

На правах рукописи



**РЫЖИХ ВЛАДИСЛАВ ДМИТРИЕВИЧ**

**ЗАКЛАДОЧНЫЕ ТВЕРДЕЮЩИЕ СМЕСИ  
С НАПРАВЛЕННЫМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ**

**2.1.5. Строительные материалы и изделия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Загороднюк Лилия Хасановна
Официальные оппоненты	Кудяков Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»  Урханова Лариса Алексеевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Дорожно-строительные материалы», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строи- тельный университет»

Защита состоится «07» июня 2024 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Ryzhikh](https://gos_att.bstu.ru/dis/Ryzhikh)

Автореферат разослан «12» апреля 2024 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Д.Ю. Суслов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** При разработке богатейшего месторождения железной руды (содержание железа в руде до 68%) Яковлевского ГОКа подземным способом применяется система заполнения выработанного пространства твердеющей закладкой. Приготовление закладочных смесей осуществляется путем использования портландцемента и кварцевого песка местного карьера, характеризующегося мелкими и очень мелкими песками. Вследствие этого, в зависимости от модуля крупности (максимальный  $M_{кр}=1,19$ ) песков, добытых с различных горизонтов, готовят составы закладочных смесей с разным содержанием портландцемента, что отражается на физико-механических показателях отформованных массивов, характеризующихся изменяющейся плотностью, прочностью и слоистой структурой, что существенно влияет на монолитность и приводит к разрушениям. Расход портландцемента в составе закладочных смесей может достигать 50 %, что связано с отсутствием мелких фракций крупного заполнителя и крупных фракций мелкого заполнителя.

Яковлевский ГОК постоянно наращивает объемы добычи руды, так в 2022 г. ГОК добыл 3,2 млн. т. руды, что на 24% выше показателя 2021 г., в 2023-2024 г. планируется добыть 3,75 млн. т. руды. Для этого потребуются значительные объемы закладочных смесей, что увеличит расход сырьевых материалов, в том числе портландцемента.

В связи с вышеизложенным, оптимизация технологии приготовления закладочных смесей и подбор их рациональных составов, с учетом использования местных ресурсов и эффективных композиционных вяжущих является актуальным, что позволяет существенно снизить затраты на производство.

Диссертационная работа выполнена в рамках Программы «Приоритет – 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова (государственное задание № 11.9329.2017/БЧ) и гранта РФ № 22-19-20115.

**Степень разработанности темы.** Разработкой научно-теоретических основ создания твердеющих закладочных смесей занимались многие российские и зарубежные ученые: Агошков М.И., Бронников Д.М., Городецкий П.И., Именитов В.Р., Кудяков А.И., Куликов В.В., Малахов Г.М., Попов Г.Н., Сергеев А.А, Симачков В.А., Требуков А.Л., Шестаков В.Д., Belagraa L., German V.I., Henley S., Naziemiec Z., Ptak M., и др. В их работах приведены результаты исследований по созданию новых компонентных составов с применением отходов разных отраслей промышленности. Установлено, что все разрабатываемые закладочные смеси отличаются достаточной прочностью на сжатие и растяжение при изгибе. Отмечается, что большое количество научных работ сосредоточено в области создания твердеющей закладки без предварительной механической активации сырьевых материалов в помольных агрегатах, что снижает возможность проявления синергетического потенциала компонентов и смеси в целом. Использование

помольного оборудования в процессе производства закладочных смесей позволит: повысить активность дорогостоящих вяжущих материалов и техногенных отходов; уплотнить структуру кристаллообразований при гидратационных процессах за счет увеличения дисперсности материалов, что положительно скажется на физико-механических показателях закладочного массива; увеличить адгезию закладочной смеси в выработанном пространстве.

Отмечено, что особенности помола сырьевых материалов в роторных шаровых мельницах практически не исследованы, вследствие новизны их конструкции и применения. В настоящей работе предложена технология получения закладочных смесей с применением роторной шаровой мельницы.

**Цель работы.** Разработка научно-обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение закладочной смеси с направленным структурообразованием на основе композиционных вяжущих, гранулированных заполнителей и шлаков.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

- обоснование возможности получения закладочных смесей с требуемыми физико-механическими характеристиками за счет использования композиционных вяжущих и гранулированных заполнителей, приготовленных методом экструзионного формования в шнековом грануляторе, и шлаков;

- выявление закономерностей совместного влияния размеров фракции песка и количества вяжущей композиции на прочность гранулированных заполнителей, а также рецептурных параметров закладочных смесей;

- изучение процессов структурообразования и совместной работы композиционных вяжущих, гранулированных заполнителей и шлаков в составе закладочного массива;

- разработка рецептурно-технологических параметров изготовления закладочных смесей на основе композиционных вяжущих, гранулированных заполнителей и шлаков. Подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований, промышленная апробация.

**Научная новизна.** Предложено научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение закладочных смесей с требуемыми физико-механическими характеристиками, заключающееся в использовании композиционных вяжущих, полученных механоактивацией портландцемента и шлака доменного гранулированного в роторной шаровой мельнице; гранулированного заполнителя, приготовленного методом экструзионного формования в шнековом грануляторе смеси мелкого кварцевого песка и вяжущей композиции, полученной путем механоактивации портландцемента и мелкого кварцевого песка в вихревой струйной мельнице. Механоактивационная обработка при изготовлении вяжущих композиций для гранулированных заполнителей и получении композиционных вяжущих, рациональный подбор компонентов системы, обеспечивает получение закладочных смесей с пределом прочности на сжатие 11,9...25,8 МПа.

Предложена феноменологическая модель структурообразования закладочных смесей, состоящих из композиционного вяжущего, гранулированного заполнителя и шлака. Наличие гранулированного заполнителя, выступающего в роли внутренних демпферов системы, усиливает прочность закладочного мас-

сива вследствие перераспределения части растягивающих и сжимающих напряжений. Механоактивация вяжущих композиций, содержащих портландцемент и мелкий кварцевый песок, способствует аморфизации верхнего слоя частиц кремнеземного компонента, благодаря чему он выступает в качестве центров кристаллизации. В связи с этим, в контактных зонах закладочных массивов с рудным телом и в совокупности с повышенной удельной поверхностью компонентов вяжущего ускоряются физико-химические процессы гидратации, увеличивается количество гидратных фаз, что способствует возрастанию прочности создаваемого массива.

Установлены закономерности совместного влияния размеров фракции песка и количества вяжущей композиции на прочность гранулированного заполнителя, а также рецептурных параметров закладочных смесей: соотношения шлака доменного гранулированного и композиционного вяжущего; гранулированного заполнителя и композиционного вяжущего; гранулированного заполнителя и шлака доменного гранулированного на прочность закладочных массивов. Полученные зависимости позволяют проводить рационализацию закладочных смесей в соответствии с требуемыми характеристиками.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления о процессах синергетического взаимодействия доменных гранулированных шлаков, композиционных вяжущих и гранулированных заполнителей в компонентном составе закладочных смесей, о чем свидетельствуют повышенные физико-механические характеристики образцов при сниженном расходе портландцемента.

