная модель
одновалковой зубчатой дроби

Тогда соотношения (14) и (16) с применением формулы (15) включает три уравнения с тремя неизвестными φ_1 , φ_2 , M_0 преобразуются таким образом:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_H \cdot \frac{\omega_0 - \dot{\varphi}_1}{\omega_0 - \omega_H} - M_0, \\ I \ddot{\varphi}_2 = M_0 - M. \end{cases} \quad (18)$$

Исключим из уравнений (18) и (16) неизвестные $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$, разделив первое уравнение (18) на I_1 , второе — на I , а потом отняв из полученного первого уравнения второе, и результат умножим на C , а затем продифференцируем:

$$C \cdot (\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) = -\frac{M_H \cdot C \cdot \dot{\varphi}_1}{(\omega_0 - \omega_H) \cdot I_1} - \frac{\dot{M}_0}{I_1} \cdot C - \frac{\dot{M}_0}{I} \cdot C + \frac{\dot{M}}{I} \cdot C.$$

Иначе

$$\ddot{M}_0 + \beta_0^2 \cdot \dot{M}_0 = C \cdot \frac{\dot{M}}{I} - C \cdot \frac{M_H \cdot \dot{\varphi}_1}{I_1 \cdot (\omega_0 - \omega_H)},$$

где β_0 — собственная циклическая частота колебательных движений двумассной системы:

$$\beta_0 = \sqrt{C \cdot \frac{I_1 + I}{I_1 I}}.$$

Для дальнейшего решения к правому соотношению добавим и вычтем

$$\frac{M_H \cdot C}{I_1 \cdot (\omega_0 - \omega_H)} \cdot \ddot{\varphi}_2. \text{ А с учетом того, что } \ddot{\varphi}_2 = \frac{M_0 - M}{I}, \text{ будем иметь:}$$

$$\begin{aligned} & \ddot{M}_0 + \frac{M_H \cdot \ddot{M}_0}{I_1 \cdot (\omega_0 - \omega_H)} + \beta_0^2 \cdot \dot{M}_0 + \\ & + \frac{\beta_0^2 \cdot M_H \cdot M_0}{(I_1 + I_2) \cdot (\omega_0 - \omega_H)} = \\ & = C \cdot \frac{\dot{M}}{I} + \frac{\beta_0^2 \cdot M_H \cdot M}{(I_1 + I) \cdot (\omega_0 - \omega_H)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Приняв $T = \frac{I_1 + I}{\gamma}$ и $m = \frac{I_1}{I_1 + I}$, уравнение (19) представим в виде

$$\begin{aligned} & \ddot{M}_0 + \frac{\ddot{M}_0}{mT} + \beta_0^2 \cdot \dot{M}_0 + \\ & + \frac{\beta_0^2 \cdot M_0}{T} = \frac{\dot{M} \cdot C}{I} + \frac{\beta_0^2 \cdot M}{T}. \end{aligned} \quad (20)$$

Общее решение дифференциального уравнения (20) запишем в виде

$$M_0(t) = M_{01}(t) + M_{02}(t), \quad (21)$$

где M_{01} — общее решение однородного уравнения (22):

$$\ddot{M}_{01} + \frac{\ddot{M}_{01}}{m \cdot t} + \beta_0^2 \cdot \dot{M}_{01} + \frac{\beta_0^2 \cdot M_{01}}{T} = 0; \quad (22)$$

$M_{02}(t)$ — частное решение неоднородного уравнения (20).

Функцию $M_{01}(t)$ найдем в виде

$$M_{01}(t) = A \cdot e^{kt}, \quad (23)$$

где k — корень характеристического уравнения

МАШИНОСТРОЕНИЕ

$$F(k) \equiv k^3 + \frac{k^2}{m \cdot T} + \beta_0^2 \cdot k + \frac{\beta_0^2}{T} = 0 \quad (24)$$

или же

$$F(k) \equiv k^3 + \frac{\gamma \cdot k^2}{I_1} + \beta_0^2 \cdot k + \frac{\gamma \cdot \beta_0^2}{I_0} = 0, \quad (25)$$

где $I_0 = I_1 + I$.

Далее вычислим [9]

$$F \cdot \left(-\frac{\gamma}{I_1} \right) = -\frac{\beta_0^2 \cdot \gamma \cdot I}{I_0 \cdot I_1} < 0;$$

$$F \cdot \left(-\frac{\gamma}{I_1} \right) = \frac{\gamma^3 \cdot I}{I_1 \cdot I_0^2} > 0.$$

Таким образом, отрицательный корень уравнения (23) находится на интервале $\left[-\frac{\gamma}{I_1}, -\frac{\gamma}{I_0} \right]$.

Так как в одновалковой зубчатой дробилке $I \gg I_1$, то имеет место неравенство

$$\frac{\gamma^2}{(I_1 + I)^2 \cdot \beta_0^2} = \frac{\gamma^2 \cdot I_1 \cdot I}{C \cdot (I_1 + I)^3} \ll 1.$$

Согласно [5] корни k определяются приблизительно по формулам

$$k_1 = -\frac{\gamma}{I_1 + I},$$

$$k_{2,3} = \alpha \pm i \cdot \beta = -\frac{\gamma \cdot I}{2 \cdot I_1 \cdot I_0} \pm \pm i \cdot \sqrt{\beta_0^2 - \left(\frac{\gamma}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{I}{I_0} + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot I}{I_1 \cdot I_0} \right)^2}.$$

Откуда

$$M_{01}(t) = A_1 \cdot e^{-\frac{\gamma}{I_1 + I} \cdot t} + e^{\alpha \cdot t} (A_2 \cdot \cos \beta \cdot t + A_3 \cdot \sin \beta \cdot t), \quad (26)$$

где A_1, A_2, A_3 — постоянные величины, зависящие от начальных условий при $t = 0$.

Найдём частное решение M_{02} уравнения (16), которое отвечает периодической нагрузке

$$M_{02}(t) = \sum M_{rk}(t),$$

где M_{rk} — частное решение, когда в качестве $M(t)$ выбирают

$$\begin{cases} M(t) = b_k \cdot \sin P_k \cdot t, \\ P_k = \frac{k \cdot \pi}{l}, \\ l = \frac{\pi}{240}; \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \overset{\bullet\bullet\bullet}{M}_{rk} + \frac{1}{m \cdot T} \overset{\bullet\bullet}{M}_{rk} + \beta_0^2 \cdot M_{rk} + \frac{\beta_0^2 \cdot M_{rk}}{T} = \\ = b_k \cdot \left(\frac{C}{I} \cdot P_k \cdot \cos P_k \cdot t + \frac{\beta_0^2}{T} \cdot \sin P_k \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Решение (28) ищем в виде

$$M_{r.k}(t) = B_k \cdot \cos P_k \cdot t + C_k \cdot \sin P_k \cdot t. \quad (29)$$

Вычислим производные от функции (28):

$$\overset{\bullet}{M}_{rk} = -P_k B_k \sin P_k t + P_k C_k \cos P_k t,$$

$$\overset{\bullet\bullet}{M}_{rk} = -P_k^2 B_k \cos P_k t - P_k^2 C_k \sin P_k t,$$

$$\overset{\bullet\bullet\bullet}{M}_{rk} = P_k^3 B_k \sin P_k t - P_k^3 C_k \cos P_k t.$$

Подставим полученные выражения в формулу (28):

$$\begin{aligned} B_k \cdot P_k^3 \cdot \sin P_k \cdot t - C_k \cdot P_k^3 \cdot \cos P_k \cdot t + \frac{1}{m \cdot T} \times \\ \times (-B_k \cdot P_k^2 \cdot \cos P_k \cdot t - C_k \cdot P_k^2 \cdot \sin P_k \cdot t) + \\ \beta_0^2 \cdot (-B_k \cdot P_k \cdot \sin P_k \cdot t + C_k \cdot P_k \cdot \cos P_k \cdot t) + \\ + \frac{\beta_0^2}{T} (B_k \cdot \cos P_k \cdot t + C_k \cdot \sin P_k \cdot t) = \\ = b_k \cdot \left(\frac{C}{I} \cdot P_k \cos P_k \cdot t + \frac{\beta_0^2}{T} \cdot \sin P_k \cdot t \right). \end{aligned} \quad (30)$$

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Приравняем в уравнении (30) коэффициенты при $\sin P_k \cdot t$ и $\cos P_k \cdot t$ соответственно, получим выражение

$$\begin{cases} B_k P_k^3 - \frac{C_k P_k^2}{mT} - B_k P_k \beta_0^2 + \frac{\beta_0^2}{T} C_k = b_k \frac{\beta_0^2}{T}, \\ -C_k P_k^3 - B_k \frac{P_k^2}{mT} + C_k P_k \beta_0^2 + \frac{\beta_0^2}{T} B_k = b_k \frac{C}{I} P_k \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} B_k \left(P_k^3 - P_k \beta_0^2 \right) + C_k \left(\frac{\beta_0^2}{T} - \frac{P_k^2}{mT} \right) = b_k \frac{\beta_0^2}{T}, \\ B_k \left(\frac{\beta_0^2}{T} - \frac{P_k^2}{mT} \right) + C_k \left(P_k \beta_0^2 - P_k^3 \right) = b_k \frac{C}{I} P_k, \end{cases} \quad (31)$$

откуда

$$\begin{cases} B_k = b_k \cdot \frac{\Delta_B}{\Delta}, \\ C_k = b_k \cdot \frac{\Delta_C}{\Delta}, \end{cases} \quad (32)$$

где

$$\begin{cases} \Delta = \left(P_k^3 - P_k \beta_0^2 \right)^2 - \left(\frac{\beta_0^2}{T} - \frac{P_k^2}{mT} \right)^2, \\ \Delta_B = \frac{P_k}{T} \left[\beta_0^2 \left(\beta_0^2 - P_k^2 \right) - \frac{C}{I} \left(\beta_0^2 - \frac{P_k^2}{m} \right) \right], \\ \Delta_C = \frac{C}{I} P_k \left(P_k^3 - P_k \beta_0^2 \right) - \frac{\beta_0^2}{T^2} \left(\beta_0^2 - \frac{P_k^2}{m} \right). \end{cases}$$

В результате будем иметь

$$\begin{aligned} M_{rk}(t) &= \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \times \\ &\times \left(\frac{B_k \cdot \cos P_k \cdot t}{\sqrt{B_k^2 + C_k^2}} + \frac{C_k \cdot \sin P_k \cdot t}{\sqrt{B_k^2 + C_k^2}} \right) = \\ &= \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \cdot \sin(P_k \cdot t + \psi_k). \end{aligned}$$

Здесь

$$\psi_k = \arcsin \left(\frac{B_k}{\sqrt{B_k^2 + C_k^2}} \right).$$

Окончательно

$$M_{rk}(t) = b_k \cdot D_k \cdot \sin(P_k \cdot t + \psi_k), \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} D_k &= \frac{\sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_C^2}}{\Delta}, \\ \psi_k &= \arcsin \left(\frac{\Delta_B}{\sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_C^2}} \right). \end{aligned} \quad (34)$$

Таким образом,

$$M_{02}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot D_k \cdot \sin(P_k \cdot t + \psi_k). \quad (35)$$

Общее решение исходной задачи представим так:

$$\begin{aligned} M_0(t) &= A_1 \cdot e^{-\frac{\gamma \cdot t}{I_1 + I}} + \\ &+ e^{\alpha \cdot t} (A_2 \cdot \cos \beta \cdot t + A_3 \cdot \sin \beta \cdot t) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot D_k \cdot \sin(P_k t + \varphi_k). \end{aligned} \quad (36)$$

Из зависимостей (36) и (35) следует, что при $\Delta = 0$ величина D_k будет бесконечно возрастать, что соответствует наступлению резонанса. Следовательно, для недопущения негативного влияния резонансных явлений частоты вращения узла ротора дробилки необходимо условие $\Delta \neq 0$:

$$\begin{aligned} \Delta &= \left(P_k^3 - P_k \cdot \beta_0^2 \right)^2 - \\ &- \left(\frac{\beta_0^2}{T} - \frac{P_k^2}{m \cdot T} \right)^2 \neq 0. \end{aligned} \quad (37)$$

Показатель (37) $\eta = |D_k|$ используется в качестве коэффициента динамичности одновалковой зубчатой дробилки и характеризует её амплитудно-частотную характеристику, где ψ_k выступает в виде её фазово-частотных характеристик.

Разработанные много- и двумассная модели могут служить для учета динамических процессов, происходящих в меха-

нической системе одновалковой зубчатой дробилки.

Результаты выполненной работы позволили сделать следующие **выводы**:

1. Аналитическим путем получены математические зависимости, описывающие динамику работы одновалковой зубчатой дробилки в виде много- и двумассной моделей.

