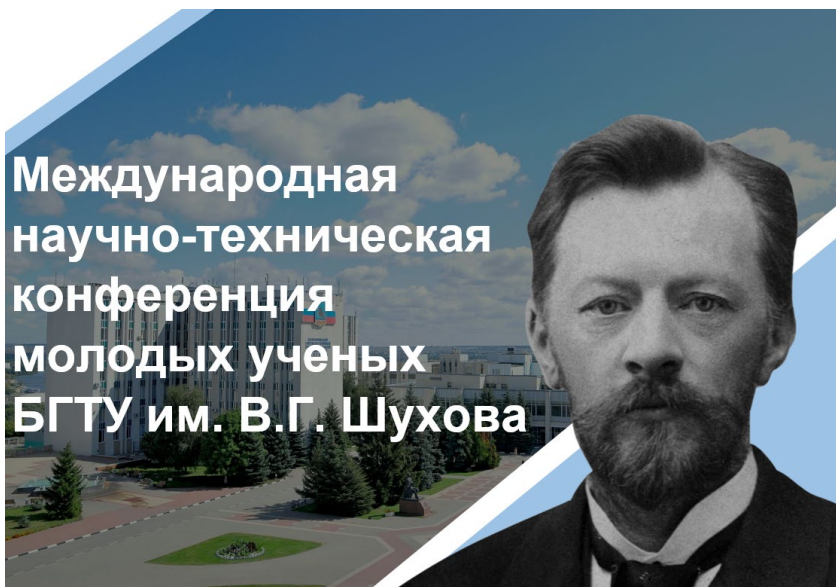


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Российская академия архитектуры и строительных наук
Администрация Белгородской области
ФГБОУ ВО Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова
Международное общественное движение инноваторов
«Технопарк БГТУ им. В.Г. Шухова»



Сборник докладов

Часть 11

**Повышение качества, энерго- и ресурсосбережения в
производстве силикатных и композиционных
материалов**

Белгород
29-30 мая 2025 г.

УДК 005.745
ББК 72.5+74.48
М 43

**Международная научно-техническая конференция
молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова
[Электронный ресурс]:**
М 43 Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – Ч. 11. – 191 с.

ISBN 978-5-361-01461-3

В сборнике опубликованы доклады студентов, аспирантов и молодых ученых, представленные по результатам проведения Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова.

Материалы статей могут быть использованы студентами, магистрантами, аспирантами и молодыми учеными, занимающимися вопросами энергоснабжения и управления в производстве строительных материалов, архитектурных конструкций, электротехники, экономики и менеджмента, гуманитарных и социальных исследований, а также в учебном процессе университета.

УДК 005.745
ББК 72.5+74.48

ISBN 978-5-361-01461-3

©Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2025

*Алексеев В.Ю., Кривошеин Д.В., Манаа И.
 Научный руководитель: Долгова Е.П., канд. техн. наук, доц.
 Белгородский государственный технологический университет
 им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ НЕСВЯЗАННОГО ОКСИДА КАЛЬЦИЯ В КЛИНКЕРЕ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА

Завершенность процессов клинкерообразования достоверно можно оценить по содержанию свободного оксида кальция, не связанного в клинкерные минералы. Как правило, его количество ограничивается до 1% для мокрого способа или до ~2% при сухом способе производства.

В результате высокотемпературных процессов рекристаллизации оксид кальция в клинкере имеет крупные плотные малодефектные кристаллы, медленно гидратирующие в уже затвердевшем цементном камне с увеличением в объеме и разрушающие его [1].

Появление повышенного количества свободного СаО в клинкере является технологическим нарушением, причины которого разнообразны, а такой клинкер считается некондиционным.

В данной работе рассмотрен вариант снижения негативного влияния оксида кальция, в основе которого лежит известная пуццолановая реакция взаимодействия извести с активными минеральными добавками.

При пониженных температурах и длительной выдержке из рядовой заводской сырьевой смеси были синтезированы лабораторные клинкера с 2, 9 и 12% СаО_{св.} При помоле цементов в качестве активной минеральной добавки в количестве 5 или 10% к клинкерам были введены: сланцы, предварительно обожжённые при 800°C, зола-унос или молотый кирпич (Табл. 1). Добавки преимущественно состоят из аморфных SiO₂ и Al₂O₃.