Разработаны композиционные вяжущие на основе портландцемента и доменного гранулированного шлака обладают прочностью при сжатии 60,1 МПа и плотностью 1640 кг/м<sup>3</sup>. Установлено, что помол композиционных вяжущих в роторной шаровой мельнице в течение 15 мин позволяет получать материал с удельной поверхностью свыше 900 м<sup>2</sup>/кг с наличием частиц неправильной формы с рваными и оскольчатыми краями, уплотняющими структуру цементного камня.

На основе мелкодисперсных песков фракций  $\leq 0,16$  мм,  $\leq 0,315$  мм,  $\leq 0,63$  мм и вяжущих композиций, полученных совместным измельчением мелких кварцевых песков и портландцемента в вихревой струйной мельнице, приготовлены гранулированные заполнители широкой номенклатуры, усиливающие закладочный массив путем перераспределения растягивающих и сжимающих напряжений.

Разработаны компонентные составы закладочных смесей с требуемыми технологическими характеристиками и наибольшими прочностями на сжатие 25,8 МПа и на растяжение при изгибе 3,6 МПа в возрасте 28 сут на основе композиционных вяжущих, гранулированных заполнителей и шлака доменного гранулированного, что удовлетворяет требованиям к закладочным смесям. Предложена технология производства закладочных смесей.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой для проведения научно-исследовательской работы послужили общепринятые теоретические основы строительного материаловедения с учетом позиций трансдисциплинарности. Работа строилась на базе современных методов исследований: лазерной

гранулометрии, рентгенофазового, растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии. Для решения поставленных задач выполнено математическое моделирование для компонентных составов ГЗ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- теоретическое обоснование и практическое подтверждение возможности использования: мелкодисперсных кварцевых песков в процессе экструзионного гранулирования, как компонента для закладочной смеси; доменного гранулированного шлака в качестве минеральной добавки при получении композиционных вяжущих и закладочных смесей;
- особенности и эффективность структурообразования материалов при помоле в различных помольных установках;
- структурообразование гранулированных заполнителей, композиционных вяжущих и закладочных смесей с учетом химических и структурно-морфологических особенностей компонентов;
- рациональные компонентные составы гранулированных заполнителей, композиционных вяжущих и закладочных смесей на их основе;
- технология производства закладочных смесей на основе гранулированных заполнителей, композиционных вяжущих и доменного гранулированного шлака;
- результаты апробации закладочных смесей на основе гранулированных заполнителей, композиционных вяжущих и доменного гранулированного шлака с расчетом экономической эффективности.

**Степень достоверности результатов работы** обеспечена совокупностью методов проведенных исследований с применением стандартных средств измерений и современного аттестованного оборудования. Полученные результаты подкреплены значительным объемом экспериментальных исследований и не противоречат результатам исследований авторов в данной области тематики и общепринятым фактам. Полученные результаты апробированы в полупромышленных и натуральных условиях.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II Международном онлайн-конгрессе «Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека» (Белгород, 2019); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород, 2020, 2021); VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства (Белгород, 2022); VI Всероссийской научно-практической конференции «Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2022); International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Китай, Пекин, 2022).

**Внедрение результатов исследований.** Выпуск полупромышленных партий гранулированных заполнителей на основе кварцевого песка и портландцемента, композиционных вяжущих и закладочных смесей производился на базе ООО «Стройтехнология». Разработаны технические условия и технологические регламенты на гранулированные заполнители на основе кварцевого песка и портландцемента, композиционные вяжущие и закладочные смеси. Получена выписка из

протокола заседания научно-технического совета ОАО «ВИОГЕМ» №4 от 27 октября 2023 года, свидетельствующая, что результаты диссертационной работы представляют значительный практический интерес и рекомендуются для широкого внедрения при разработке проектных решений по ведению закладочных работ в подземных горных выработках.

Результаты научных исследований и теоретические положения диссертационной работы используются в учебном процессе БГТУ им В.Г. Шухова при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 14 научных публикациях, в том числе в 4 статьях в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьях в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 6 статьях в сборниках трудов конференций. Получен патент на изобретение.

**Личный вклад автора** состоит в обосновании рабочей гипотезы и научной идеи, постановке цели и задач исследования, в теоретическом анализе данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов, анализе и обобщении результатов исследований, формулировке выводов, положений прикладных решений и разработок. Проведена апробация результатов работы.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 201 странице и включает: введение, 5 глав, заключение, список литературы (включающий 200 наименований) и 17 приложений, содержит 75 рисунков и 46 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертации, определены цели и задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены методология и методы исследований; положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности, апробации и результатах внедрения, структуре и объеме работы.

В **первой главе** представлен обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по проблемам закладочных смесей, выборе и применении природного и техногенного сырья для создания закладочных смесей. Приведены технологии приготовления и укладки закладочных смесей.

Изложена **рабочая гипотеза** исследований, заключающаяся в получении закладочных растворов с улучшенными свойствами за счет ввода в компонентный состав *гранулированных заполнителей (ГЗ)*, приготовленных в шнековом грануляторе на основе мелких кварцевых песков и *вяжущих композиций (ВК)*, полученных совместным помолом песков и *портландцемента (ПЦ)* в вихревой струйной мельнице; *композиционных вяжущих (КВ)*, приготовленных в процессе совместной механоактивации портландцемента и *шлаков доменных гранулированных* в разных соотношениях в различных помольных агрегатах и *шлаков (Ш)* – отходов переработки железной руды Яковлевского рудника, как заполнителя, что обеспечит повышение активности всех компонентов системы и, как следствие, увеличит прочность в соответствии с законом средства структур.

Во **второй главе** приведены характеристики сырьевых материалов: портланд-цемент ЦЕМ 0 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент» (ГОСТ 31108-2020); кварцевый песок карьера Яковлевского ГОКа ( $M_k \leq 1,19$ ); шлак доменный гранулированный ПАО «Северсталь». Даны методики проведения экспериментов и характеристики используемого оборудования.

В **третьей главе** описан способ получения ГЗ на основе ВК и мелкодисперсных *кварцевых песков (КП)*. Процесс получения ГЗ включал этапы: подготовка сырьевых компонентов; приготовление ВК; формирование ГЗ; формование образцов-кубов; испытания образцов-кубов при сжатии.

ВК получены смешением ПЦ и КП в различных соотношениях с последующей механо-активацией в вихревой струйной мельнице. Характеристики ВК приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Основные характеристики вяжущих композиций

№ состава	Шифр	Состав	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Сроки схватывания, мин		Прочность при сжатии, МПа в возрасте			
					начало	конец	2 сут		28 сут	
							$R_{сж}$	Прирост,%	$R_{сж}$	Прирост,%
1	ПЦ	ПЦ (без помола)	330	26	150	260	21,2	-	52,4	-
2	ВК-1	ПЦ + 10%КП	653	32	138	271	28,2	33,0	69,5	32,6
3	ВК-2	ПЦ + 20%КП	632	35	127	278	26,1	23,1	66,3	26,5
4	ВК-3	ПЦ + 30%КП	605	38	129	269	23,9	11,3	57,7	10,1

Полученные ВК обладают повышенной водопотребностью в сравнении с исходным ПЦ, что обусловлено увеличенной удельной поверхностью, но при этом отмечается рост прочности образцов в возрасте 2 и 28 сут от 10 до 33% в зависимости от содержания наполнителя (таблица 1). Нормальная густота ВК возрастает с 23 до 46 % в сравнении с ПЦ. Сроки начала схватывания ВК в зависимости от увеличения количества минерального компонента (10-30%) ускоряются в диапазоне от 10,4 до 17,5%, а концы сроков схватывания ВК практически выравниваются. Все составы имеют стабильный набор прочности, что обусловлено уплотнением структуры композиции за счет присутствия минерального наполнителя.