2. Многомассная модель, наиболее точно отражающая поведение механической части дробилки, описывается системой уравнений, содержащей девять неоднородных дифференциальных уравнений и девять неизвестных, к которым относятся крутящие моменты M_{12} , M_{23} , M_{34} , ..., M_{89} , $M_{9,10}$, что существенно усложняет работу по её численному решению.

3. Двумассная модель одновалковой зубчатой дробилки, хоть и не обладает такой точностью, как многомассная, однако легко поддается численному решению, что позволяет выполнить оценку сил, действующих на рабочие органы машины.

4. Для исключения вредного влияния резонанса при вращении ротора дробилки может служить коэффициент динамичности машинного агрегата Δ , т. е. её амплитудно-частотная характеристика, когда ротор должен вращаться с такой частотой, чтобы $\Delta \neq 0$.

Дальнейшие исследования будут направлены на выполнение численных расчетов динамических параметров с учетом полученных математических моделей.

Список источников

1. Мороз В. В., Левченко Э. П., Левченко О. А. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата // Современная наука: исследования, технологии, проекты : сборник V международной научно-практической конференции. М. : Научный центр «Олимп», 2015. С. 484–489. EDN UXYLXN
2. Левченко О. А., Левченко Э. П., Зинченко А. М. Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок // Металлургические процессы и оборудование. 2011. № 1 (23). С. 24–29. EDN NDSAUZ
3. Перспективы улучшения фракционного состава доменного агломерата / В. В. Мороз [и др.] // Новые материалы и перспективные технологии : Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием. М. : ООО «Буки Веди», 2018. С. 626–630. EDN DGXRMZ
4. Левченко О. А. Комплексные направления повышения качества агломерата и защиты природной среды // Экология и промышленность России. 2006. № 1. С. 27–29.
5. Мороз В. В., Левченко Э. П., Бондарь Н. А. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2016. С. 271–275. EDN XFTTQH
6. Иванченко Ф. К., Красношарпа В. А. Прикладные задачи динамики машин. К. : Вища шк. Головное изд-во, 1983. 200 с.
7. Рубежанский В. И. Специальные главы теоретической механики: малые колебания систем : учебное пособие. Алчевск : ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2024. 73 с. EDN ZBQXUP
8. Мороз В. В., Рубежанский В. И., Левченко Э. П. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2017. № 7 (50). С. 153–158. EDN TCVLXD
9. Кожеевников С. Н. Динамика машин с упругими звеньями. К. : изд-во акад. наук УССР, 1961. 160 с.

© Левченко О. А., Зинченко А. М., Левченко М. Э., Левченко Э. П., 2025

© Павленко А. Т., 2025

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.,
к.т.н., доц. каф. ГТиБП ДонГТУ Смекалыным Е. С.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Левченко Оксана Александровна, канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: oksamito@rambltr.ru

Зинченко Андрей Михайлович, канд. экон. наук, доцент, зав. каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Павленко Александр Тимофеевич, канд. техн. наук, доцент, зам. директора института гражданской защиты
Луганский государственный университет им. В. Даля,
г. Луганск, Россия

Левченко Максим Эдуардович, студент гр. ММК-21з каф. машин металлургического комплекса
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Левченко Эдуард Петрович, канд. техн. наук, доцент, доц. каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

***Levchenko O. A., Zinchenko A. M.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: oksamito@rambltr.ru), **Pavlenko A. T.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, Russia), **Levchenko M. E., Levchenko E. P.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia)

MODELLING THE DYNAMICS OF A SINGLE-ROLL TOOTHED CRUSHER

This study focuses on developing a mathematical model to describe the dynamics of a single-roll toothed crusher. Multi-mass and two-mass mathematical models are considered, which enable the resonance-free machine operation to be estimated based on the dynamic's coefficient of the machine assembly.

Key words: single-roll toothed crusher, dynamics, multi-mass model, two-mass model, resonance, dynamic's coefficient of the machine assembly.

References

1. Moroz V. V., Levchenko E. P., Levchenko O. A. Prospects for improving blast-furnace smelting efficiency by stabilizing the fractional composition of crushed sinter [Perspektivy povysheniya effektivnosti domennoj plavki putem stabilizacii frakcionnogo sostava droblenogo aglomerata]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, tekhnologii, projekty : sbornik V mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. M. : Nauchnyj centr "Olimp", 2015. Pp. 484–489. EDN UXYLXN
2. Levchenko O. A., Levchenko E. P., Zinchenko A. M. State and main directions for the development technical level of a single-roll toothed crusher designs [Sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya tekhnicheskogo urovnya konstrukcij odnovalkovykh zubchatykh drobilok]. *Metallurgicheskie processy i oborudovanie*. 2011. No. 1 (23). Pp. 24–29. EDN NDSAUZ
3. Moroz V. V. [et al.]. Prospects for the improvement fractional composition of blast-furnace sinter [Perspektivy uluchsheniya frakcionnogo sostava domennogo aglomerata]. *New materials and*

promising technologies : Fourth interdisciplinary scientific forum with international participation. M. : ООО «Buki Vedi», 2018. Pp. 626–630. EDN DGXRMZ

4. Levchenko O. A. Integrated directions for improving sinter quality while protecting the natural environment [Kompleksnye napravleniya povysheniya kachestva aglomerata i zashchity prirodnoy sredy]. *Ekologia i promyshlennost Rossii*. 2006. No. 1. Pp. 27–29.

5. Moroz V. V., Levchenko E. P., Bondar N. A. Method of multistage sinter processing in a single-roll toothed crusher [Sposob mnogostadijnoj obrabotki aglomerata v odnovalkovoj zubchatoj drobilke]. *Sovremennaya metallurgiya novogo tysyachiletia : sbornik nauchnyh trudov II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Lipetsk : Lipetsk State Technical University, 2016. Pp. 271–275. EDN XFTTQH

6. Ivanchenko F. K., Krasnoshapka V. A. Applied problems in machine dynamics [Prikladnye zadachi dinamiki mashin]. K. : Vishcha shk. Golovnoe izd-vo, 1983. 200 p.

7. Rubezhanskiy V. I. Special chapters of theoretical mechanics: small oscillations of systems : textbook [Special'nye glavy teoreticheskoy mekhaniki: malye kolebaniya sistem : uchebnoe posobie]. Alchevsk : Donbass State Technical University, 2024. 73 p. EDN ZBQXUP

8. Moroz V. V., Rubezhanskiy V. I., Levchenko E. P. Analyzing organizational capabilities of multistage operation of single-roll toothed crusher [Analiz obespecheniya vozmozhnostej organizacii mnogostadijnoj raboty odnovalkovoj zubchatoj drobilki]. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2017. No. 7 (50). Pp. 153–158. EDN TCVLXD

9. Kozhevnikov S. N. Dynamics of machines with elastic links [Dinamika mashin s uprugimi zven'yami]. K. : Izd-vo akad. nauk USSR, 1961. 160 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Levchenko Oksana Aleksandrovna, PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Technology and Organization of Machine-building Engineering
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: oksamito@rambltr.ru

Zinchenko Andrey Mikhailovich, Assistant Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Machine-building Engineering
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Pavlenko Aleksandr Timofeevich, Assistant Professor, Deputy Director of the Institute of Civil Defense
Lugansk State University named after V. Dahl,
Lugansk, Russia

Levchenko Maxim Eduardovich, Student of the group MCM-21ems, Department of Metallurgical Complex Machine
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Levchenko Eduard Petrovich, PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Technology and Organization of Machine-building Engineering
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Петров П. А., *Зозуля Ф. С., Егоров Е. А., Петров М. П.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: Zotfer@mail.ru*

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

В работе представлен проект системы для подачи шлакообразующей смеси (ШОС) на поверхность жидкого металла в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ); приведено обоснование необходимости механизации и автоматизации изучаемого процесса; сформулированы основные требования, предъявляемые к проектируемым установкам; дан анализ существующих технических решений ведущих мировых и отечественных производителей машин для защиты зеркала металла от вторичного окисления; представлена методика расчета и определены основные технические параметры и конструкционные особенности установки механизированной подачи ШОС.

Ключевые слова: кристаллизатор, заготовка, шлакообразующая смесь, механизм подачи ШОС, механизм распределения ШОС, модель механизированной установки подачи ШОС.

В современном мире крупные металлургические компании, сталелитейные комбинаты и небольшие предприятия (минизаводы) постоянно совершенствуют технологии разливки стали и переходят на новое оборудование. Использование машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) связано с повышением производительности разливки стали и качества выпускаемой продукции.

Одним из обязательных условий для достижения необходимого качества литой заготовки является применение технологии защиты жидкого металла от окисления путем подачи на его поверхность шлакообразующей смеси (ШОС). Благодаря использованию специального состава ШОС уменьшается силовое взаимодействие между кристаллизатором и заготовкой, предотвращается повторное окисление металла и повышается равномерность отвода тепла от заготовки к стенкам кристаллизатора [1].

Существует ряд металлургических предприятий, на установках непрерывной разливки которых подача смеси в кристаллизатор МНЛЗ осуществляется вручную при помощи деревянного гребка, что не позволяет равномерно распределить смесь по поверхности жидкого металла в кристаллиза-

торе и требует наличия оператора непосредственно в зоне истечения жидкого металла из промежуточного ковша в кристаллизатор, а это отрицательно сказывается на безопасности труда обслуживающего персонала. Кроме того, влияние человеческого фактора может приводить к возникновению дефектов на поверхности отливаемой заготовки [2]. Альтернативой ручной подаче ШОС является механическая установка, способная увеличить точность дозирования и улучшить качество распределения подаваемой смеси в кристаллизатор.

Целью данной работы является разработка и обоснование основных конструктивных параметров системы для подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ.

Анализ литературных данных [3–6] позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к установкам для подачи шлакообразующей смеси:

- возможность механизации и автоматизации работы установки подачи ШОС;
- блочно-модульная конструкция машины;
- режим парковки исполнительного механизма (либо всей установки) для облегчения доступа к кристаллизатору;

– возможность быстрой смены типа ШОС (использование как гранулированной, так и порошкообразной смеси).

Решение проблемы качественного распределения и подачи смеси можно разделить на несколько этапов.

Во-первых, это создание механизированной установки подачи ШОС, обладающей необходимыми физическими и кинематическими показателями, способной обеспечить все штатные варианты функционирования машины непрерывной разливки стали.

На следующем этапе требуется полная автоматизация процесса подачи смеси с использованием датчиков, позволяющих непрерывно получать данные основных технологических параметров установки, а также контроллеров расхода ШОС и траектории движения исполнительного механизма, путем обработки сигнала посредством специально разработанного программного обеспечения с целью поддержания оптимального режима поступления ШОС на поверхность жидкого металла в кристаллизаторе.

К основным достоинствам автоматизированной подачи ШОС следует отнести:

- регулирование в широких пределах объемного расхода ШОС в кристаллизатор;
- возможность подачи смеси сразу на несколько ручьев;
- снижение расхода ШОС до 15 % в зависимости от типа установки [7].

Существующие системы подачи ШОС, представленные зарубежными компаниями и отечественными производителями, можно разделить на два основных типа: пневматические и механические (табл. 1).

На рынке существуют коммерческие предложения от проектно-конструкторских бюро и научно-исследовательских компаний, занимающихся подобными разработками; в частности, интерес представляет французская компания Imerys [8]. Пневматическая система, выпускаемая данной фирмой, состоит из стационарных бункеров с установленным внутри ножом для резки пакетов, устройства взвешивания и

распределения смеси по ручьям МНЛЗ и системы подачи смеси, снабженной насадками. В свою очередь, установка российской фирмы Ekos [9] отличается компактностью, поскольку бункер и дозирующая система установлены в одном корпусе. Система рассчитана на работу с несколькими типами ШОС. Характерным решением подачи ШОС сжатым воздухом является система MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine, разработанная китайской компанией Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. [10], отличительной особенностью которой является система с совмещенными бункерами. Одновременно объединяющим элементом и дозирующей системой является шнековый механизм, расположенный под бункерами. Помимо пневматической системы компания Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. выпускает механический аналог — установку MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine [11]. В качестве базы она использует тележку с расположенным на ней бункером и двумя шнековыми дозаторами, которые одновременно распределяют смесь по обе стороны кристаллизатора.

На металлургических предприятиях нашего региона одними из первых разрабатывать и внедрять подобные системы начали сотрудники кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» [12, 13]. Отличительной особенностью опытно-промышленных образцов, разработанных на кафедре МОЗЧМ, является работа установок подачи ШОС с несколькими типами смесей, простота конструкции и экономия расхода смеси по сравнению с аналогами.