Таблица 1 – Химическая характеристика добавок, %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	ППП
Зола-унос	57,86	29,03	6,18	1,95	1,13	-	2,62	-	-
Кирпич	58,8	21,7	9,3	0,6	0,6	-	2,88	-	6,2
Глинистые сланцы	62,81	15,33	7,50	5,08	3,59	0,46	2,10	-	6,34

Сравнение прочностных показателей цементного камня, определенных в малых образцах-кубиках с ребром 1,41 см, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние ввода активных минеральных добавок на прочностные свойства цементов с различным содержанием $\text{CaO}_{\text{св}}$ в клинкере

$\text{CaO}_{\text{св}}$ в клинкере	Активная минеральная добавка	Количество добавки, %	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте, сут.		
			2	7	28
2%	—	0	56,4	70,5	74,9
	Сланцы обож.	5	52,2	72,3	75,8
	Зола-унос		47,0	51,2	51,5
	Кирпич		42,3	49,9	56,8
9%	—	0	26,2	46,6	46,2
	Сланцы обож.	10	36,1	64,2	85,4
	Зола-унос		34,4	54,2	75,0
	Кирпич		31,3	55,8	74,9
12%	—	0	-	-	-
	Сланцы обож.	10	20,2	45,2	61,1
	Зола-унос		18,5	43,7	53,3
	Кирпич		-	-	-

Как видно, с повышением содержания несвязанного оксида кальция в бездобавочном клинкере с 2 до 9% снижается прочность во все сроки твердения в 1,6-2 раза, при этом после 7 суток набора прочности нет. Это объясняется пониженным количеством алита, а также частичным разрушением цементного камня в результате неравномерного расширения в объеме при твердении. При 12% $\text{CaO}_{\text{св}}$ образцы разрушились полностью (не имели прочности ввиду отсутствия алита).

Введение активных минеральных добавок позволило в некоторых вариантах нивелировать отрицательное воздействие $\text{CaO}_{\text{св}}$ на прочность образцов. По-видимому, это связано с образованием дополнительного количества нерастворимых гидросиликатов кальция в результате пуццолановой реакции между гидратирующим CaO и аморфным кремнеземом добавок. Наибольший эффект наблюдался при вводе обожженного глинистого сланца.

Глинистые сланцы, как и большинство применяемых в цементной промышленности глин, полиминеральны, состоят преимущественно из природных водных алюмосиликатов с примесями кварца и полевых шпатов.

При нагревании глинистые минералы дегидратируют при различных температурах, в результате чего образуется аморфный продукт, состоящий из оксидов кремния и алюминия.

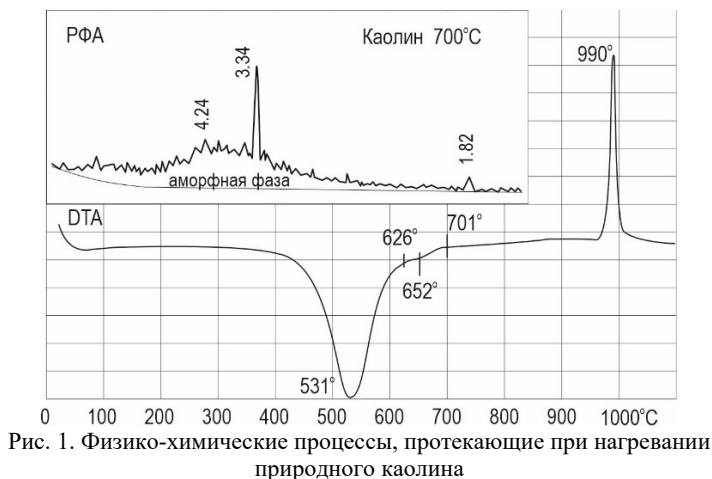


Рис. 1. Физико-химические процессы, протекающие при нагревании природного каолина

Например, дифференциально-термический анализ природного каолина показал, что температурный интервал дегидратации каолинита, основного породообразующего минерала глин, приходится на 450–700°C, и согласно результатам рентгенофазового анализа в обожжённом при 700°C каолине не фиксируется иных кристаллических фаз, кроме кварца (Рис.1).

Превращения глинистых пород полиминерального состава сложнее, дегидратация проходит поэтапно (Рис.2), однако основная потеря воды к 800°C завершена.