При формировании ГЗ использовали шнековый гранулятор ГРШ-50. Получена цилиндрическая форма ГЗ с размерами  $h=4-7$  мм,  $d=4-5$  мм (рисунок 1). Приготовлено 36 рецептур ГЗ (таблица 2) с КП фракций  $\leq 0,16$  мм,  $\leq 0,315$  мм,  $\leq 0,63$  мм и вяжущими (ПЦ, ВК-1, ВК-2, ВК-3).

**Таблица 2** – Рецептуры гранулированных заполнителей

Показатель	ПЦ			ВК-1			ВК-2			ВК-3		
	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85
Состав ГЗ: ВК/Песок, %	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85	5/95	10/90	15/85
Фракция песка, мм	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Добавление воды от общей массы сухой смеси по фракциям песка соответственно, %	16,2	18	20	16,8	15,3	14,9	17,2	16,4	15,4	17,6	17,8	16,1
	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315
	15,3	16,6	18	16	14,1	13,4	16,4	15,2	13,9	16,7	16,4	14,5
	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	10,7	11,5	12,3	11,2	10	9,2	11,3	10,5	9,5	11,5	11,3	9,9

Разработана методика по определению прочности ГЗ в растворе. Физико-механические показатели при сжатии образцов приведены в таблице 3.

Гранулированные заполнители и скол испытанных образцов-кубов представлены на рисунках 1, 2.



**Рисунок 1** – Гранулированный заполнитель (фракция песка  $\leq 0,63$  мм)



**Рисунок 2** – Скол образца-куба с гранулированным заполнителем (фракция песка  $\leq 0,63$  мм)

Посредством метода математического описания эксперимента исследованы составы на основе 36 рецептур (таблица 3) для фракций КП  $\leq 0,16$  мм,  $\leq 0,315$  мм,  $\leq 0,63$  мм и разработанных вяжущих (ПЦ, ВК-1, ВК-2, ВК-3), получены уравнения регрессии (1) – (3). Установлен рациональный состав ГЗ 0,63+15%ВК-3 с наименьшим расходом портландцемента.

**Таблица 3**– Физико-механические характеристики образцов-кубов

№ состава	Шифр образца	$R_{сж}$ МПа	№ состава	Шифр образца	$R_{сж}$ МПа	№ состава	Шифр образца	$R_{сж}$ МПа	№ состава	Шифр образца	$R_{сж}$ МПа
1.1	0,16+5%ПЦ	14,07	2.1	0,16+5%ВК-1	9,11	3.1	0,16+5%ВК-2	16,19	4.1	0,16+5%ВК-3	15,65
<b>1.2</b>	<b>0,16+10%ПЦ</b>	<b>20,76</b>	<b>2.2</b>	<b>0,16+10 %ВК-1</b>	<b>20,06</b>	<b>3.2</b>	<b>0,16+10%ВК-2</b>	<b>20,34</b>	<b>4.2</b>	<b>0,16+10%ВК-3</b>	<b>15,19</b>
1.3	0,16+15%ПЦ	18,01	2.3	0,16+10%ВК-1	18,16	<b>3.3</b>	<b>0,16+15%ВК-2</b>	<b>22,97</b>	<b>4.3</b>	<b>0,16+15%ВК-3</b>	<b>25,36</b>
1.4	0,315+5%ПЦ	10,53	2.4	0,315+5%ВК-1	15,83	3.4	0,315+5%ВК-2	16,00	4.4	0,315+5%ВК-3	19,96
<b>1.5</b>	<b>0,315+10%ПЦ</b>	<b>20,85</b>	<b>2.5</b>	<b>0,315+10%ВК-1</b>	<b>25,45</b>	<b>3.5</b>	<b>0,315+10%ВК-2</b>	<b>19,1</b>	4.5	0,315+10%ВК-3	18,4
1.6	0,315+15%ПЦ	17,53	2.6	0,315+15%ВК-1	22,55	3.6	0,315+15%ВК-2	18,29	<b>4.6</b>	<b>0,315+15%ВК-3</b>	<b>26,65</b>
1.7	0,63+5%ПЦ	13,88	2.7	0,63+5%ВК-1	24,66	3.7	0,63+5%ВК-2	22,47	4.7	0,63+5%ВК-3	24,37
<b>1.8</b>	<b>0,63+10%ПЦ</b>	<b>21,35</b>	<b>2.8</b>	<b>0,63+10 %ВК-1</b>	<b>23,82</b>	<b>3.8</b>	<b>0,63+10%ВК-2</b>	<b>34,38</b>	4.8	0,63+10%ВК-3	27,21
1.9	0,63+15%ПЦ	21,18	<b>2.9</b>	<b>0,63+15%ВК-1</b>	<b>25,22</b>	3.9	0,63+15%ВК-2	32,33	<b>4.9</b>	<b>0,63+15%ВК-3</b>	<b>32,23</b>
1	ПЦ	36,7	1	ПЦ	36,70	1	ПЦ	36,70	1	ПЦ	36,70

*Уравнение регрессии* для прочности образцов с ГЗ на основе КП фр.  $\leq 0,16$  мм:

$$R_{сж} = 15,518 + 4,418 \cdot x_1 - 1,642 \cdot x_2 - 1,377 \cdot x_3 - 2,495 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,288 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,707 \cdot x_1^2 - 0,578 \cdot x_3^2 \quad (1)$$

*Уравнение регрессии* для прочности образцов с ГЗ на основе КП фр.  $\leq 0,315$  мм:

$$R_{сж} = 17,987 + 2,931 \cdot x_1 - 2,443 \cdot x_2 - 3,268 \cdot x_3 - 2,727 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,253 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,319 \cdot x_2 \cdot x_3 - 2,427 \cdot x_1^2 - 0,581 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

*Уравнение регрессии* для прочности образцов с ГЗ на основе КП фр.  $\leq 0,63$  мм:

$$R_{сж} = 19,201 + 1,227 \cdot x_1 - 1,606 \cdot x_2 - 0,673 \cdot x_3 - 3,176 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,269 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,775 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,426 \cdot x_1^2 \quad (3)$$

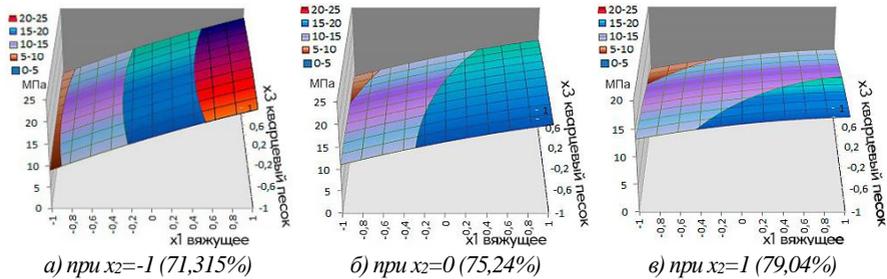
По уравнениям регрессии дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю прочность при сжатии образцов с ГЗ (рисунки 3-5).