В свою очередь, сотрудники кафедры машин металлургического комплекса ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в тесном взаимодействии с донецкими коллегами продолжают активно вести разработки в указанном направлении. К исследовательской работе были подключены магистранты и аспиранты кафедр вуза (Зозуля Федор, Егоров Егор, Мамсуй Руслан, Нижегородов Даниил, Муленко Лео-

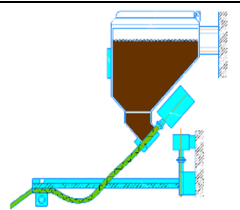
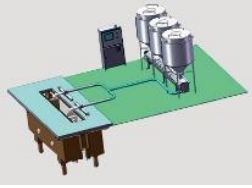
МАШИНОСТРОЕНИЕ

нид, Петров Максим), чему в определенной мере способствовало их участие в федеральном проекте «Платформа университетского технологического предпринимательства» в рамках межвузовской акселерационной

программы поддержки проектных команд и студенческих инициатив «Акселератор БГТУ им. В. Г. Шухова». По итогам конкурса команда ДонГТУ вышла в финал и выиграла призовое место.

Таблица 1

Сравнение систем подачи ШОС отечественных и зарубежных производителей

Авторы проекта (компания разработчик)	Возможность работы с различными типами ШОС	Управляемая площадь покрытия ШОС	Режим парковки	Блочно-модульная конструкция	Схема установки
Проект команды Gambit (ДонГТУ)	Да	Да	Да	Да	
Кафедра МОЗЧМ ФГБОУ ВО «ДонНТУ»	Да	Да	Да	Нет	
Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd.	Да	Да	Да	Нет	
Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd.	Нет	Нет	Нет	Нет	
Ekos	Да	Да	Нет	Нет	
Imerys	Да	Нет	Нет	Нет	

Дальнейшее развитие проекта потребовало уточнения технического задания и более тесной коммуникации членов команды со специалистами металлургического комбината. После посещения предприятия и общения с представителями отделения непрерывной разливки стали кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК» был выдвинут ряд дополнительных требований к конструкции системы подачи ШОС, которые заключались в наличии бункера увеличенного объема, особенностях крепления исполнительного механизма к раме тележки промежуточного ковша, а также в раздельном исполнении бункера и механизма подачи ШОС. Кроме того, имеются определенные проблемы с механизацией процесса замены сталеразливочных стаканов промежуточного ковша [14].

В итоге с учетом опыта проектирования подобных установок и пожеланий эксплуатационного персонала ООО «ЮГМК» был разработан проект установки подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (рис. 1), в

большей мере удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям.

Установка состоит из бункера ШОС 1, электромагнитного встряхивателя 2, мотор-редуктора 3 с регулируемой частотой вращения выходного вала, приводящего в движение гибкий шнековый дозатор 5, поворотной консоли 6 с приводом 4, который обеспечивает равномерное движение консоли вдоль широкой стенки кристаллизатора. Дозирующая система оснащена подающим носком 8, позиционирование которого осуществляется посредством пневмопривода 7.

Система работает по следующему принципу. ШОС из бункера 1 подается к зеркалу металла в кристаллизаторе по гибкому металлорукаву, внутри которого вращается спиральный шнек 5, приводимый во вращение мотор-редуктором 3. На разгрузочном участке гибкого шнекового дозатора 5 закреплен подающий носок 8. Требуемый расход смеси регулируется посредством изменения частоты вращения приводного вала. Во избежание слеживания смеси в бункере 1 имеется электромагнитный встряхиватель 2.

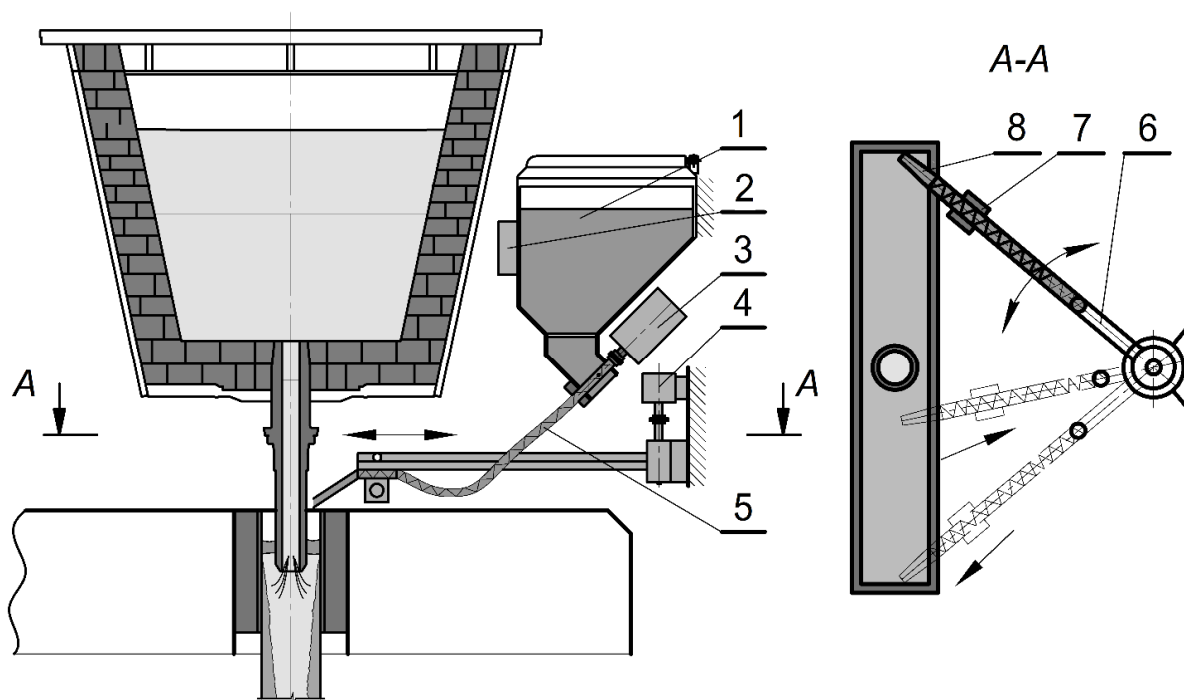


Рисунок 1 — Установка подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Качественное распределение ШОС, поступающей из подающего носка 8 к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе, реализовано посредством механизма поворота консоли 6 (механизм, отвечающий за распределение смеси). Конструктивной особенностью является переменная длина консоли 6, которая обеспечивается путем ее выдвижения приводом 7. Удлинение консоли необходимо для равномерного распределения смеси как в центре кристаллизатора, так и по его периферии.

Движение консоли 6, а также ее парковку обеспечивает привод 4, который задает необходимую скоростью поворота консоли относительно ее оси вращения. Поддержание постоянной линейной скорости движения рабочего органа (носка) вдоль широкой стенки кристаллизатора регулируется контроллером, синхронизирующим скорость движения подающего носка 8 с углом, скоростью поворота и удлинением консоли 6.

Разработка новой конструкции и определение основных параметров проектируемой установки механизированной подачи шлакообразующей смеси к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе основывались на выборе исходных данных, применительно к условиям двухручьевого слябовой МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК».

Мощность, необходимая для вращения гибкого шнека механизма подачи ШОС, определяется выражением

$$N_1 = k_{np} \cdot \frac{M_1 \cdot \omega_{ш}}{\eta}, \quad (1)$$

где M_1 — момент сопротивления вращению шнека; η — КПД механизма вращения шнека; $\omega_{ш}$ — угловая скорость вращения шнека; k_{np} — коэффициент запаса мощности двигателя для преодоления перегрузок, $k_{np} = 1,2 \div 1,3$ [15].

Частота вращения шнека, согласно данным [16], может изменяться в диапазоне $n_{ш}$ 300...400 об/мин.

При вращении гибкого шнека его витки своей наружной кромкой сдвигают слой мел-

кодисперсного материала вдоль внутренней поверхности гибкого трубопровода, в результате чего на кромку действует сила F_{cd} , значение которой пропорционально площади сдвигаемого слоя S_{cd} и напряжению сдвига транспортируемой шлакообразующей смеси τ_{cd} [17]:

$$F_{cd} = S_{cd} \cdot \tau_{cd}. \quad (2)$$

Ввиду отсутствия в открытых источниках данных о механических свойствах различных типов ШОС определение τ_{cd} может вызывать определенные трудности. С учетом того, что шлакообразующая смесь по физическим характеристикам напоминает песок, в расчетах принимаем усредненное значение напряжения сдвига транспортируемой смеси $\tau_{cd} = 3$ кПа [18].

Момент сопротивления вращению шнека:

$$M_1 = F_{cd} \cdot \mu \cdot D_{ш} / 2, \quad (3)$$

где $D_{ш}$ — наружный диаметр витков шнека; μ — коэффициент трения поверхности витка шнека о шлакообразующую смесь (согласно данным [19], коэффициент внешнего трения $\mu = 0,32 \div 0,8$).

Для достижения требуемого расхода смеси необходим гибкий шнек с определенным диаметром $D_{ш}$ и шагом витков, способный транспортировать заданное количество смеси.

В работе [16] представлены зависимости объемной подачи Q_v шнека за один оборот спирали от конструктивных параметров транспортирующего устройства, для гибких шнеков с соотношениями диаметра трубопровода D_p , диаметра $D_{ш}$ и шага s витков спирали, составлявшими (в мм): $D_p/D_{ш} = (25/18; 20/16; 15/11)$ и $s/D_{ш} = (0,5; 0,7; 1)$. С целью получения аналитических зависимостей $Q_v = f(D_p/D_{ш}, s/D_{ш})$ в области $D_{ш} > 40$ мм была создана аддитивная модель с выбранными весовыми коэффициентами (рис. 2), построенная на основании полученных по данным [16] регрессионных зависимостей.

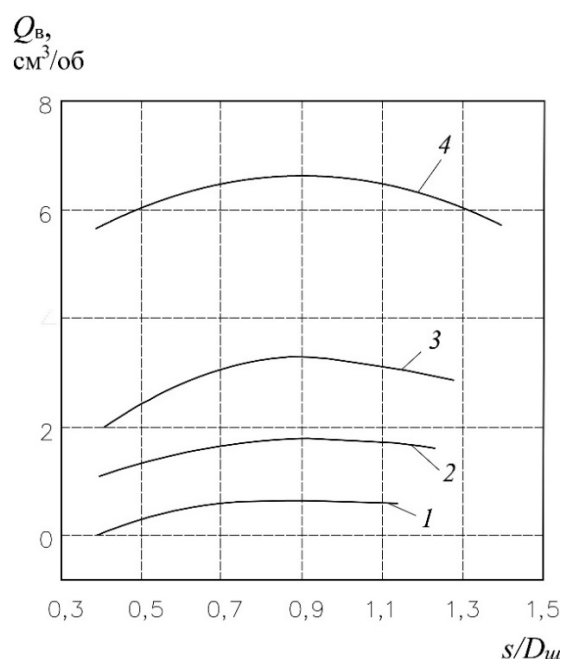


Рисунок 2 — Изменение объемной подачи шнека Q_v от конструктивных параметров транспортирующего устройства при D_p/D_u : 1 — 15/11; 2 — 20/16; 3 — 25/18; 4 — 45/40

Расход смеси за один оборот витка шнека ($\text{см}^3/\text{об}$) вычисляется по формуле

$$Q_v = \frac{Q}{(60 \cdot n_u)} \quad (4)$$

С учетом того, что объемный расход смеси ($\text{см}^3/\text{ч}$):

$$Q = q_{см} \frac{10^6}{\gamma_c}, \quad (5)$$

где γ_c — насыпная плотность шлакообразующей смеси $\gamma_c = 550 \div 650 \text{ кг/м}^3$ [1];

$q_{см}$ — расход ШОС (кг/ч).

Задавшись отношением $D_p/D_u = 45/40$ и $s/D_u = 0,9$, что соответствует максимальному расходу $Q_v = 6,6 \text{ см}^3/\text{об}$ (рис. 2), можно определить расход $q_{см}$:

$$q_{см} = \frac{60 Q_v}{10^6} n_u \gamma_c \quad (6)$$

Таким образом, на основании полученной аддитивной модели, задавшись параметрами гибкого шнека, можно получить расход ШОС $q_{см}$, который следует сопоставить с регламентируемыми значениями расхода ШОС [$q_{см}$]. Например, для слябовой МНЛЗ с производительностью до 2,6 млн тонн в год среднечасовой расход смеси (с учетом рекомендаций расхода ШОС на тонну разливаемой стали $0,3 \div 0,6 \text{ кг/т}$ [20]) составит [$q_{см}$] = $89 \div 178 \text{ кг/ч}$.

Полученная в ходе расчета мощность двигателя вращения гибкого шнека механизма подачи ШОС сопоставима с энергосиловыми параметрами привода аналогичных установок (табл. 2).