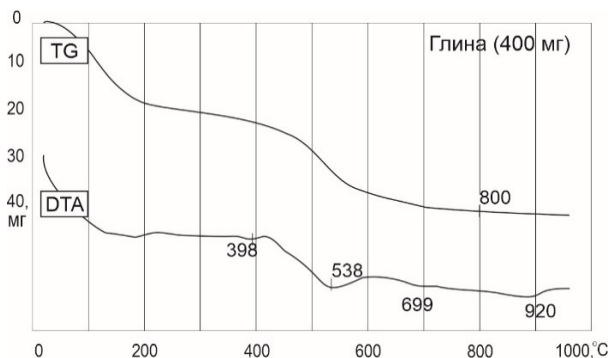


Рис. 2. Дифференциально-термический анализ полиминеральной глины

Таким образом, в качестве активной минеральной добавки к цементу, снижающей отрицательное воздействие несвязанного СаО в клинкере, можно использовать обожженные до 700-800°C глинистые породы, которые традиционно используются как сырьевой компонент.

В реальном производстве для кальцинации глинистых минералов целесообразно использовать тепло выходящего из печи клинкера, подавая глинистую породу на горячую решетку холодильника [3, 4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов: в 2-х ч. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – Ч.1. – 240 с.
2. Новоселов А.Г. Исследование процесса тепломассообмена в колосниковом холодильнике / А.Г. Новоселов, В.К. Классен // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2008. – №2 – С. 60-63.
3. Тинель К.-К. Эффективность использования кальцинированных глин в составе строительных материалов / К.-К. Тинель, С. Шерб, К. Хухоловски, Н. Бойнтнер // Цемент и его применение. – 2018. – №6 – С.1-5.

Арепьева С.Д., Таралло З.В.

Научный руководитель: Новоселова И.Н., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ВЛИЯНИЕ ТОНКОСТИ ПОМОЛА КАРБОНАТНОГО КОМПОНЕНТА СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ОБЖИГ КЛИНКЕРА

Треть от общих затрат электроэнергии на производстве цемента занимает помол сырьевых компонентов, в частности наиболее трудно размалываемыми являются карбонатные породы [1]. Их содержание в клинкере составляет более 70%. При этом реакционная способность карбонатных компонентов может отличаться в зависимости от того, какой породой представлен карбонат кальция. Более твердые породы, такие как известняк и мрамор обладают худшей реакционной способностью, чем мел и мергель [2]. Поэтому одним из способов снижения потребления электроэнергии помольным оборудованием может являться загрубление помола сырьевой смеси на основе мягких карбонатных компонентов.

Целью данной работы является исследование влияния грубомолотой фракции карбонатного компонента на процесс клинкерообразования.

С этой целью были приготовлены 4 смеси с разными карбонатными компонентами (известняк и реактив карбоната кальция) и содержанием грубомолотой фракции 0 и 30% остатка на сите 008. При этом остаток на сите 02 составлял 0% для всех вариантов смесей. Коэффициент насыщения сырьевой смеси и клинкера составлял 0,96. Выбор данного КН обусловлен тем, что основной характеристикой получаемого цемента является прочность в начальные сроки твердения [3-4]. Повышение прочности в начальные сроки твердения можно добиться повышением коэффициента насыщения клинкера. Кроме того, при сухом способе производства из-за плохого усреднения сырьевой смеси, ее коэффициент насыщения также может увеличиваться, и в некоторых случаях приближаться к 1. Это требует определенного режима обжига во вращающейся печи и может привести к повышению расхода топлива.

Сырьевая смесь №1 состояла из известняка, глины, конверторного шлама и бокситов. Сырьевая смесь №2 – реактива карбоната кальция, глины, конверторного шлама и бокситов.