Для ГЗ на основе фр. песка  $\leq 0,16$  мм следует отметить, что комбинация вяжущего и песка ( $x_1 \cdot x_2$ ) существенно влияет на прочность ГЗ. Главным компонентом, влияющим на итоговую прочность в ГЗ на основе песка фр.  $\leq 0,16$  мм, является вяжущее ( $x_1$ ).

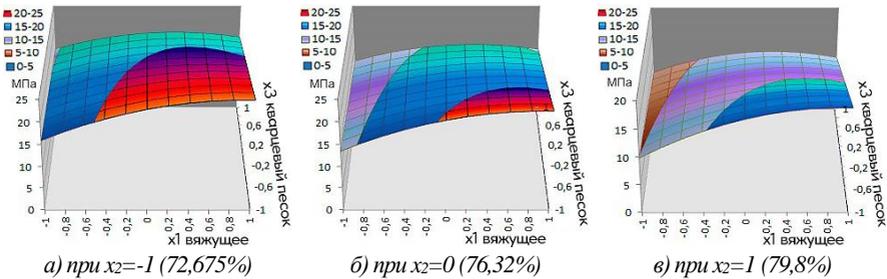
Анализируя полученное уравнение регрессии для ГЗ на основе фр. песка  $\leq 0,315$  мм, выделяются следующие комбинации компонентов, влияющих на прочность: вяжущего и песка ( $x_1 \cdot x_2$ ); вяжущего и кварцевого песка, добавленного в вяжущее ( $x_1 \cdot x_3$ ). Отмечается значительное влияние кварцевого песка в составе ВК на итоговую прочность ГЗ. Данный факт свидетельствует о том, что ВК отличается нестабильностью распределения частиц по объему ГЗ, при этом высок риск получения брака в процессе экструзионного формования ГЗ на основе фр. песка  $\leq 0,315$  мм.

Анализ уравнения регрессии для ГЗ на основе фр.  $\leq 0,63$  мм показал значительное влияние на прочность комбинации вяжущего и песка ( $x_1 \cdot x_2$ ). Установлен средний уровень влияния на прочность в комбинации материалов вяжущего и кварцевого песка в составе вяжущего ( $x_1 \cdot x_3$ ).

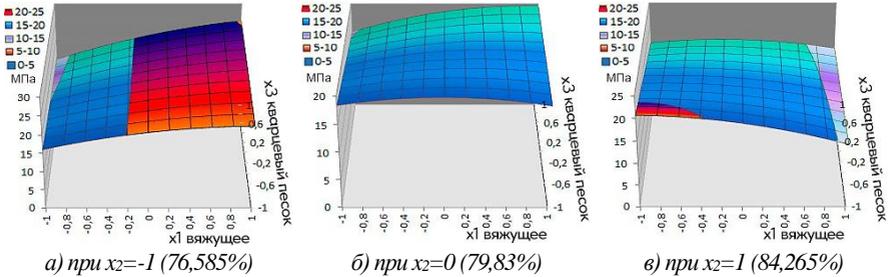
Во всех уравнениях регрессии главным компонентом, влияющим на итоговые прочностные показатели ГЗ, является вяжущее ( $x_1$ ). Оценка математических моделей показала, что перспективный состав ГЗ приготовлен на основе песка фр.  $\leq 0,63$  мм, обеспечивающий наилучшую прочность, при минимальном расходе вяжущего.



**Рисунок 3** – Номограммы зависимости прочности при сжатии образцов ГЗ на основе песка фр.  $\leq 0,16$  мм от процентных расходов вяжущего  $x_1$  ( $x_1 = -1$  (2,884%);  $x_1 = 0$  (7,623%);  $x_1 = +1$  (11,4885%)) и кварцевого песка, в составе вяжущего  $x_3$  ( $x_3 = -1$  (0,416%);  $x_3 = 0$  (1,672%);  $x_3 = +1$  (3,7755%)), при различном содержании песка ( $x_2$ )



**Рисунок 4** – Номограммы зависимости прочности при сжатии образцов ГЗ на основе песка фр.  $\leq 0,315$  мм от процентных расходов вяжущего  $x_1$  ( $x_1 = -1$  (2,9155%);  $x_1 = 0$  (7,731%);  $x_1 = +1$  (11,691%)) и кварцевого песка, в составе вяжущего  $x_3$  ( $x_3 = -1$  (0,42%);  $x_3 = 0$  (1,696%);  $x_3 = +1$  (3,8475%)), при различном содержании песка ( $x_2$ )



**Рисунок 5** – Номограммы зависимости прочности при сжатии образцов ГЗ на основе песка фр.  $\leq 0,63$  мм от процентных расходов вяжущего  $x_1$  ( $x_1 = -1$  (3,0975%);  $x_1 = 0$  (8,1%);  $x_1 = +1$  (12,258%)) и кварцевого песка, в составе вяжущего  $x_3$  ( $x_3 = -1$  (0,444%);  $x_3 = 0$  (1,79%);  $x_3 = +1$  (4,0545%)), при различном содержании песка ( $x_2$ )

Анализ номограмм (рисунки 3-5) показывает, что наиболее высокими прочностными показателями обладают ГЗ на основе песков фр.  $\leq 0,63$  мм с минимальным расходом песка  $x_2$ . На всех номограммах наблюдается рост прочности при увеличении расхода вяжущей композиции. Наиболее перспективными являются составы с минимальным содержанием песка и максимальным содержанием вяжущей композиции, включающей наибольшее количество кварцевого песка.

Таким образом, анализ математических моделей установил наиболее перспективный состав ГЗ, приготовленный на основе песка фр.  $\leq 0,63$  мм и обеспечивающий стабильное повышение прочностных показателей, при наибольшей экономии вяжущего, что позволяет рекомендовать его для использования в дальнейших исследованиях.

В четвертой главе описаны варианты получения КВ, проведены гранулометрический, рентгенофазовый и микроструктурный анализы, изучены физико-механические и технологические показатели для оценки качества КВ.

КВ включают ПЦ и Ш в определенных соотношениях, механоактивированные в различных мельницах: вибрационной (МВ-20), вихревой струйной (ВСМ-01) и роторной шаровой (РШМ-60-7). Составы и характеристики КВ приведены в таблице 4.

Установлено, что механоактивация КВ в различных мельницах обеспечивает увеличение фракции 1-10 мкм: в МВ-20 на 20%, в ВСМ-01 на 55% и в РШМ-60-7 на 75%. Наиболее эффективной является роторная шаровая мельница. Все помольные установки при получении КВ влияют на формирование зерен и гранулометрический состав, что, отражается на нормальной густоте, сроках схватывания и структурообразовании композиционного вяжущего и в итоге на прочности композитов.

Гидравлическая активность шлака по поглощению СаО (метод И.Д. Запорожца) до помола составляла 25 мг/г. После механоактивации в различных помольных агрегатах поглощение СаО шлаком составило: для МВ-20 – 44 мг/г; для ВСМ-01 – 59 мг/г; для РШМ-60-7 – 87 мг/г.