На рисунке 4 приведена расчетная схема механизма поворота консоли, являющегося частью механизма распределения смеси, состоящего из: привода 1, от которого крутящий момент через муфту 2 передается к вертикальной оси 4, установленной в двух подшипниковых опорах 3, которые закреплены в неподвижном корпусе 5. Зафиксированная на оси 4 поворотная консоль 6 оборудована приводом ее удлинения, посредством которого реализуется радиальное перемещение подающего носка.

Таблица 2

Энергетические показатели привода подачи ШОС различных установок

Проект команды Gambit (ДонГТУ)	Установка для обслуживания бломовой МНЛЗ [17]	Усовершенствованная система дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ [5]	Система дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ для отливки заготовок сверхкрупного сечения [21]
103 Вт	150 Вт	300 Вт*	500 Вт*

*Фактическая мощность, необходимая для вращения одного шнека составила 150–200 Вт, так как для вращения шнека использовался привод, одновременно вращающий несколько шнеков (либо шнек и ворошитель).

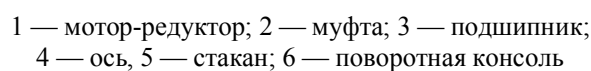


Рисунок 4 — Расчетная схема механизма распределения ШОС

k_3 — коэффициент запаса мощности двигателя для преодоления перегрузок, $k_3 = 1,3$;

$$N_2 = k_3 \cdot \frac{M_{mp} \cdot \omega}{\eta}, \quad (7)$$

w — угловая скорость;

η — КПД привода.

Угловая скорость:

$$\omega = \frac{v}{\left(k + \frac{H}{2}\right)}, \quad (8)$$

где H — максимальная толщина отливаемого слитка;

k — расстояние от оси поворота консоли до фиксированной стенки кристаллизатора (рис. 4);

v — скорость поступательного движения носка относительно широкой стенки кристаллизатора.

Момент трения в подшипниках:

$$M_{тр} = R \cdot f \cdot \frac{d}{2}, \quad (9)$$

где d — диаметр трения в подшипнике;

R — радиальная нагрузка на подшипник;

f — коэффициент трения для шарикоподшипников [22].

Закрепленное на консоли оборудование весом Q , относительно оси будет создавать момент, уравновешиваемый парой сил в подшипниках. При этом реакция R в опоре подшипника составит:

$$R = \frac{Q \cdot l_{max}}{h}, \quad (10)$$

где h — длина оси; l_{max} — максимальная длина поворотной консоли.

Особенность новой конструкции системы автоматической подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ состоит в применении телескопического механизма установки носка на поворотной консоли механизма распределения ШОС. Максимальное удлинение консоли равно Δ_{max} (рис. 4). В начальном положении, соответствующем крайнему выдвиганию консоли, ее длина максимальна и равна l_{max} . При движении поворотной консоли совместно с распределительным носком вдоль широкой стенки кристаллиза-

тора из крайнего левого положения (позиция a на рис. 4) ($\varphi_i = -\varphi_{max}$) в крайнее правое положение ($\varphi_i = +\varphi_{max}$) (позиция z на рис. 4) производится подача и распределение ШОС. При постепенном повороте консоли от периферии к центру кристаллизатора (произвольное положение — рис. 4, поз. b) ее удлинение будет находиться в пределах $\Delta_0 < \Delta_i < \Delta_{max}$. В центральном положении (рис. 4, поз. $в$) консоль имеет минимальное удлинение Δ_0 . А поскольку в центре кристаллизатора находится погружной стале-разливочный стакан, подающий носок постепенно задвигается и консоль укорачивается до размера l_{min} .

Максимальный угол φ_{max} отклонения консоли от центрального положения:

$$\varphi_{max} = \arctan\left(\frac{B}{2k + H}\right), \quad (11)$$

где B — максимальная ширина отливаемого слитка.

Для описания траектории движения носка относительно широкой стенки кристаллизатора было получено выражение, определяющее текущую длину консоли l_i (рис. 4) в зависимости от угла φ_i поворота консоли ($-\varphi_{max} < \varphi_i < \varphi_{max}$) и от размеров сечения ($H \times B$) отливаемого слитка:

$$l_i = \sqrt{x^2 + y^2} = y \sqrt{tg^2 \varphi_i + 1}, \quad (12)$$

где $y = (k + H/2)$ — расстояние от оси поворота консоли до оси x_1-x_1 .

Откуда легко определить требуемое удлинение консоли Δ_i в зависимости от угла поворота φ_i :

$$\Delta_i = y \sqrt{tg^2 \varphi_i + 1} - l_{min}. \quad (13)$$

Таким образом, были обоснованы и получены основные конструкционные параметры разработанной системы механизированной подачи ШОС. Техническая характеристика механизмов проектируемой установки представлена в таблице 3.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 3

Техническая характеристика механизма подачи и распределения ШОС проектируемой установки

Наименование параметра	Значение
Механизм вращения гибкого шнека	
Сила $F_{сд}$, Н	605,76
Момент сопротивления вращению гибкого шнека, Нм	7,47
Мощность привода, Вт	103,94
Угловая скорость вращения гибкого шнека, c^{-1}	10,02
Наружный диаметр витков гибкого шнека, мм	40
Шаг витков, мм	40
Расход ШОС $q_{см}$, кг/ч	103
Механизм распределения смеси	
Мощность привода, Вт	0,501
Угловая скорость, c^{-1}	0,104
Момент трения в подшипниках, Нм	2,76
Реакция в опоре подшипников, кН	5,52
Максимальная/минимальная длина консоли, мм	1,625/1,24
Угол поворота консоли $-\varphi_{max}/+\varphi_{max}$	$\pm 54,3^\circ$

В результате проведенного анализа систем подачи ШОС отечественных и зарубежных производителей с учетом практических рекомендаций и производственного опыта эксплуатации подобных машин разработан проект установки для слябовой МНЛЗ, соответствующий современным требованиям механизации и автоматизации процесса подачи ШОС к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе.

Также предложена аддитивная модель объемной подачи шнека Q_v в зависимости от конструктивных параметров транспортирующего устройства.

Полученные данные расчетной мощности привода и траектории движения консоли будут использованы для построения натурной модели и проведения дополнительных исследований.

Список источников

1. Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Ячиков И. М. *Непрерывная разливка сталей : монография*. 3-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 732 с. EDN MXLUVU
2. Ботников С. А. *Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла*. 2-е изд. Волгоград, 2011. 97 с.
3. Новые системы дозированной подачи порошкообразных и гранулированных шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. 2009. № 2 (16). С. 34–38. EDN NVXFJN
4. Еронько С. П. Усовершенствованная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. № 4 (34). С. 74–81. EDN RQQHKK
5. Еронько С. П., Ющенко М. В. *Высокоэффективная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ // Инновационные перспективы Донбасса : материалы международной научно-практической конференции, Донецк, 20–22 мая 2015 года*. Донецк : ДонНТУ, 2015. Т. 3. С. 32–37. EDN SSIUYP
6. Ганин Д. Р., Лицин К. В., Шевченко Е. А. Обзор и анализ устройств для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 1 (1417). С. 58–65. EDN YSCZOO

7. Еронько С. П., Цыхмистро Е. С., Назаренко В. В. Проектирование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ // Материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов по направлению «Машиноведение» : материалы ВУЗовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Посвящается 100-летию ДонНТУ, Донецк, 11 июня 2020 года. Донецк : ДонНТУ, 2020. С. 20–23. EDN DHNOQF
8. Mold Flux Feeders [Electronic resource] // Imerys : [website]. [2019]. URL: <http://castmysteel.de/mold-flux-feeders/>.
9. Автоматическая система подачи ШОС [Электронный ресурс] // Ekos : [сайт]. [2022]. URL: <https://ekos.com.ru/uslugi/mashina-dlya-podachi-shos/>.
10. MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine [Electronic resource] // Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. : [website]. [2022]. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861025.html>.
11. MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine [Electronic resource] // Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. : [website]. [2022]. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861024.html>.
12. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слывовых МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Металлург. 2020. № 3. С. 51–57. EDN WEBOZB
13. Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : Бюл. ин-та «Черметинформация». 2020. Т. 76. № 10. С. 994–1003. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-10-994-1003. EDN PAOYAH
14. Еронько С. П., Ошовская Е. В., Петров П. А., Петров М. П. Модельная проверка функционирования разработанной системы быстрой смены погружных стаканов при непрерывном литье слывовой заготовки // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции (23–24 октября 2024 г.) / под общ. ред. В. Н. Сишдова. Алчевск : ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2024. С. 181–184. EDN FOXKUB
15. Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. 2-е изд., перераб. и доп. Мн. : Вышэйш. шк., 1983. 350 с.
16. Экспериментальные исследования рабочих параметров спиральных шнеков для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. В. Юценко, Б. И. Стародубцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 9. С. 33–40. DOI: 10.20535/S0021347014040037. EDN SQTAXN
17. Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. С. Цыхмистро, П. А. Петров, Ф. С. Зозуля // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24 (67). С. 91–98. EDN AQHWRC
18. Крамаренко В. В. Грунтоведение : учебное пособие. Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2011. 472 с.
19. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах : учебное пособие / И. В. Горюшинский [и др.] ; под общ. ред. И. В. Горюшинского. Самара : СамГАПС, 2003. 232 с.
20. Шаповалов А. Н. Теория и технология разлики стали : учебное пособие. Новотроицк : НФ НИТУ «МИСИС», 2024. 128 с.
21. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства : учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.
22. Справочник-каталог / под ред. В. Н. Нарышкина и Р. В. Коросташевского. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.

© Петров П. А., Зозуля Ф. С., Егоров Е. А., Петров М. П., 2025

Рекомендована к печати

**д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. В. Я. Седуша ДонНТУ Еронько С. П.,
к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.**

Статья поступила в редакцию 30.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Зозуля Федор Сергеевич, аспирант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Zotfer@mail.ru

Егоров Егор Александрович, магистрант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Петров Максим Павлович, магистрант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Petrov P. A., *Zozulya F. S., Egorov E. A., Petrov M. P. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Zotfer@mail.ru)

DEVELOPMENT OF SYSTEM DESIGN FOR FEEDING THE SLAG-FORMING MIXTURE INTO SLAB CCM CRYSTALLIZER

The paper provides the system design for feeding the slag-forming mixture (SFM) onto the surface of liquid metal in a continuous casting machine (CCM) crystallizer; the necessity of mechanizing and automating the process under study is justified; the basic requirements for the designed units have been formulated; the existing technical solutions of the leading world and domestic manufacturers of machines for protecting metal mirror from secondary oxidation are analyzed; the calculation methodology is given and the main technical parameters and design features of the mechanized SFM feeder are determined.

Key words: crystallizer, blank, slag-forming mixture, mechanism for feeding the slag-forming mixture, mechanism for distributing the slag-forming mixture, model of the mechanized unit for feeding the slag-forming mixture.

References

1. Vdovin K. N., Tochilkin V. V., Yachikov I. M. Continuous steel casting : a monograph [Nepreryvnaya razlivka stalej : monografiya]. 3 ed., stereotype. SPb. : Lan', 2023. 732 p. EDN MXLUVU
2. Botnikov S. A. Modern atlas of defects in continuous cast billets and the causes of breakthroughs in crystallizing metal crusts [Sovremennyy atlas defektov nepreryvnolitoj zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizuyushchejsya korochki metalla]. 2 ed. Volgograd, 2011. 97 p.
3. Yeronko S. P. [et al.]. New systems for dosed feeding of powdered and granulated slag-forming mixtures into CCM crystallizers [Novye sistemy dozirovannoj podachi poroshkoobraznyh i granulirovannyh shlakooobrazuyushchih smesej v kristallizatory MNLZ]. Metallurgical processes and equipment. 2009. No. 2 (16). Pp. 34–38. EDN NVXFNJ
4. Yeronko S. P. Improved system of dosed feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizer [Uovershenstvovannaya sistema dozirovannoj podachi shlakooobrazuyushchih smesej v kristallizator slyabovoj MNLZ]. Metallurgical processes and equipment. 2013. No. 4 (34). Pp. 74–81. EDN RQQHKX
5. Yeronko S. P., Yushchenko M. V. Highly efficient system of dosed feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizer [Vysokoeffektivnaya sistema dozirovannoj podachi shlakooobrazuyushchih

smesey v kristallizator slyabovoy MNLZ]. *Innovacionnye perspektivy Donbassa : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Donetsk : DonNTU, 2015. Vol. 3. Pp. 32–37. EDN SSIUYP

6. Ganin D. R., Licin K. V., Shevchenko E. A. Review and analysis of devices for feeding slag-forming mixtures into the crystallizers of continuous casting machines [Obzor i analiz ustroystv dlya podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2018. No. 1 (1417). Pp. 58–65.