Химический состав сырьевых смесей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сырьевой смеси

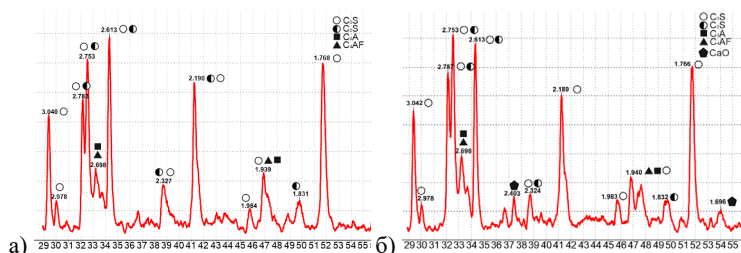
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Прочее	ППП
Сырьевая смесь №1	43,58	13,75	3,40	2,84	0,77	35,65
Сырьевая смесь №2	43,40	13,69	3,39	2,83	1,55	35,12

Обжиг производился в лабораторной печи при 1450 °С с выдержкой в течении 1 часа. Охлаждение осуществлялось в печи до 1250°С со скоростью около 20 °С/мин и далее резко на воздухе до температуры окружающей среды.

Фазовый состав клинкеров на основе сырьевой смеси №1 характеризуется наличием основных клинкерных минералов. При этом на рентгенограммах клинкеров, полученных на основе сырьевой смеси с известняком присутствуют отражения свободного оксида кальция (А 2,4; 1,69) (рис. 1 б). Содержание СаО_{св} в клинкерах, определенное этилово-глицератным методом, составило 0,3% для клинкера, синтезированного из сырьевой смеси без остатка на сите 008, и 0,6% для клинкера, синтезированного из сырьевой смеси с 30% остатком известняка на сите 008.

Фазовый состав клинкеров на основе сырьевой смеси №2, так же, как и в предыдущем случае, характеризуется наличием основных клинкерных минералов. Однако свободный оксид кальция на рентгенограммах не идентифицируется (рис. 2). Отсутствие СаО_{св} в клинкерах подтверждается при определении его этилово-глицератным методом.

Исследование образцов рентгенофазовым анализом показало наличия пика 1,69 и 2,40 СаО в образцах клинкера состава 1 (рис. 1 б).



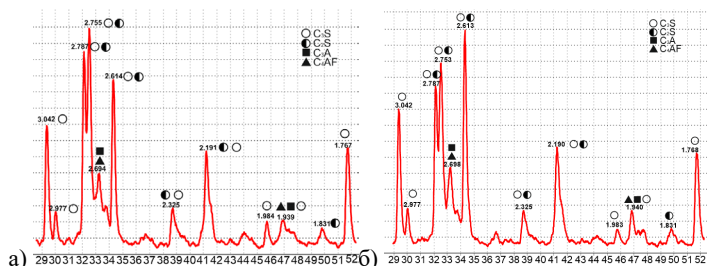


Рис. 2 Рентгенограмма клинкера состава 2: а) остаток на сите 008 0%;
б) остаток на сите 008 30%

Петрографический анализ выявил, что все смеси, отвечают заданным КН и минералогическому составу.

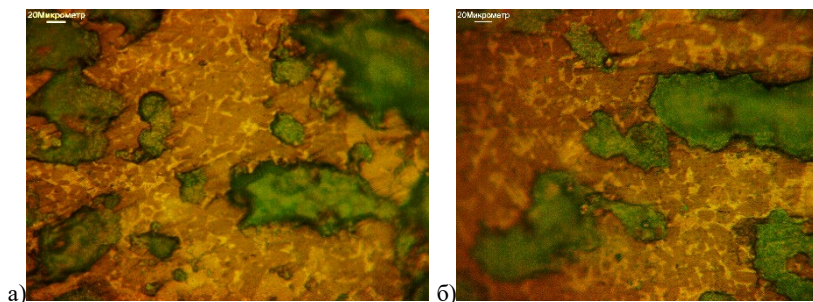


Рис. 3 Микроструктура клинкера состава 1: а) остаток на сите 008 0%;
б) остаток на сите 008 30%

На рисунке 3 представлены образцы клинкера, при синтезе которых в качестве карбонатного компонента использовался известняк. Клинкер, синтезированный с известняком с 0% остатка на сите 008, имеет гломеробластическую микроструктуру (рис. 3а), размер кристаллов алита составляет 10-40 мкм, структура более пористая, чем образца клинкера, синтезированного с известняком с остатком 30% на сите 008. Присутствуют поля с мелко кристаллическим алитом (10-20 мкм). Крупные кристаллы алита имеют форму неправильных многоугольников, а мелкие – коротких призматических структур. Белит имеет округлую форму, распределен равномерно. Клинкер, синтезированный с известняком с 30%-м остатком на сите 008 имеет монаобластическую структуру (рис. 3б). Алит в клинкере представлен в основном сросшимися кристаллами размером от 10 до 40 мкм. Белит имеет округлую форму, распределен равномерно. Встречаются зерна алита с включениями белита.