КВ, полученные в РШМ-60-7 (таблица 4) с содержанием Ш от 10 до 40% в возрасте 28 сут, показали прочности при сжатии от 57,8 до 60,1 МПа (прирост прочности от 11,4 до 14,8%); в ВСМ-01 от 51,8 до 56,2 МПа (прирост прочности от 1,2 до 8,9%).

КВ, приготовленные в МВ-20, при добавлении Ш в компонентный состав от 10 до 30% характеризуются снижением прочности. Содержание Ш = 40 % обеспечивает максимальную прочность КВ, полученных при механоактивации в разных мельницах.

**Таблица 4** – Составы композиционных вяжущих, их технологические и физико-механические характеристики

№ п/п	Шифр	Состав	Удельная поверхность после помола, м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Сроки схватывания, мин		ρ <sub>28 сут</sub> кг/м <sup>3</sup>	R <sub>сж</sub> МПа в возрасте	
					начало	конец		2 сут	28 сут
1	ПЦ0	ПЦ	330	26	150	260	1730	21,2	52,4
<b>Вибрационная мельница МВ-20</b>									
2	КВ(ПЦ)1	ПЦ = 100%	690	32	138	192	1810	47,1	60,1
3	КВ(Ш)1	Ш = 100%	645	27	40	170	1570	4,4	11,9
4	КВ1.1	ПЦ/Ш=90/10%	590	31	165	230	1730	49,45	56,9
5	КВ1.2	ПЦ/Ш=80/20%	605	31	160	222	1680	44,3	50,1
6	КВ1.3	ПЦ/Ш=70/30%	615	31	148	207	1770	38,7	45,9
<b>7</b>	<b>КВ1.4</b>	<b>ПЦ/Ш=60/40%</b>	<b>630</b>	<b>29</b>	<b>144</b>	<b>231</b>	<b>1660</b>	<b>40,2</b>	<b>50,1</b>
8	КВ1.5	ПЦ/Ш=50/50%	831	27,5	95	260	1760	26,8	39,0
<b>Вихревая струйная мельница ВСМ-01</b>									
9	КВ(ПЦ)2	ПЦ=100%	887	31,25	84	144	1800	47,9	57,0
10	КВ(Ш)2	Ш = 100%	880	30,75	83	140	1650	8,2	22,2
11	КВ2.1	ПЦ/Ш=90/10%	680	32,5	110	170	1850	50,4	51,8
12	КВ2.2	ПЦ/Ш=80/20%	670	32,25	100	140	1840	47,1	53,3
13	КВ2.3	ПЦ/Ш=70/30%	726	32,1	97	173	1870	46,7	55,8
<b>14</b>	<b>КВ2.4</b>	<b>ПЦ/Ш=60/40%</b>	<b>750</b>	<b>31,5</b>	<b>147</b>	<b>190</b>	<b>1930</b>	<b>41,0</b>	<b>56,2</b>
15	КВ2.5	ПЦ/Ш=50/50%	600	30,75	154	233	1690	39,2	50,0
<b>Роторная шаровая мельница РШМ-60-7</b>									
16	КВ(ПЦ)3	ПЦ = 100%	930	35	94	130	1830	47,7	62,2
17	КВ(Ш)3	Ш = 100%	910	31	87	125	1690	9,0	24,7
18	КВ3.1	ПЦ/Ш=90/10%	985	33	80	128	1670	42,4	57,8
19	КВ3.2	ПЦ/Ш=80/20%	960	32,5	78	118	1552	40,0	59,1
20	КВ3.3	ПЦ/Ш=70/30%	933	32	65	107	1720	37,0	59,9
<b>21</b>	<b>КВ3.4</b>	<b>ПЦ/Ш=60/40%</b>	<b>920</b>	<b>32</b>	<b>60</b>	<b>130</b>	<b>1640</b>	<b>41,0</b>	<b>60,1</b>
22	КВ3.5	ПЦ/Ш=50/50%	948	31,7	100	180	1640	43,4	57,8

Примечание: 1. ПЦ0 – портландцемент ЦЕМ 0 товарный; 2. ПЦ – портландцемент ЦЕМ 0 товарный; 3. Ш – шлак 2-го сорта по ГОСТ 3476-2019

РФА гидратированных КВ в возрасте 28 сут свидетельствуют, что все вяжущие содержат: Ca(OH)<sub>2</sub>, CSH(II), C<sub>3</sub>A·3CaSO<sub>4</sub>·31H<sub>2</sub>O, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>S+C<sub>2</sub>S (таблица 5). Анализ интенсивности дифракционных отражений гидратированных вяжущих КВ 1.4, КВ 2.4 и КВ 3.4 в возрасте 28 сут показывает снижение интенсивности Ca(OH)<sub>2</sub> и возрастание CSH(II), что свидетельствует об активном процессе минералообразования и формировании плотной структуры.

Установлено, что наиболее эффективным помольным агрегатом является РШМ-60-7, обеспечивающий получение КВ с высокой удельной поверхностью. Микроструктурный анализ КВ свидетельствует о формировании плотного гидратированного каркаса с высоким содержанием разноориентированных кристаллических скоплений, образованных на дополнительных подложках высокодисперсных шлаковых частиц, полученных вследствие интенсивного измельчения в эффективных помольных агрегатах, в том числе и в РШМ-60-7.

Наиболее высокими прочностными и технологическими показателями являются КВ, полученные в РШМ-60-7, состава «портландцемент : шлак» – 60:40 (R<sub>сж</sub>=60,1 МПа).

**Таблица 5** – Интенсивность дифракционных отражений минералов гидратированных вяжущих в возрасте 28 суток

Гидратированные вяжущие		КВ(ПЦ)1 (ПЦ=100%)	КВ1.4 (ПЦ/Ш=60/40%)	КВ(ПЦ)2 (ПЦ=100%)	КВ2.4 (ПЦ/Ш=60/40%)	КВ(ПЦ)3 (ПЦ=100%)	КВ3.4 (ПЦ/Ш=60/40%)
Фрагменты дифрактограмм	$(d=3,87 \text{ \AA})$ $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 3H_2O$						
	$(d=4,93 \text{ \AA})$ $Ca(OH)_2$						
	$(d=2,8; 2,97 \text{ \AA})$ $CSH(II)$						

В пятой главе приведены составы и результаты исследований разработанных закладочных растворов на основе ГЗ, КВ и Ш (таблица 6).

Водовяжущее отношение устанавливалось для обеспечения требуемых технологических характеристик закладочных растворов: растекаемости, подвижности, водоотделения и предельного напряжения сдвига, с учетом усадки закладочного массива.