7. Yeronko S. P., Cyhmistro E. S., Nazarenko V. V. Design of systems for mechanized supply of slag-forming mixtures to CCM crystallizers [Proektirovanie sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov po napravleniyu "Mashinovedenie" : materialy VUZovskoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov. Posvyashchaetsya 100-letiyu DonNTU*. Donetsk : DonNTU, 2020. Pp. 20–23. EDN DHNOQF

8. Mold Flux Feeders. Imerys. 2019. URL: <http://castmysteel.de/mold-flux-feeders/>.

9. Automated SFM Feeding System [Avtomaticheskaya sistema podachi SHOS]. Ekos. 2022. URL: <https://ekos.com.ru/uslugi/mashina-dlya-podachi-shos/>

10. MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine. Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. 2022. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861025.html>.

11. MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine. Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. 2022. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861024.html>.

12. Yeronko S. P. [et al.]. Experience in design and industrial application of systems for mechanized feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizers [Opyt proektirovaniya i promyshlennogo primeneniya sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы slyabovykh MNLZ]. *Metallurg*. 2020. No. 3. Pp. 51–57. EDN WEBOZB

13. Yeronko S. P. [et al.]. Experience in development and model testing of mechanized feeding of slag-forming mixture to the CCM crystallizer [Opyt razrabotki i vnedreniya sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*. 2020. Vol. 76. No. 10. Pp. 994–1003. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-10-994-1003. EDN PAOYAH

14. Yeronko S. P., Oshovskaya E. V., Petrov P. A., Petrov M. P. Model test of the developed system for the fast change of submerged nozzles in continuous slab casting [Model'naya proverka funkcionirovaniya razrabotannoy sistemy bystroj smeny pogruznykh stakanov pri nepreryvnom lit'e slyabovoy zagotovki]. *Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva : sbornik tezisev dokladov VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Endorsed by Siidov V. N. Alchevsk : FSBEI HE "DonSTU", 2024. Pp. 181–184. EDN FOXKUB

15. Kuz'min A. V., Maron F. L. A reference book on calculations of mechanisms of hoisting and transporting machines [Spravochnik po raschetam mekhanizmov pod'emno-transportnykh mashin]. 2 ed., repr. and add. Mn. : Vysheysya shkola, 1983. 350 p.

16. Yeronko S. P., Oshovskaya E. V., Yushchenko M. V., Starodubcev B. I. Experimental studies of operating parameters of spiral screws for feeding slag-forming mixtures into CCM crystallizers [Eksperimental'nye issledovaniya rabochnykh parametrov spiral'nykh shnekov dlya podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2014. Vol. 57. No. 9. Pp. 33–40. DOI: 10.20535/S0021347014040037. EDN SQTAXN

17. Yeronko S. P., Cyhmistro E. S., Petrov P. A., Zozulya F. S. Calculation and design of the system of mechanized feeding of slag-forming mixtures into the bloom CCM crystallizer [Raschet i konstruirovaniye sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизатор blyumovoy MNLZ]. *Collection of Scientific Papers of DonSTI*. 2021. Iss. 24 (67). Pp. 91–98. EDN AQHWRC

18. Kramarenko V. V. Soil science: study letter [Gruntovedenie : uchebnoe posobie]. Tomsk : Publishing house of the Tomsk Polytechnic University. 2011. 472 p.

19. Goriushinskiy I. V. [et al.]. Bulk solids tanks in transport and cargo systems : textbook [Emkosti dlia sypuchikh gruzov v transportno-gruzovykh sistemakh : uchebnoe posobie]. Endorsed by Goriushinskiy I. V. Samara : SamGUPS, 2003. 232 p.

20. Shapovalov A. N. *Theory and technology of steel casting : textbook [Teoriia i tekhnologiya razlivki stali : uchebnoe posobie]*. Novotroitsk : NF NUST "MISIS", 2024. 128 p.

21. Yeronko S. P. [et al.]. *Physical modelling of steelmaking technical systems : textbook [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavilnogo proizvodstva : uchebnoe posobie]*. M. : Infra-Inzheneriia, 2021. 324 p.

22. *Handbook-catalogue [Spravochnik-katalog]*. Eds. Naryshkin V. N. and Korostashevskiy R. V. M. : Mashinostroenie, 1984. 280 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Zozulya Fyodor Sergeievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: Zotfer@mail.ru

Egorov Egor Aleksandrovich, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Petrov Maxim Pavlovich, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

***Денисова Н. А., Маковецкий Р. А.**

Донбасский государственный технический университет,

**E-mail: natdeny@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа посвящена разработке программного обеспечения для оценки психофизиологического состояния человека-оператора на основании показаний датчиков носимого индивидуального устройства. Предложено в качестве математической модели использовать метод нечеткого логического вывода.

Ключевые слова: металлургическое оборудование, человек-оператор, психофизиологическое состояние, нештатная ситуация, метод нечеткого логического вывода, компьютерная программа.

Финансирование: исследования выполнены за счет средств федерального бюджета по теме «Экспертная система обеспечения надежности металлургического оборудования с учетом психофизиологического состояния оператора в реальном времени» (код темы: FRRU-2023-0005 в ЕГИСУ НИОКРПР).

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Металлургическое производство является одной из флагманских отраслей Донбасса. Его перезапуск и переориентация на выпуск востребованной продукции позволит запустить и другие смежные отрасли. Более того, продукция металлургических предприятий Донбасса, учитывая масштаб разрушений и износа критически важной инфраструктуры, очень востребована для развития Республики. Поэтому прогноз и обеспечение надежности металлургических машин и агрегатов являются первоочередными задачами, решение которых должно предшествовать модернизации производства или являться ее первым этапом.

Общеизвестно, что надежность — это неотъемлемая часть качества любой технической системы. Надежность — это комплексное понятие, включающее множество показателей, выбор которых зависит от конкретного объекта (его характеристик, назначения, свойств). Выход из строя одного из показателей может привести к возникновению нештатной ситуации.

Из проведенного анализа возникновения нештатных ситуаций на ООО «ЮГМК» в

кислородно-конвертерном цехе на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в период с 2018 г. по настоящее время установлено, что наибольшее количество отказов оборудования пришлось на 2019 год (рис. 1).

Причинами возникающих аварийных ситуаций являлись: прорыв, прекращение разлива, некрытие стопора, перелив металла через кристаллизатор, выход из строя погружного стакана и отрыв затравки (рис. 2).

Количество нештатных ситуаций по годам

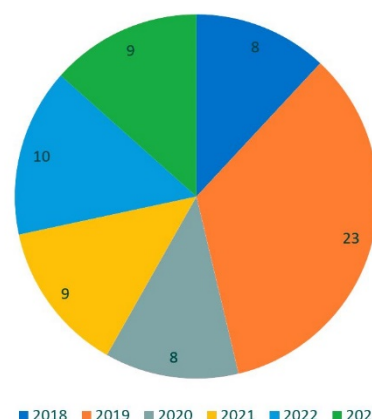


Рисунок 1 — Количество нештатных ситуаций, возникших на МНЛЗ



Рисунок 2 — Виды и количество нештатных ситуаций, возникших на ООО «ЮГМК»

Таким образом, на сегодняшний день ключевым остается вопрос безаварийной работы металлургических машин и агрегатов. Для снижения риска возникновения нештатных ситуаций (НС), а также негативного их развития вплоть до серьезных аварий необходим комплексный подход: устранение причин отказов на этапе проектирования, изготовления и обслуживания; совершенствование систем раннего предупреждения НС самых уязвимых узлов машин и агрегатов металлургического оборудования; расширение спектра контролируемых параметров, улучшение визуализации информации о состоянии процесса и оборудования в режиме реального времени; создание резервных систем для продолжения работы или безопасной остановки основного оборудования; локализация масштаба развивающейся нештатной ситуации с целью защиты персонала и смежного оборудования; подготовка персонала к эффективным действиям в условиях неопределенности при возникновении НС; проведение противоаварийных тренировок.

Ключевой проблемой современной высокотехнологичной металлургии является нарастающее противоречие между усложнением технологических систем и критической ролью человека при возникновении

нштатной ситуации. Чтобы исключить влияние человеческого фактора, процессы механизуются, автоматизируются и роботизируются. Но роль человека пока остается достаточно высокой, особенно в периоды, когда наблюдаются технические или технологические сбои в работе машин и агрегатов. И чем сложнее производственные процессы и уникальнее эксплуатируемое оборудование, тем выше цена ошибки принятия техническим и обслуживающим персоналом неправильного решения.

Постановка задачи. С точки зрения производственной безопасности металлургических предприятий особая ответственность возлагается на операторов высокотехнологичных машин и агрегатов. В инженерной психологии их принято называть «человек-оператор» [1]. Иногда именно от его решения, основанного на анализе ситуации, опыте и интуиции, зависит предотвращение эскалации опасности и недопущение инцидента или аварии на производстве.

С целью снижения риска возникновения нештатной ситуации из-за действий «человека-оператора» необходим контроль его психофизиологического состояния (ПФС).

В связи с этим *целью* данной работы является разработка программного обеспече-

ния для оценки психофизиологического состояния человека-оператора на основании показаний с датчиков носимого индивидуального устройства.

Объект исследования — психофизиологическое состояние оператора металлургического оборудования.

Предмет исследования — оценка ПФС оператора металлургического оборудования на основе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства.

Задачи исследования:

- анализ влияния психофизиологического состояния «человека-оператора» на безопасность функционирования металлургического оборудования;

- разработка программного обеспечения для мониторинга ПФС работника на основе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства в режиме реального времени.

Методика исследования. В статье [2] отмечено, что для определения психофизиологической оценки функционального состояния «человека-оператора» выделяют две составляющие: физиологическое состояние и психическое состояние. В данной работе для разработки компьютерной программы использовались показатели физиологического состояния человека, основанные на их измерении в режиме реального времени.

Изложение материала. В работе П. Г. Белова [3] приведены количественные характеристики безошибочности действий среднестатистического человека, которые могут быть использованы для определения вероятностей отказа в системе «человек — машина». Классифицируя ошибки по типам и связывая их с действиями человека, исследователь установил, что стресс является одним из самых ощутимых факторов, способствующих возникновению физических и психофизиологических опасностей на рабочем месте.

ГОСТ 12.0.003-2015 выделяет в отдельный блок опасные и вредные производственные факторы психофизиологического воздействия на человека. Оператор испыты-

вает нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса. В их числе: умственное перенапряжение; перенапряжение анализаторов; монотонность труда; неуверенность в действиях из-за недостатка образования и опыта [4].

Надежность человека как элемента сложной технической системы зависит от внутренних и внешних условий, которые меняются во времени.

В [5] выделены технические, санитарно-гигиенические, организационные и психофизиологические группы факторов аварийности и травматизма на металлургических и коксохимических предприятиях (рис. 3).

Последние две группы тесно связаны с человеком — непосредственным участником производственных процессов.

Таким образом можно сделать вывод, что в современных условиях, независимо от степени автоматизации металлургического производства, степень влияния человека на технологический процесс остается довольно высокой. Присутствие человека в системе обуславливает наличие ошибок.

В связи с этим некорректно производить расчеты надежности оборудования без учета надежности работы человека. В основу разработки компьютерной программы легла математическая модель с использованием нечеткого логического вывода [1]. Предложенная модель реализована в программном комплексе MatLab. Однако MatLab, несмотря на свои широкие возможности, имеет значительные недостатки при моделировании нечетких систем:

- инструменты нечеткой логики (Fuzzy Toolbox) заточены под офлайн-анализ, а не потоковую обработку;

- процесс фазификации применения нечетких правил (особенно при использовании сложных функций принадлежности или методов импликации) вычислительно затратен;

- встроенные функции модуля Fuzzy Logic Toolbox не всегда оптимизированы для максимальной скорости в циклах реального времени.

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Рисунок 3 — Группы факторов аварийности и травматизма

Альтернативой для Real-Time нечеткого моделирования временных процессов является Python.

Python — это высокоуровневый, интерпретируемый язык программирования, известный своей простотой и читаемостью синтаксиса, который обладает обширной стандартной библиотекой. Python также является эффективным инструментом для обработки в реальном масштабе времени информации от датчиков, работающих с Rum-Teim.

Программа «PFS_Operator.py» представляет собой основу системы мониторинга ПФС работника на основе данных с датчиков с использованием нечеткой логики. Она включает в себя импорт необходимых библиотек, определение входных и выходных переменных нечеткой логики и их функций принадлежности, а также обработку данных из CSV-файла.