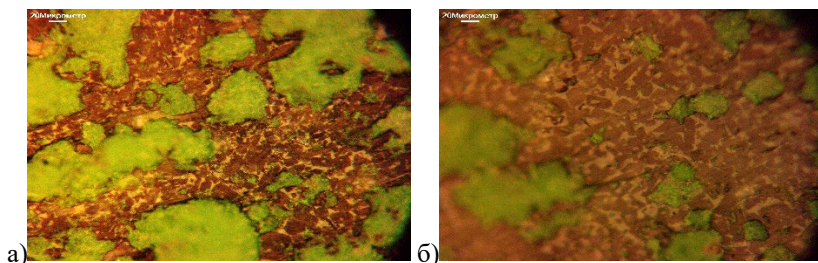


Рис. 4 Микроструктура клинкера состава 4: а) остаток на сите 008 0%;
б) остаток на сите 008 30%

На рисунке 4 представлены образцы клинкера, в котором в качестве карбонатного компонента использовался реактив карбоната кальция. Клинкеры, синтезированные с реактивом карбоната кальция с остатком и без обладают схожей монадобластической микроструктурой. Средний размер кристаллов алита составляет 10...20 мкм, форма зерен представлена неправильными многоугольниками. Присутствует большое количество сросшихся кристаллов алита. Белит представлен округлыми кристаллами распределенными равномерно. Встречается алит с включениями белита.

Выводы:

1. Разный по структуре карбонатный компонент клинкерной сырьевой смеси может обладать различной реакционной способностью.
2. При загрузлении помола известняка до 30% остатка на сите 008 наблюдается повышение содержания свободного оксида кальция в клинкере в 2 раза с 0,3 до 0,6%.
3. Загрубление помола реактива карбоната кальция до 30% остатка на сите 008 не оказывает влияния на содержание свободного оксида кальция, количество которого составляет 0%.
4. Изменение остатка на сите 008 для карбонатного компонента клинкерной сырьевой смеси не оказывает существенного влияния на микроструктуру клинкера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Судакас, Л. Г. К вопросу о крупно- и мелкозернистых микроструктурах клинкера / Л. Г. Судакас, А. Ф. Крапля // Труды НИИЦемент. – 1977. – Вып. 42. – С. 47-50.

2. Классен В. К. Обжиг портландцементного клинкера : монография. – Красноярск : Стройиздат, 1994. – 324 с.

3. Борисов И. Н. Особенности процессов минералообразования при обжиге цементного клинкера с использованием медеплавильного шлака // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С.11-13.

4. Мишин Д. А., Морозова И. А. Получение цемента с высокой активностью при пониженном коэффициенте насыщения клинкера // Материалы международной научно-практической конференции "Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения)" / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2010. – Т. 3. – С. 135–139.

УДК 666.94.015.427

Белоусова Д.А., Таралло З.В.

Научный руководитель: Головизнина Т.Е. канд. техн. наук, доц.

***Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г.Белгород, Россия***

СИНТЕЗ АЛЮМИНАТНОГО И СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО ВЯЖУЩЕГО ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Алюминатные и сульфоалюминатные вяжущие обладают уникальными свойствами, такими как высокая прочность, быстрое твердение и устойчивость к агрессивным химическим воздействиям. Их синтез из отходов позволит не только снизить экологическую нагрузку, но и оптимизировать производственные процессы, а также уменьшить затраты на сырьевые ресурсы.

Исследована возможность синтеза алюминатного и сульфоалюминатного вяжущего из техногенных отходов и известняка. Химический состав использованных материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав техногенных отходов и известняка

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Пр.	ППП
Известняк	0,59	0,00	0,17	55,40	0,50	0,00	0,00	43,34
Шлак ВТ	0,84	68,89	0,69	17,18	8,31	0,00	0,68	3,41
Золошлак	45,99	18,66	15,77	4,93	0,00	0,00	0,00	42,66
Фосфогипс	0,45	0,02	0,03	29,84	0,43	17,79	17,79	9,01

Рассчитаны сырьевые смеси для синтеза алюминатного цемента из шлака Ванадий-Тула и известняка и сульфоалюминатного цемента из золошлака, известняка и фосфогипса. В качестве заданных характеристик для расчёта сырьевых смесей использованы:

- для алюминатного цемента – преимущественное содержание однокальцевого алюмината в составе вяжущего;
- для сульфоалюминатного цемента – коэффициент насыщения и степень насыщения.