**Таблица 6** – Компонентные составы закладочных смесей

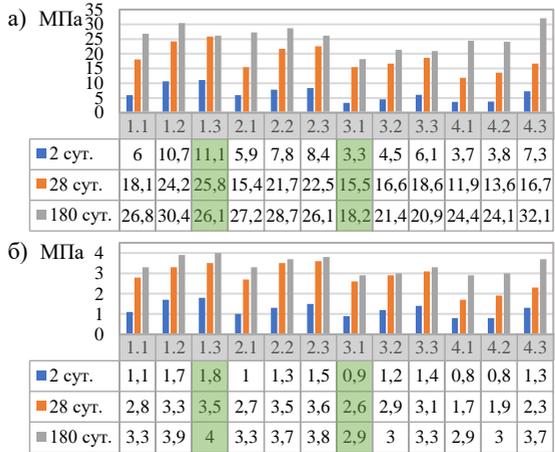
№ п/п	Шифр	Компонентный состав закладочной смеси, мас. %			В/Вяж	Объем заполнения формы ГЗ, %	Водоотделение, %	Предельное напряжение сдвига, $\tau_0$ , Па	Усадка, %	Растекаемость, см	Подвижность (конус), см
		КВ	Ш	ГЗ							
1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	14
1	1.1	30	60	10	1,13	0,25	1,6	119	7	19,3	20 (П4)
2	1.2	45	45	10	0,75	0,25	1,1	129	8	21,1	21 (П5)
3	1.3	54	36	10	0,67	0,25	1	96	9	22,8	22 (П5)
4	2.1	27,7	55,3	17	1	0,5	1,5	126	6	19,7	19 (П4)
5	2.2	41,5	41,5	17	0,77	0,5	1	140	7	21,2	21 (П5)
6	2.3	49,8	33,2	17	0,67	0,5	0,8	128	8	20,4	20 (П4)
7	3.1	25,3	50,7	24	1	0,75	1,4	127	5	20,1	19 (П4)
8	3.2	38	38	24	0,85	0,75	1	149	6	21,5	21 (П5)
9	3.3	45,6	30,4	24	0,67	0,75	0,8	147	7	20,5	19 (П4)
10	4.1	33,4	66,6	0	1,15	0	1,8	98	9	21,3	22 (П5)
11	4.2	50	50	0	0,75	0	1,6	107	10	22,1	23 (П5)
12	4.3	60	40	0	0,55	0	1,3	104	12	20,2	22 (П5)

Динамика нарастания прочности на сжатие и на растяжение при изгибе закладочных растворов в возрастах 2, 28 и 180 сут (рисунок 6) свидетельствует о стабильном нарастании прочности. Наибольшей прочностью на сжатие обладает состав 1.3 ( $R_{сж28сут}=25,8$  МПа).

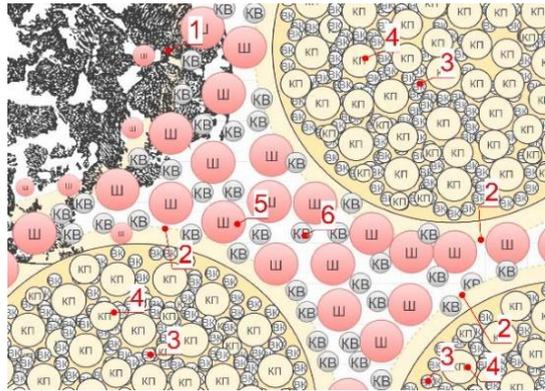
Установлено, что прочность образцов возрастает пропорционально увеличению содержания КВ в составе. Наличие ГЗ упрочняет закладочный раствор вследствие перераспределения части растягивающих и сжимающих напряжений, которые выступают внутренними демпферами системы.

Предлагается модель формирования закладочных растворов в толще и на контактных зонах закладочных массивов с рудным телом, где формируется прочный конгломерат из полученных КВ, ГЗ и Ш (рисунок 7). Вследствие высокой аморфизации минеральных наполнителей создаются благоприятные условия для формирования дополнительных гидросиликатных фаз, что способствует направленному структурообразованию закладочного массива с учетом закона сростства структур. Обеспечивая требуемую подвижность и растекаемость закладочной твердеющей смеси возможно добиться высокой адгезии с рудным телом.

РФА закладочных растворов установил присутствие следующих гидратных фаз:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CSH}(\text{II})$ ,  $\text{C}_2\text{AN}_8$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $6\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Гидратация ПЦ в присутствии Ш характеризуется более сложными взаимодействиями в системе, так шлак в отдельности обеспечивает формирование минералов: гидрогеленита  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ , гидрогранатов  $\text{C}_3\text{AS}_{3-n}\text{H}_n$ , твердых растворов гидросульфалоуминатов кальция.



**Рисунок 6** – Предел прочности на сжатие (а) и изгибе (б) закладочных растворов



**Рисунок 7** – Структура закладочного массива:

- 1 – рудное тело; 2 – гранулированные заполнители;
- 3 – вяжущие композиции; 4 – кварцевые пески;
- 5 – доменные гранулированные шлаки;
- 6 – композиционные вяжущие

На рентгенограмме гидратированных закладочных растворов выявлена повышенная интенсивность дифракционных максимумов, присущих минералу – деллаиту  $6\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (рисунок 8), который обеспечивает дополнительную прочность раствору. Установлено, что наиболее интенсивные дифракционные максимумы деллаита присущи растворам, содержащим наименьшее количество ГЗ. Формирование деллаита происходит вследствие совокупности ряда факторов: присутствием Ш; повышенным содержанием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; определенным соотношением компонентов в системе; а также содержанием воды при В/Ц=0,75.

Анализ микроструктуры гидратированных закладочных растворов (рисунок 9) показал, что при повышении содержания ГЗ пористость образцов увеличивается, при этом снижается расход вяжущего, но общая водопотребность закладочных растворов возрастает. Во всех образцах наблюдается образование пластинчатых (чешуйчатых) и призматических кристаллов гидросиликатов кальция, плотных кристаллических скоплений с зубуренными краями белита, удлиненно-пластинчатых кристаллов деллаита.

Предложен широкий спектр компонентных составов закладочных смесей и установлен состав 1.3 (КВ = 54 %, Ш = 36 %, ГЗ = 10 %) с наибольшим значением прочности на сжатие в возрасте 28 сут  $R_{\text{сж}}=25,8$  МПа. С точки зрения экономической эффективности и нормативных требований перспективным является компонентный состав 3.1, обладающий прочностью на сжатие в возрасте 28 сут  $R_{\text{сж}}=15,5$  МПа, с наименьшим расходом КВ = 25,3 %, с содержанием Ш = 50,7 % и ГЗ = 24 %.