Программа содержит следующие основные блоки (рис. 4):

- импорт библиотек: «os», «numpy», «skfuzzy», «skfuzzy.control», «pandas»,

- «chardet», «matplotlib.pyplot», «csv», «time», «watchdog»;

- организация мониторинга изменения показателей датчиков в реальном времени. Данные поступают из файла «SensorData.csv». После выполнения всех необходимых расчетов в программе по определению ПФС работника результаты выводятся в выходной файл «PFS_Rezult.csv» и в графические файлы «chart1.png» и «chart2.png»;

- определение диапазонов входных переменных x_1 , x_2 , x_3 и создание объектов для входных переменных;

- определение диапазонов выходной переменной K (индикатор ПФС работника) и создание объекта для выходной переменной K ;

- определение классов ПФС работника. В этом блоке создается класс Situation, который будет использоваться для классификации состояния работника на основе значения индикатора K . Метод init принимает значение и вызывает метод классификации;

- определение функций принадлежности для каждой входной и выходной переменной;

- определение продукционных правил: создаются нечеткие правила, связывающие входные и выходные переменные;
- создание системы управления: создается нечеткая система управления на основе определенных правил;
- запуск системы управления для получения необходимых оценок ПФС для текущих показаний x_1, x_2, x_3 ;

– организация обновления записей результатов в DataFrame и записи данных в выходной файл «PFS_Results.csv».

Фрагменты результатов выполнения программы «PFS_Operator.py» на контрольной выборке данных, графическая интерпретация результатов и построение графика изменения индикатора ПФС оператора представлены на рисунке 5.

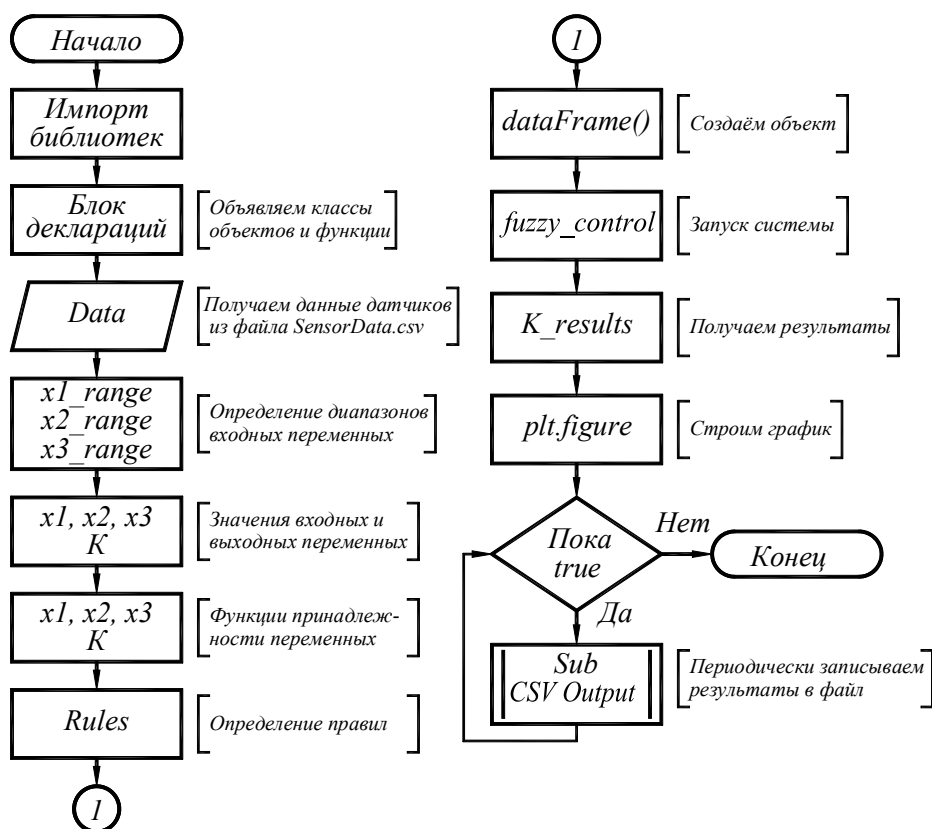


Рисунок 4 — Блок-схема программы «PFS_Operator.py»

```

Python 3.12.8 (tags/v3.12.8:2dc476b, Dec 3 2024, 19:30:04) [MSC v.1942 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.

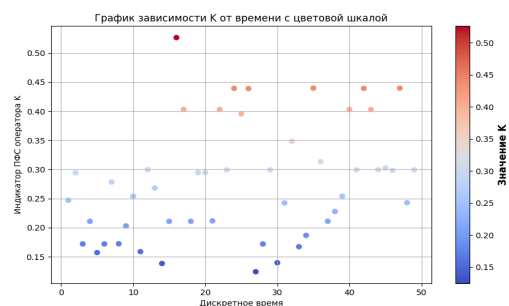
>>> ===== RESTART: C:\Users\ASUS\Documents\my_prog\trial_time\PFS_Operator.py =====
Входные переменные - текущие показания датчиков:
X1 - частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин
X2 - температура тела оператора, град.С
X3 - показатель кожно-гальванической реакции (КТР), ком
Выходная переменная - индикатор K, характеризующий психофизиологическое состояние оператора (ПФС):
Классы ПФС, определяемые на основе значений индикатора K:
класс A - нормальное рабочее состояние;
класс B - эмоциональная напряженность, возможны ошибочные действия;
класс C - переутомление, велика вероятность ошибок;
класс D - нерабочее состояние, соответствующее заболеванию.
Monitoring changes in SensorData.csv...
File modified, updating chart...
Определенная кодировка: ascii
Saving chart1.png
Squeezed text (51 lines)
Saving chart2.png
Данные успешно записаны в PFS_Results.csv
Файл PFS_Results.csv обновлен.
    
```



Рисунок 5 — Фрагменты результатов выполнения программы «PFS_Operator.py»

МАШИНОСТРОЕНИЕ

	n	date	time	x1	x2	x3	K	PFS
0	1	01.12.2024	8:00	100	36.6	40	0.247051	A or B
1	2	01.12.2024	8:10	90	36.7	44	0.294367	A or B
2	3	01.12.2024	8:20	87	36.6	32	0.172081	A or B
3	4	01.12.2024	8:30	87	36.6	39	0.210871	A or B
4	5	01.12.2024	8:40	80	36.6	36	0.157165	A or B
5	6	01.12.2024	8:50	75	36.6	38	0.172046	A or B
6	7	01.12.2024	9:00	64	36.6	42	0.278394	A or B
7	8	01.12.2024	9:10	96	36.6	32	0.172369	A or B
8	9	01.12.2024	9:20	62	36.8	38	0.202941	A or B
9	10	01.12.2024	9:30	98	37.0	31	0.253915	A or B
10	11	01.12.2024	9:40	69	36.6	36	0.158811	A or B
11	12	01.12.2024	9:50	45	36.7	54	0.299621	A or B
12	13	01.12.2024	10:00	96	35.9	41	0.267978	A or B
13	14	01.12.2024	10:10	88	36.6	28	0.138460	A or B
14	15	01.12.2024	10:20	75	36.6	39	0.210840	A or B
15	16	01.12.2024	10:30	77	36.7	21	0.526383	C



Продолжение рисунка 5

Выводы и направление дальнейших исследований. В настоящее время программа «PFS_Operator.py» проходит этап тестирования и нуждается в испытаниях для решения ряда задач, связанных с настройкой параметров используемого алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани. Поскольку в модели заложены интервалы оценок входных и выходных переменных x_1, x_2, x_3, K на основании среднестатистических параметров человека [6], то для более эффективного использования устройства в

качестве средства диагностики ПФС работника необходимо разработать алгоритм индивидуализации параметров модели для настройки ее на конкретного работника. В связи с этим для создания эффективной системы мониторинга на следующем этапе планируется проведение широкой программы исследований с участием работников металлургической отрасли, выполняющих работу операторов на высокотехнологичных машинах и агрегатах.

Список источников

1. Подлипенская Л. Е., Бондарь Н. А., Денисова Н. А. Оценка функциональной деятельности оператора в системе человек-машина // *Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная : матер. XIII междунар. науч.-практ. конф.* Брянск : БГИТУ, 2024. С. 151–155. EDN OYPNIO
2. Денисова Н. А., Подлипенская Л. Е., Козачишнев В. А. Классификация психофизиологического состояния человека-оператора в режиме реального времени на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. № 6 (80).* С. 72–84. EDN AYQAPF
3. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М. : центр Академии ГЗ МЧС РФ, 2003. 512 с. EDN QMDVST
4. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М. : Стандартинформ, 2016. 10 с.
5. Негреева В. В., Василенок В. Л., Кагиян О. А. Исследование проблем охраны труда и их влияние на промышленную безопасность предприятий черной металлургии // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия : Экономика и экологический менеджмент. 2019. № 4.* С. 41–50. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50. EDN PHZVOB
6. Вишневский Д. А. Развитие научных основ и практика обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов : дис. ... д-ра техн. наук. Донецк, 2021. 336 с.

© Денисова Н. А., Маковецкий Р. А., 2025

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: natdeny@yandex.ru

Маковецкий Руслан Артурович, аспирант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

***Denisova N. A., Makovetskiy R. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: natdeny@yandex.ru)

SOFTWARE PROGRAMMING FOR ASSESSING PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF A HUMAN-OPERATOR OF METALLURGICAL EQUIPMENT

This work focuses on developing software that assesses the psychophysiological state of human-operator based on sensor readings from a personalized wearable device. The method of fuzzy logical inference is proposed as a mathematical model.

Key words: metallurgical equipment, human-operator, psychophysiological state, abnormal situation, method of fuzzy logical inference, computer program.

Funding: the research is funded from the federal budget on the theme “Expert system for ensuring the reliability of metallurgical equipment considering the psychophysiological state of the operator in real time” (theme code: FRRU-2023-0005 in the Unified state information system for accounting the research, experimental and technical works).

References

1. Podlipenskaya L. E., Bondar' N. A., Denisova N. A. Assessment of operator's functional activity in the man-machine system [Ocenka funktsional'noy deyatel'nosti operatora v sisteme chelovek-mashina]. Sreda, okruzhayushchaya cheloveka: prirodnyaya, tekhnogennaya, social'naya : materialy XIII mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Bryansk : BSTUE, 2024. Pp. 151–155. EDN OYPNIO
2. Denisova N. A., Podlipenskaya L. E., Kozachishen V. A. Real-time classification of the psychophysiological state of a human-operator based on data from the personalized wearable device. [Klassifikatsiya psihofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka-operatora v rezhime real'nogo vremeni na baze dannyh, postupayushchih s datchikov individual'nogo ustrojstva]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. No. 6 (80). Pp. 72–84. EDN AYQAPF
3. Belov P. G. System analysis and modelling of hazardous processes in the technosphere [Sistemnyy analiz i modelirovanie opasnykh processov v tekhnosfere]. M. : Publishing House Center Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2003. 512 p. EDN QMDVST
4. GOST 12.0.003-2015. System of labor safety standards. Hazardous and harmful production factors. Classification. M. : Standartinform. 2016. 10 p.
5. Negreeva V. V., Vasilenok V. L., Kagiyan O. A. Study of labour protection problems and their impact on industrial safety of ferrous metallurgy enterprises [Issledovanie problem ohrany truda i ih vliyanie na promyshlennuyu bezopasnost' predpriyatij chernoy metallurgii]. Scientific journal NRU ITMO. The series : Economics and Environmental Management. 2019. No. 4. Pp. 41–50. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50. EDN PHZVOB
6. Vishnevskiy D. A. Development of scientific bases and practice of maintenance of failure-free operation of metallurgical machines and mechanisms : thesis ... dr. of technical sciences [Razvitie nauchnykh osnov i praktika obespecheniya bezotkaznoj ekspluatacii metallurgicheskikh mashin i mekhanizmov : dis. ... d-ra tekhn. nauk]. Donetsk, 2021. 336 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denisova Nataliia Anatol'evna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: natdeny@yandex.ru

Makovetskiy Ruslan Arturovich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

СТРОИТЕЛЬСТВО

CIVIL ENGINEERING

Будзило Е. Е., *Збицкая В. В., Псюк М. Ю.
 Донбасский государственный технический университет
 *E-mail: kilrilch@mail.ru

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

В работе рассматривается проблема повышения эксплуатационной надежности здания, в первую очередь за счет своевременного восстановления элементов покрытия. Приведены результаты аналитических исследований устройства покрытий на примере общественных зданий.

Ключевые слова: покрытие, реконструкция, общественное многоэтажное здание, техническое состояние, оптимальный вариант реконструкции.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Эксплуатационная сохранность зданий связана со своевременным выполнением ремонтных работ. В первую очередь это касается состояния кровли, так как со временем любой вид кровли изнашивается [1, 2].