Состав и характеристики сырьевых смесей представлены в таблицах 2,3.

Таблица 2 - Расчет сырьевой смеси алюминатного цемента

РАСЧЁТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ										
Материал	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	R2O	SO3	Прочие	ППП	Σ
Шлак ВТ	0,87	70,74	0,71	17,64	8,53	0,00	0,00	0,70	3,50	102,69
	0,84	68,89	0,69	17,18	8,31	0,00	0,00	0,68	3,41	100,00
Известняк	0,58	0,00	0,17	54,53	0,49	0,00	0,00	0,00	42,66	98,43
Щурово	0,59	0,00	0,17	55,40	0,50	0,00	0,00	0,00	43,34	100,00
Соотношение компонентов		Доли	%	Модуль основности			0,55			
	Шлак ВТ	43,89	72,79						CxA-F≈	1,95
	Известняк	16,41	27,21			C2AS ≈		4,07		
	Σ	60,30	100,00			CАmax≈		93,98		
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Mg2O	R2O	SO3	Прочие	ППП	Σ
Сырьевая смесь	0,77	50,14	0,55	27,58	6,18	0,00	0,00	0,50	14,27	100,00
Клинкер	0,90	58,49	0,64	32,17	7,21	0,00	0,00	0,58	0,00	100,00

Таблица 3 - Расчет сырьевой смеси сульфоалюминатного цемента

РАСЧЁТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ										
Материал	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	R2O	SO3	Прочие	ППП	Σ
Золошлак	45,70	18,54	15,67	4,90	0,00	0,00	0,00	0,00	14,57	99,38
	45,99	18,66	15,77	4,93	0,00	0,00	0,00	0,00	14,66	100,00
Известняк Щурово	0,58	0,00	0,17	54,53	0,49	0,00	0,00	0,00	42,66	98,43
	0,59	0,00	0,17	55,40	0,50	0,00	0,00	0,00	43,34	100,00
Фосфогипс	0,49	0,02	0,03	32,75	0,47	0,00	46,58	19,52	9,89	109,75
	0,45	0,02	0,03	29,84	0,43	0,00	42,44	17,79	9,01	100,00
Соотношение компонентов	Доли		%	Степень насыщения			1,15			
	Золошлак		25,06							
	Известняк		49,42	Коэффициент насыщения			0,98			
	Фосфогипс		25,52							
	Σ		100,00							
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Mg2O	R2O	SO3	Прочие	ППП	Σ
Сырьевая смесь	11,93	4,68	4,04	36,23	0,36	0,00	10,83	4,54	27,39	100,00
Клинкер	16,43	6,44	5,57	49,90	0,49	0,00	14,92	6,25	0,00	100,00

С помощью дифференциального термического анализа и экспериментального обжига установлены температура плавления сырьевых смесей и подобрана температура синтеза вяжущих материалов спеканием. Особенностью температуры синтеза спеканием является необходимость избежать плавления материала при достаточно

близких значениях температуры спекания и температуры плавления. Синтез вяжущих проведен при температуре 1280°C.

Завершение синтеза контролировали по содержанию неусвоенного оксида кальция в клинкерах и методом рентгенофазового анализа. Этилово-глицератным методом анализа установлено, что содержание свободного оксида кальция в обоих образцах составило менее 1%; синтез можно считать законченным. Результаты рентгенофазового анализа представлены на рисунках 1 и 2.

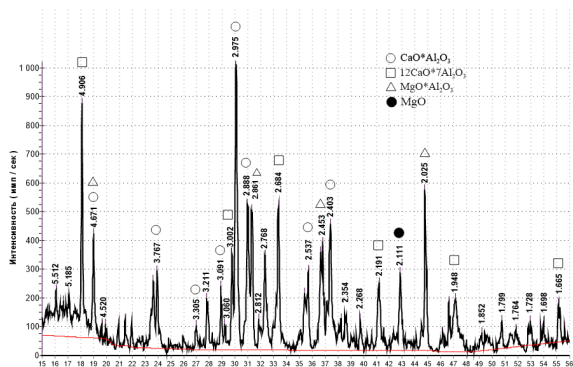


Рис. 1 Фрагмент рентгенограммы алюминатного клинкера.