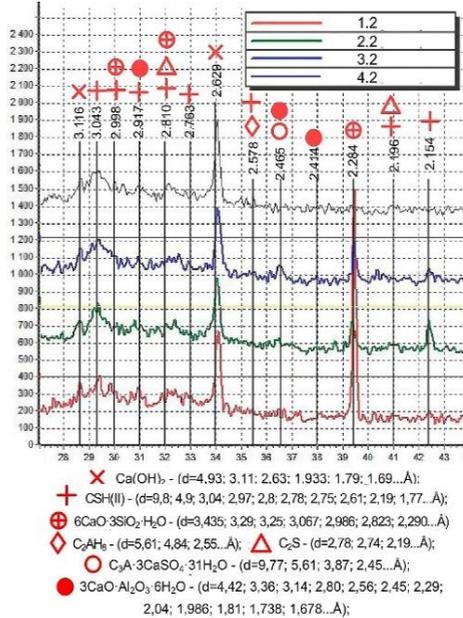


Рисунок 8 – Рентгенограмма гидратированных закладочных смесей

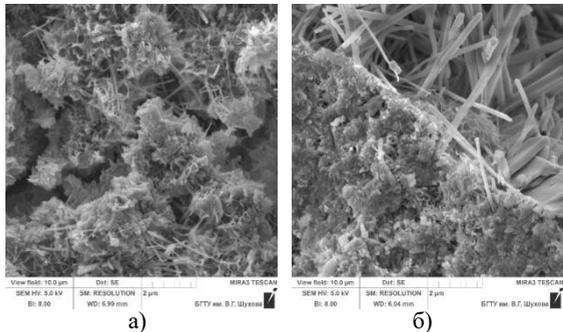
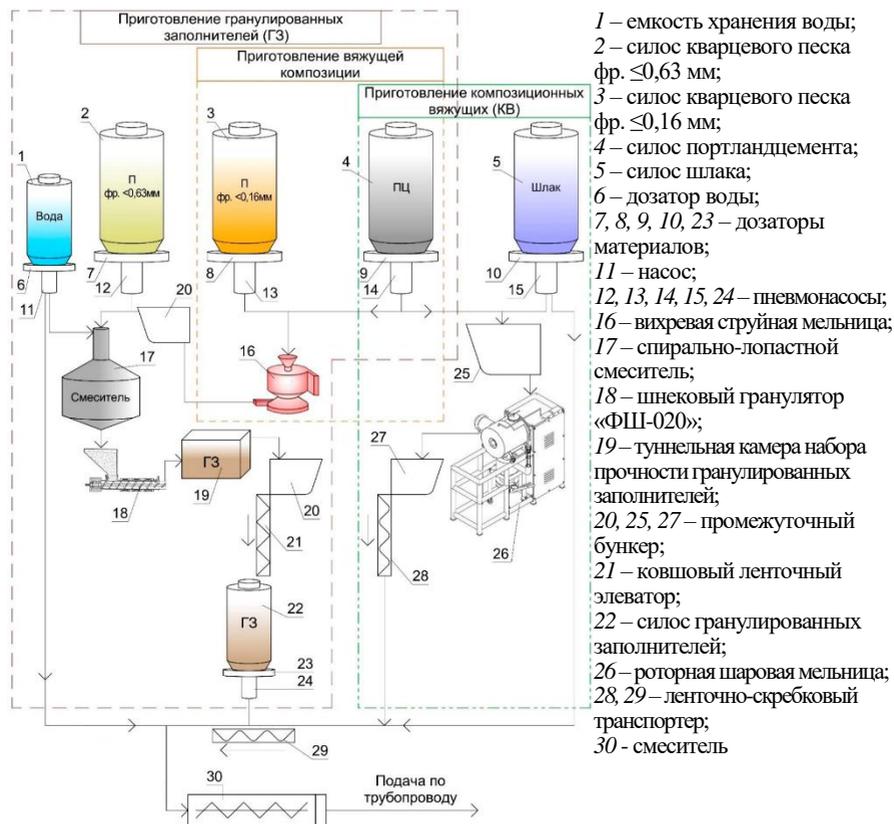


Рисунок 9 – Микроструктура поверхности сколов образцов закладочного массива в возрасте: а – 28 сут; б – 180 сут

Разработана технологическая схема производства закладочных смесей (рисунок 10), приготовленных с применением ГВ, ГЗ и Ш, включающая две основные стадии: приготовление ГЗ и КВ. Стадия приготовления ГЗ включает промежуточный этап производства ВК. Из подготовленных компонентов осуществляется производство закладочных смесей.



**Рисунок 10** – Технологическая схема производства закладочной смеси

Выполнен расчет экономической эффективности для наиболее рационального состава 3.1. Расчеты экономической эффективности производили по сравнительно-аналитической методике, объектом сравнения приняты данные о закладочных смесях и оборудовании ООО «Корпанга» (Яковлевский ГОК). Установлено, что экономия ПЦ при введении новой технологии производства достигает 40%. Расчеты показали, что срок окупаемости предложенной технологии с учетом затрат на покупку нового оборудования и электроснабжения при производстве закладочных смесей составляют 0,4 года.

Разработан пакет нормативных документов для внедрения ГЗ, КВ и ЗС. Проведена полупромышленная апробация.

На производственном участке ООО «Стройтехнология» проведены натурные испытания закладочного массива с компонентным составом КВ : Ш : ГЗ = 25,3%(КВ) : 50,7%(Ш) : 24%(ГЗ) в форме куба размерами 1,0×1,0×1,0 м, который показал прочность в нормируемых пределах (13,9 МПа).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Предложено научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение закладочных смесей с требуемыми физико-механическими характеристиками, заключающееся в использовании композиционных вяжущих, полученных механоактивацией портландцемента и шлака доменного гранулированного в роторной шаровой мельнице; гранулированного заполнителя, приготовленного методом экструзионного формирования в шнековом грануляторе смеси мелкого кварцевого песка и вяжущей композиции, полученной путем механоактивации портландцемента и мелкого кварцевого песка в вихревой струйной мельнице. Механоактивация, рациональный подбор компонентов и параметров изготовления композиционных вяжущих, шлаков и вяжущих композиций, в совокупности с гранулированным заполнителем, обеспечивает получение закладочных смесей с пределом прочности на сжатие 11,9...25,8 МПа.

Предложена феноменологическая модель структурообразования закладочных смесей, состоящих из композиционного вяжущего, гранулированного заполнителя и шлака. Наличие гранулированного заполнителя, выступающего в роли внутренних демпферов системы, усиливает прочность закладочного массива вследствие перераспределения части растягивающих и сжимающих напряжений. Механоактивация вяжущих композиций, содержащих портландцемент и мелкий кварцевый песок, способствует аморфизации верхнего слоя частиц кремнеземного компонента, благодаря чему он выступает в качестве центров кристаллизации. В связи с этим, в контактных зонах закладочных массивов с рудным телом в совокупности с повышенной удельной поверхностью вяжущей составляющей, ускоряются физико-химические процессы гидратации, увеличивается количество гидратных фаз, что способствует возрастанию интегральной прочности создаваемого массива.

Установлены закономерности совместного влияния размеров фракции песка и количества вяжущей композиции на прочность гранулированного заполнителя, а так же рецептурных параметров закладочных смесей: соотношения шлака доменного гранулированного и композиционного вяжущего; гранулированного заполнителя и композиционного вяжущего; гранулированного заполнителя и шлака доменного гранулированного на прочность закладочных массивов. Полученные зависимости позволяют проводить рационализацию закладочных смесей в соответствии с требуемыми характеристиками.

Разработаны композиционные вяжущие на основе портландцемента и доменного гранулированного шлака обладают прочностью при сжатии 60,1 МПа и плотностью 1640 кг/м<sup>3</sup>. Установлено, что помол композиционных вяжущих в роторной шаровой мельнице в течение 15 мин позволяет получать материал с удельной поверхностью свыше 900 м<sup>2</sup>/кг с наличием частиц неправильной формы с рваными и оскольчатými краями, уплотняющими структуру цементного камня.

На основе мелкодисперсных песков фракций  $\leq 0,16$  мм,  $\leq 0,315$  мм,  $\leq 0,63$  мм и вяжущих композиций, полученных совместным измельчением мелких кварцевых песков и портландцемента в вихревой струйной мельнице, приготовлены гранулированные заполнители широкой номенклатуры, усиливающие закладочный массив путем перераспределения растягивающих и сжимающих напряжений.