Виды и объемы ремонтных работ должны соответствовать техническому состоянию самой конструкции крыши, т. к. нарушение ее целостности может привести к ухудшению показателей надежности всех несущих конструктивных элементов здания. Защита зданий от влияния атмосферных осадков позволяет поддерживать в них оптимальный тепловлажностный режим и увеличить срок эксплуатации конструктивных элементов здания.

Качественная эксплуатация крыш, своевременное проведение ремонтных работ и реконструкции элементов покрытия создает предпосылки для значительного увеличения срока эксплуатации здания.

Реконструкция и модернизация общественных зданий являются важной народнохозяйственной и достаточно сложной инженерной и социально-экономической задачей, требующей использования достижений различных областей знаний в материаловедении, строительной механике, теплотехнике, технологии и организации, экономике строительства.

Направленность работы совпадает с одной из главных задач повышения надеж-

ности эксплуатации зданий — систематизации подходов, в результате которых принимаются решения по выбору рациональных принципов, методов и технологий реконструкций зданий и сооружений.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена на кафедре строительства и архитектуры (переименована с кафедры промышленного строительства в 2024 г.) Донбасского государственного университета и отвечает актуальным направлениям научно-технической политики в области реконструкции зданий и сооружений общественного назначения.

Целью работы является повышение эксплуатационной надежности здания путем выбора оптимального варианта восстановления элементов покрытия с точки зрения организационно-технологических мероприятий.

Поставленная цель достигалась решением следующих **задач**:

- совершенствование модели технологического проектирования проведения реконструкции элементов покрытия, а именно чердачных крыш общественных зданий;
- оценка технического состояния элементов крыши;
- определение порядка производства работ по замене элементов чердачной крыши;
- определение оптимальных параметров элементов организации работ по реконструкции в условиях городской застройки.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Объект исследования — четырехэтажное общественное здание.

Предмет исследования — покрытие здания с учетом моделирования вариантов технологического проектирования проведения реконструкции элементов покрытия.

Методика исследований — анализ литературных и нормативных источников; аналитическое исследование устройства покрытий на примере общественных зданий.

Изложение материала. Жизненный цикл общественных зданий — это время от момента обоснования необходимости их возведения до наступления экономической нецелесообразности дальнейшей эксплуатации. Периоды жизненного цикла представлены в таблице [3].

Критерии выбора стратегии обновления зданий во многом определяют его техническим состоянием на данный период эксплуатации. Они напрямую зависят как от внешних, например климатических, так и

внутренних воздействий, таких как перегрузка фундаментов, перекрытий, несвоевременное проведение ремонтных работ при обслуживании, несоответствие нормам энергоэффективности, то есть геотехнических и эксплуатационных факторов. Учитывая, что под их влиянием в здании могут происходить существенные изменения его состояния, связанные не только с износом и устареванием отдельных конструкций, но и частичным их повреждением, появляется необходимость уменьшения рисков их воздействий.

Изменение приоритетных характеристик здания, таких как его прочность, устойчивость, энергоэффективность, надежность, ведет к снижению его несущей способности, аварийности, деформациям и трещинам в конструкциях. Это значительно увеличивает затраты при их эксплуатации. Если данные переходные процессы не контролировать, потребуется не только досрочная их реконструкция, но и даже снос.

Таблица

Периоды жизненного цикла общественных зданий

Период	Общая характеристика
I	Технико-экономическое обоснование возведения
II	Конструирование и проектирование
III	Возведение с разработкой технологических карт производства, планирование организации с учетом наличия материально-технических ресурсов
IV	Предэксплуатационное освоение (пуско-наладочные работы) с настройкой коммуникационных и технических систем здания
V	Разработка эффективных вариантов по снижению затрат, направленных на использование площадей введенного в эксплуатацию сооружения
VI	С учетом паспорта здания в случае выявления дефектов в конструкциях или системах его обслуживания (электроснабжение, водоснабжение, канализация, отопление, вентиляция, лифты и т. д.) проведение профилактических ремонтных работ как планово-предупредительных (например, устранение трещин, чистка и замена фильтров системы вентиляции), так и капитальных (усиление конструктивных элементов, замена кровли, трубопроводов и т. д.)
VII	При физическом износе в пределах 30–60 процентов (в зависимости от назначения и области использования здания или сооружения) и его несоответствии функциональным и комфортным требованиям, включая безопасность, необходимо проводить модернизацию, включающую не только использование современных инженерных систем, но и проведение работ по утеплению фасадов и частичной перепланировке
VIII	Если физический износ составляет 60–80 %, необходима реконструкция с обязательным усилением существующих конструктивных элементов с полной заменой сетей на основании технической документации ее проведения

Следовательно, на начальной стадии переходного периода при появлении первых, даже незначительных трещин в несущих конструкциях зданий, что в значительной мере связано с качеством проведения кровельных работ, необходимо проводить раннюю диагностику по выявленным дефектам покрытия здания.

При возникновении критической фазы в работе конструкций необходимо определиться с методами устранения данных отклонений в их работе, что зачастую связано с использованием современных технологий по их восстановлению. При производстве данных работ в обязательном порядке необходим учет местоположения здания (градообразующие составляющие), исторической его ценности и предполагаемых, возможных путей не только его реконструкции, но и градации (вписывания) в микрорайон после восстановительных работ.

Целесообразность выполнения работ по восстановлению элементов (конструкций) существующего здания напрямую связана и зависит от стоимости их выполнения в реальных условиях эксплуатации (рис. 1).

Анализ данных показывает, что физический износ зданий прогрессирует нелинейно, а затраты на устранение выявленных дефектов резко возрастают после преодоления порога в 50–60 %. В этом случае необходимо принимать стратегические решения, направленные как на реконструкцию, модернизацию объекта, так и на его снос.

Учитывая, что данные показатели непосредственно связаны с условиями эксплуатации существующего общественного здания, необходим анализ обработки факторов, повлекших непосредственное изменение его качественных параметров.

В случае, если при обработке исходной информации паспорта здания выявлено, что с точки зрения архитектурной значимости здание является памятником архитектуры, в данном конкретном случае при анализе, даже если уровень физического износа непрерывно увеличивается с течением времени и затраты на его устранение могут превысить стоимость самого здания, этот фактор не является критичным, и здание в обязательном порядке реконструируется как за счет бюджетных средств, так и при участии спонсоров.

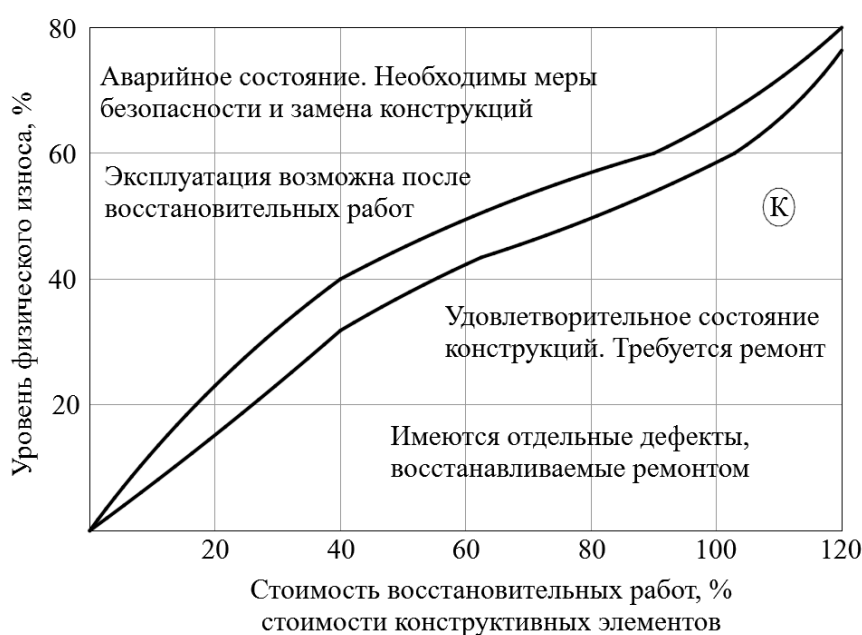


Рисунок 1 — Стоимость восстановительных работ, % стоимости конструктивных элементов

Для определения и в дальнейшем учета влияния факторов «случайности» на расчет эксплуатационных затрат по восстановлению или частичному ремонту существующего объекта в обязательном порядке необходим учет непосредственных причин их возникновения в рассматриваемых периодах эксплуатации здания (даже с учетом случайных факторов, вызванных стихийными бедствиями) с обязательным поэтапным решением данной проблемы в целом, а именно:

- в начальный период эксплуатации — непосредственное влияние уровня качества строительно-монтажных работ (СМР), что позволит значительно уменьшить затраты на обслуживание здания, а именно исключить ремонтные работы по восстановлению дефектных и некачественных элементов здания, что может касаться даже проведения работ по усилению его фундаментной части;

- на этапе регулярной (постоянной) эксплуатации существующего общественного здания в обязательном порядке производится проверка уровня качества проектирования (степени совершенства проектных решений) и методов управления эксплуатацией зданий (технологий обслуживания зданий);

- на стадии износа — срок службы материалов и несущих элементов, а также их ремонтпригодность, что включает долговечность примененных материалов и также конструктивные решения с потенциалом их дальнейшего восстановления в процессе эксплуатации.

Снижение жизненного цикла зданий обусловлено снижением эксплуатационной надежности основных их конструктивных элементов, что в значительной мере определяется условиями эксплуатации и качеством покрытий.

Очевидно, что сохранение фонда общественных зданий — это единственный способ предотвратить их массовый выход из эксплуатации. Промедление с решением этой проблемы значительно увеличивает

стоимость восстановительных работ. Эффективность выбора наилучшего решения определяется оцениванием экономических инвестиций в сфере реконструкции, а именно использования капитальных затрат на проведение работ в реальных условиях.

Наибольшее распространение в общественных зданиях получили покрытия в виде деревянных ферм или стропильных элементов из древесины.

В ходе обследования несущих элементов кровельных конструкций применяются следующие методы:

- визуальный осмотр (совместный осмотр конструктивных элементов покрытия представителями как заказчика, так и проектной организации);

- натурные измерения (замеры геометрических параметров и сечений используемых конструкций);

- дефектоскопия (выявление и анализ повреждений элементов покрытия);

- контроль деформаций (измерение прогибов и искривлений несущих конструкций, особенно это касается ферм и стропильных систем скатных крыш);

- инструментальный анализ (проверка прочностных характеристик материалов конструкций покрытия);

- оценка износа (определение степени деградации деревянных несущих элементов);

- изучение проектно-технической документации, в которой приведены особенности конструкций покрытий и условия их эксплуатации (включая проведение ремонтных работ);

- анализ документации (изучение проектных и эксплуатационных данных, включая историю ремонтов) [3].

При проведении визуального осмотра оцениваются следующие параметры:

- физическое состояние конструктивных элементов покрытия;

- дефекты и повреждения;

- фиксация общих и локальных деформаций — проектных ошибок;

- фиксация нарушений технологии производства работ по изготовлению, транс-

портировке или монтажу элементов покрытий;

– нарушения правил эксплуатации зданий.

Выявленные визуальным осмотром повреждения необходимо акцентировать подробным описанием с приложением схем и места их обнаружения [4, 5].

В крепежных соединениях элементов покрытия исследуются узлы с целью выявления отсутствия достаточной прочности.

Болтовые соединения проверяются на плотность и усилие затяжки. Усилие затяжки болтов устанавливается динамометрическим ключом.

Степень опасности дефектов и повреждений несущих элементов покрытий устанавливается на основании исследования характера выявленных повреждений (отклонения конструкций от проектного положения, величины их деформации с учетом наличия сечений с уменьшенными параметрами), что должно подтверждаться поверочными расчетами несущей способности в реальных условиях эксплуатации объекта исследования.

В случае обнаружения критических повреждений, незамедлительно проводятся работы по временному укреплению аварийных конструкций покрытия.

Древесина подвержена биологическим повреждениям, которые могут быть вызваны жизнедеятельностью плесени, грибов, насекомых и грызунов. Эти повреждения обычно обнаруживаются в первую очередь [6, 7].

Проектирование замены конструктивных элементов покрытия производится с учетом подбора сечения несущих элементов с последующей проработкой в условиях реального производства работ по замене узлов сопряжения, если они имели существенные дефекты, возникшие при эксплуатации здания, например, при постоянной протечке кровли.

При разработке соединительных узлов необходимо обеспечить их технологичность (простоту изготовления и монтажа) с учетом следующих параметров, а именно:

надежности (распределением и передачей усилий в эксплуатируемых конструкциях стропильной системы покрытия), прочности (устойчивостью ко всем эксплуатационным нагрузкам, как вертикальным, так и горизонтальным). При этом необходимо исключить распорные эффекты в данных элементах с учетом влаго- и огнестойкости.