Разработаны компонентные составы закладочных смесей с требуемыми технологическими характеристиками и наибольшими прочностями на сжатие 25,8 МПа и на растяжение при изгибе 3,6 МПа в возрасте 28 сут на основе композиционных вяжущих, гранулированных заполнителей и шлака доменного гранулированного, что удовлетворяет требованиям к закладочным смесям. Предложена технология производства закладочных смесей.

Получены многофакторные математические модели для разработки составов гранулированных заполнителей, позволяющие проводить оптимизацию производства закладочных растворов с требуемыми характеристиками.

Разработаны технические условия и технологические регламенты по получению гранулированных заполнителей, композиционных вяжущих и закладочных смесей. Получена выписка из протокола заседания научно-технического совета ОАО «ВИОГЕМ» №4 от 27 октября 2023 года, свидетельствующая, что результаты диссертационной работы представляют значительный практический интерес и рекомендуются для широкого внедрения при разработке проектных решений по ведению закладочных работ в подземных горных выработках.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** к применению на предприятиях по добыче полезных ископаемых для закладки подземных выработок, а также использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Перспективы дальнейших исследований.** Целесообразно разработать технологию получения гранулированных заполнителей сферической формы с использованием доменных гранулированных шлаков, получить композиционные вяжущие с повышенными прочностными характеристиками с использованием техногенных отходов КМА, а также продолжить исследования по разработке эффективных составов закладочных смесей с изучением процессов структурообразования композитов.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

### *В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК*

1. Загороднюк, Л.Х. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **В.Д. Рыжих**, Д.А. Сумской, Д.А. Синебок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 5. – С. 28-35.

2. Загороднюк, Л.Х. Роль гранулометрии смешанных вяжущих в формировании их микроструктуры и прочности [Текст] / Л.Х. Загороднюк, Д.С. Махортов, **В.Д. Рыжих**, Д.А. Сумской, М.В. Дайронас // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – №7. – С. 33-43.

3. Загороднюк, Л.Х. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях (часть 2) [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **В.Д. Рыжих**, Д.С. Махортов, Д.А. Синебок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – №8. – С. 17–25.

4. Загороднюк, Л.Х. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях (часть 3) [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **В.Д. Рыжих**, Д.С. Махортов, Д.А. Синебок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – №9. – С. 20–27.

*В зарубежных изданиях индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science*

5. Zagorodnyuk, L.H. Backfilling for mines [Text] / L. H. Zagorodnyuk, A.S. Chernysh, V.S. Lesovik, A. Yu. Schekina, **V.D. Ryzhikh**, D.A. Sumskey, D.A. Sinebok // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol. 1(952). – P. 012066. DOI: 10.1088/1757-899X/952/1/012066.

6. Zagorodnyuk, L.H. Method of Extrusion Granulation of Aggregates for the Preparation of Filling Mixtures [Text] / L.H. Zagorodnyuk, **V.D. Ryzhikh**, D.A. Sumskey, D.S. Makhortov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. Vol. 151. – P. 22–28. DOI: 10.1007/978-3-030-72910-3\_4.

7. Lesovik, V. Granular Aggregates Based on Finely Dispersed Substandard Raw Materials [Text] / V. Lesovik, L. Zagorodnyuk, **V. Ryzhikh**, R. Lesovik, R. Fediuk, N. Vatin, M. Karelina // Crystals. – 2021. –Vol. 4 (11). – P. 369. DOI: 10.3390/cryst11040369.

8. Zagorodnyuk, L.H. Construction and analysis of mathematical models of granular aggregates [Text] / L.H. Zagorodnyuk, **V.D. Ryzhikh**, G.A. Syitov, D.A. Sumskey // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2758. – P. 020001. DOI: 10.1063/5.0130752.

*В сборниках трудов конференций*

9. **Рыжих, В.Д.** Проектирование составов ремонтных смесей с учетом закона родства структур [Текст] / В.Д. Рыжих, Л.Х. Загороднюк, Д.С. Махортов, А.Д. Кожухов, А.С. Чепенко, М.С. Махортов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: сб. материалов II Международного онлайн-конгресса, посвященного 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, 4–5 декабря 2019 года. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 246–250.

10. **Рыжих, В.Д.** Основные требования и условия производства закладочных масивов [Электронный ресурс] / В.Д. Рыжих, Д.С. Махортов, Д.А. Синебок // Сб. материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород, 2020. – URL: <https://drive.google.com/file/d/1msoURGVIGOVb4zlt3sXcWQQtJa2hMc4VO/view?pli=1>.

11. Григоров, А.С. Построение и анализ математических моделей для гранулированных заполнителей [Электронный ресурс] / А.С. Григоров, **В.Д. Рыжих**, Г.А. Сытов // Сб. материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород, 2021. – URL: <https://drive.google.com/drive/folders/10oKab67K6k8HI-W-RlQweAaBOzuLtZg5>

12. Загороднюк, Л.Х. Анализ теоретических положений о механизме гранулирования материалов [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **В.Д. Рыжих**, Г.А. Сытов, А.А. Водопьянов // Сб. докладов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. «Наука и инновации в строительстве» 14 апреля 2021 г. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2022. – С. 79-82.

13. Загороднюк, Л.Х. Закладка выработанного пространства горных массивов [Текст] / Л.Х. Загороднюк, Ю.С. Оноприенко, **В.Д. Рыжих**, Г.А. Сытов, А.Д. Кожушков // Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. 17-21 января 2022 г. – Владивосток: ВУЦ ДВФУ. – 2022. – С. 210-216.

14. Zagorodnyuk, L.Kh. Affinity of structures – design principle and creation of effective composites [Text] / L. Kh. Zagorodnyuk, S.V. Masalitina, **V.D. Ryzhykh**, D.S. Makhorov // Proceedings of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. January 26, 2022. – Beijing, PRC. – 2022. – P. 125-131.

#### *Объекты интеллектуальной собственности*

15. Пат. №2795801 РФ, МПК С04В 20/00 (2006.01), С04В 28/04 (2006.01), С04В 28/08 (2006.01), С04В 111/20 (2006.01). Гранулированный наполнитель для бетонной смеси, состав бетонной смеси для получения бетонных строительных изделий, бетонное строительное изделие [Текст] / Л.Х. Загороднюк, **В.Д. Рыжих**, Д.С. Махортов, Д.А. Сумской, Г.А. Сытов, А.С. Черныш, Д.А. Рыжих, Аль Мамури Саад Кхалил Шаид, заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования БГТУ им. В.Г. Шухова. – № заявки 2022110127; заявл. 14.04.2022; опубл. 11.05.2023. Бюл. №14. – 13 с.

## **РЫЖИХ ВЛАДИСЛАВ ДМИТРИЕВИЧ**

### **ЗАКЛАДОЧНЫЕ ТВЕРДЕЮЩИЕ СМЕСИ С НАПРАВЛЕННЫМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ**

#### **2.1.5. Строительные материалы и изделия**

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 05.04.2024.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ №52.

Отпечатано в БГТУ им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46