На продолжительность эксплуатации деревянных элементов кровли существенное влияние оказывают также мероприятия по их защите от увлажнения и возгорания с созданием нормального температурно-влажностного режима и воздухообмена в чердачных помещениях эксплуатируемого здания.

Возможные сочетания факторов для развития процессов гниения деревянных покрытий:

- споры дереворазрушающих грибов;
- наличие кислорода;
- положительная температура на чердаке от 0 до +50 °С;
- влажностный режим при эксплуатации.

Недостаточная квалификация плотников и работников по монтажу может привести к появлению дополнительных дефектов деревянных конструкций элементов покрытий.

Особо опасно применение для производства деревянных конструкций покрытий материалов, которые не прошли достаточную сушку.

Установка шипов на стыках стропильных ног и прогонов может привести к скоплению влаги в местах крепления. Кроме того, вырубленные гнезда ослабляют сечение и снижают несущую способность конструкции.

Более надежным решением является использование стальных штырей, которые устанавливаются в заранее подготовленные отверстия. В прогонах сверлятся сквозные отверстия, в которые затем вставляются штыри. Для предотвращения скопления влаги в отверстиях их верхнюю часть рекомендуется заполнить антисептической пастой.

Данные обследований показывают наличие следующих дефектов узлов деревянных конструкций покрытий эксплуатируемых кровель:

- отсутствие в узлах сопряжения деревянных элементов предусмотренных проектом соединительных элементов;
- недостаточная натяжка болтовых соединений;
- нагели, гвозди, скобы, скрутки установлены без достаточной прочности.

Наличие трещин от усушки древесины не должно превышать допустимых нормативных показателей.

Практика выполнения обследований позволяет убедиться, что при производстве работ по устройству деревянных покрытий бывают случаи отсутствия защиты в зонах контакта со стенами или крепежными деталями этих покрытий. Подобные нарушения могут вызвать ускоренное разрушение конструкций вследствие образования конденсата, появления плесени, коррозионных процессов в элементах крепления. Мероприятия по повышению био- и огнестой-

кости конструкций, как правило, осуществляются с нарушением технологии и требований нормативных документов или не выполняются, что также сказывается на эксплуатационной их надежности.

Выводы и направление дальнейших исследований. Реконструкция элементов покрытия общественных зданий в целом позволяет решать следующие задачи:

- повышение эксплуатационной надежности;
- защита зданий от влияния атмосферных осадков;
- поддержание нормативных параметров тепловлажностного режима здания;
- увеличение срока эксплуатации как конструктивных элементов, так и здания в целом.

Проведенные исследования, результаты и выводы могут быть использованы при дальнейшем проектировании реконструкции и реализации оптимального экономического варианта реконструкции элементов чердачной крыши на практике.

Список источников

1. Федоров В. В. Реконструкция и реставрация зданий. М. : ИНФРА-М, 2024. 208 с.
2. Котенко И. А. Методика реставрации и реконструкции. Реставрация и ремонт деревянных зданий. М. : Ай Пи Ар Медиа, 2020. 100 с. EDN INAFCI
3. Афанасьев А. А., Матвеев Е. П. Реконструкция жилых зданий : учебно-методическое пособие : в 2 ч. Ч. 1 : Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий. М., 2008. URL: https://gostrf.com/norma_data/53/53641/index.htm/ (дата обращения: 01.05.2025).
4. Кровля. Современные материалы и технология / В. И. Теличенко [и др.]. М. : АСВ, 2012. 816 с. EDN QNQEAF
5. Токарев Е. А. Методы защиты древесины от биоповреждений и огня // Строительство и реконструкция : сборник научных трудов 3-й всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров / отв. ред. С. В. Дубраков. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 390–393. EDN YQEEDH
6. Фомичев В. Т., Камкова С. В., Филимонова Н. А. Повышение биостойкости строительных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия : Строительство и архитектура. 2012. Вып. 27 (46). С. 34–38. EDN PDXNFZ
7. Повышение надежности деревянных строительных конструкций при реконструкции зданий / А. Ю. Сергеева, Р. Ю. Мясцев, Ю. Д. Сергеев, И. И. Найчук // Строительство и недвижимость. 2024. № 1 (14). С. 31–36. EDN KMLRGJ

© Будзило Е. Е., Збицкая В. В., Псюк М. Ю., 2025

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СА ДонГТУ Псюком В. В.,
к.т.н., гл. инженером проекта НПЦ «Сваркон» Антошиной Т. В.**

Статья поступила в редакцию 23.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Будзило Елена Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Збицкая Валентина Викторовна, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: ki1ri1ch@mail.ru

Псюк Марина Юрьевна, старший преподаватель каф. строительства и архитектуры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Budzilo E. E., *Zbitskaya V. V., Psiuk M. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk,
Russia, *e-mail: ki1ri1ch@mail.ru)

CHOOSING THE BEST WAY FOR THE RECONSTRUCTION OF PUBLIC BUILDING COVERING

The paper addresses the issue of improving the operational reliability of building, primarily through the well-timed restoration of covering components. The results of analytical studies of pavement construction on the example of public buildings are given.

Key words: covering, reconstruction, public multistory building, engineering status, the best way for the re-construction.

References

1. Fedorov V. V. Reconstruction and restoration of buildings [Rekonstrukciya i restavraciya zdaniy]. M. : INFRA-M, 2024. 208 p.
2. Kotenko I. A. Restoration and renovation techniques. Restoration and repair of wooden buildings [Metodika restavratsii i rekonstrukcii. Restavraciya i remont derevyannyh zdaniy]. M. : IPR MEDIA, 2020. 100 p. EDN INAFCI
3. Afanas'ev A. A., Matveev E. P. Reconstruction of residential buildings : training manual : in 2 parts.. Part I. Technologies for restoring the operational reliability of residential buildings [Rekonstrukciya zhilyh zdaniy. Chast' I. Tekhnologii vosstanovleniya ekspluatatsionnoj nadezhnosti zhilyh zdaniy : uchebno-metodicheskoe posobie : v 2 ch.]. M., 2008. URL: https://gostrf.com/norma_data/53/53641/index.htm/ (date of treatment: 01.05.2025).
4. Telichenko V. I., Kas'yanov V. F., Sokova S. D. [et al.]. Modern materials and technology [Krovlya. Sovremennye materialy i tekhnologiya]. M. : ACB, 2012. 816 p. EDN QNQEAF
5. Tokarev E. A. Methods of wood protection against biodeterioration and fire [Metody zashchity drevesiny ot biopovrezhdenij i ognya]. Stroitel'stvo i rekonstrukciya : sbornik nauchnyh trudov 3-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov, magistrov i bakalavrov. otvet. redaktor S. V. Dubrakov. Kursk : Southwest State University, 2021. Pp. 390–393. EDN YQEEDH
6. Fomichev V. T., Kamkova S. V., Filimonova N. A. Improving the bio-resistance of building materials [Povyshenie biostojkosti stroitel'nyh materialov]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The series : Construction and Architecture. 2012. Iss. 27 (46). Pp. 34–38. EDN PDXNFZ
7. Sergeeva A. Yu., Myasishchev R. Yu., Sergeev Yu. D., Najchuk I. I. Improving the reliability of wooden building structures in the reconstruction of buildings [Povyshenie nadezhnosti derevyannyh

strojkonstrukcij pri rekonstrukcii zdaniij]. Stroitel'stvo i nedvizhimost'. 2024. No. 1 (14). Pp. 31–36. EDN KMLRGJ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Budzilo Elena Evgeniievna, PhD in Engineering, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Building and Architecture
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Zbitskaya Valentina Viktorovna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Building and Architecture
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: ki1ri1ch@mail.ru

Psiuk Marina Yuriievna, Senior Lecturer of the Department of Building and Architecture
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

<i>Полозов Ю. А., Смекалин Е. С., Лазебник А. Ю.</i> ВОДОИЗОЛЯЦИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ ЗОНЫ ТЕКТОНИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ШАХТНОГО СТВОЛА	5
<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю.</i> НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНЦОВ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ПОД ЗУБЧАТЫЙ СТЫК	16

МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Кухарев А. Л.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ РАСПЛАВА	27
<i>Рябичева Л. А., Бабич И. Н., Белозир И. И.</i> ВЛИЯНИЕ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ	36
<i>Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Чумак Н. Ю.</i> РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАПРЯЖЕНИИ ТЕЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	42

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Сотников А. Л., Ковальчик Р. В., Орлов А. А.</i> РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	53
<i>Левченко О. А., Зинченко А. М., Павленко А. Т., Левченко М. Э., Левченко Э. П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ	62
<i>Петров П. А., Зозуля Ф. С., Егоров Е. А., Петров М. П.</i> РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СЛЯБОВОЙ МНЛЗ	73
<i>Денисова Н. А., Маковецкий Р. А.</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	86

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Будзило Е. Е., Збицкая В. В., Псюк М. Ю.</i> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ	97
---	----

CONTENT

SUBSURFACE MANAGEMENT

Polozov Yu. A., Smekalin Ye. S., Lazebnik A. Yu.

WATERPROOFING AND STRENGTHENING THE TECTONIC DISTURBANCE ZONE
DURING SINKING OF A VERTICAL MINE SHAFT5

Korneev S. V., Dobronogova V. Yu.

NEW DEVICE FOR PROCESSING THE ENDS OF FABRIC-PLY BELTS IN A TOOTHED
JOINT16

METALLURGY

Kukharev A. L.

MODELING OF MIXING PROCESSES IN ELECTRO-VORTEX MELT FLOWS27

Ryabicheva L. A., Babich I. N., Belozir I. N.

EFFECT OF SEMI-HOT DEFORMATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF CARBON STEEL36

Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Chumak N. Yu.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL INFORMATION BASE ON FLOW STRESS OF STRUCTURAL
LOW-ALLOY STEEL DURING ROLLING OF PROFILES FOR MINE WORKING SUPPORT42

MECHANICAL ENGINEERING

Sotnikov A. L., Kovalchik R. V., Orlov A. A.

DEVELOPMENT OF WEB APPLICATION ARCHITECTURE FOR OBJECT DETECTION
ON X-RAY IMAGES OF WELDED JOINTS53

Levchenko O. A., Zinchenko A. M., Pavlenko A. T., Levchenko M. E., Levchenko E. P.

MODELLING THE DYNAMICS OF A SINGLE-ROLL TOOTHED CRUSHER62

Petrov P. A., Zozulya F. S., Egorov E. A., Petrov M. P.

DEVELOPMENT OF SYSTEM DESIGN FOR FEEDING THE SLAG-FORMING MIXTURE
INTO SLAB CCM CRYSTALLIZER73

Denisova N. A., Makovetskiy R. A.

SOFTWARE PROGRAMMING FOR ASSESSING PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE
OF A HUMAN-OPERATOR OF METALLURGICAL EQUIPMENT86

CIVIL ENGINEERING

Budzilo E. E., Zbitskaya V. V., Psiuk M. Yu.

CHOOSING THE BEST WAY FOR THE RECONSTRUCTION OF PUBLIC BUILDING
COVERING97

UDC 004 + 621 + 622.2 + 669 + 692.4

EDN: APABYF

**Knowledge-intensive technologies
and equipment in industry
and building**

Scientific journal

Issue 8 (82) 2025

**Establisher:
Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education "Donbass
State Technical University"**

*Registration Certificate for mass media
PI No. FS77-85961 dated 11.09.2023*

*The journal is included in the List of peer-
reviewed scientific editions in which the
main scientific results of thesis for the degree
of Candidate of Sciences and for the degree
of Doctor of Sciences must be published*

Added to scientometrical database of RISC

*Recommended by academic council
of FSEI HE "DonSTU"
(Record № 13 dated 30.06.2025)*

Date of issue: 14.07.2025
Format 60×84½
Conventional printed sheet 13,25
Order № 150
Circulation 200 copies
Printed by PPC of DonSTU
The journal is distributed free of charge

Computer layout
Ismailova L. M.

Cover art design
Chernyshova N. V.

Address of establisher, editorial board, publisher and
printing office:

FSEI HE "DonSTU"
294204, Lugansk People's Republic,
urban district Alchevsk, Alchevsk, Lenin avenue, 16
E-mail: info@dontu.ru
Web-site: <https://dontu.ru>

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Deputy Editor-in-chief

Smekalin E. S. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korshunov G. I. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Eremenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Artiukh V. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Sotnikov A. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Vitrenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuzin A. V. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.
Mikhailov A. N. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kozlov A. M. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.
Korzun E. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bogatyreva E. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Yakovchenko A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Goncharuk A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Prof.
Suleymanova L. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Smolyago G. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:
Russian, English