Исследованием фазового состава алюминатного клинкера обнаружено, что он состоит преимущественно из моноалюмината кальция CA $d = 4,671; 3,767; 3,305; 3,091; 2,975; 2,888; 2,537; 2,403 \text{ \AA}$; майенита $C_{12}A_7$ $d = 4,906; 3,002; 2,684; 2,191; 1,948; 1,665 \text{ \AA}$; оксида магния MgO $d = 2,111 \text{ \AA}$; шпинели $MgAl_2O_4$ $d = 4,671; 2,861; 2,453; 2,025 \text{ \AA}$ (Рис. 1).

Таким образом, удалось синтезировать материал, содержащий основной минерал алюминатного цемента - моноалюминат кальция.

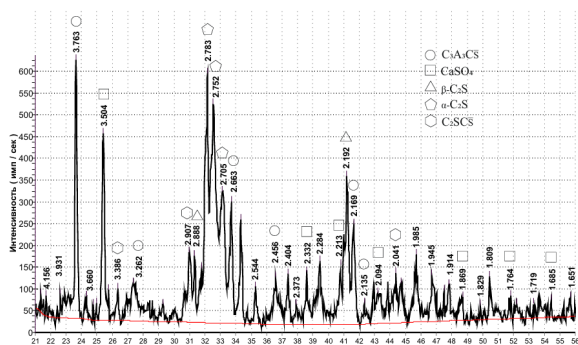


Рис. 2 Фрагмент рентгенограммы сульфоалюминатного клинкера.

Исследованием фазового состава сульфоалюминатного клинкера обнаружено, что он состоит преимущественно из сульфоалюмината кальция $C_3A_3C_5$ $d = 3,763; 3,262; 2,663; 2,456; 2,169; 2,135\text{\AA}$; сульфата кальция $CaSO_4$ $d = 3,504; 2,332; 2,213; 2,094; 1,869; 1,764; 1,665\text{\AA}$; белита $\beta-C_2S$ $d = 2,888; 2,192\text{\AA}$), $\alpha-C_2S$ ($d = 2,783; 2,752; 2,705\text{\AA}$ и сульфатированного белита C_2SC_5 $d = 3,386; 2,907; 2,041\text{\AA}$ (Рис. 2).

Таким образом, удалось синтезировать клинкер, состоящий из сульфатированных алюминатов и силикатов кальция.

В соответствии данным рентгенофазового анализа, в работе установлена возможность синтеза алюминитного и сульфоалюминатного клинкеров из техногенных отходов.

Определена необходимая для завершения реакций минералообразования температура синтеза алюминатного и сульфоалюминатного клинкеров, равная 1280°C . Данная температура значительно ниже температуры синтеза портландцементного клинкера - 1450°C , следовательно, обжиг алюминатного и сульфоалюминатного клинкеров требует меньшего расхода топлива, а значит, является экономически выгодным.

Следует отметить тот факт, что использование техногенных отходов в производстве алюминатного и сульфоалюминатного клинкеров позволит уменьшить затраты на сырьевые материалы и снизить экологическую нагрузку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов И.Н. Расширяющаяся добавка на основе сульфатированного и ферритного отходов для получения специальных

цементов/ И.Н. Борисов, О.С. Мандикова, А.Н. Семин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. - №1. - С 125-128.

2. Goloviznina T.Y., Kononov V.M., Morozova I.A. Sulfoaluminate Cement and Low-Temperature Roasting Additive from Low Aluminate Raw Materials with a High Content of Silicon Oxide// Lecture Notes in Civil Engineering, 2021. Т. 147. - С 125-130.

3. Классен, В.К. Техногенные материалы в производстве цемента: монография В. К. Классен., И.Н Борисов., В. Е. Мануйлов; под общ ред. В. К Классена. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 126 с.

4. Ивашина М.А. Использование техногенных материалов в производстве сульфоалюминатного клинкера // Химия и химическая технология неорганических веществ и материалов. - 2017. - № 1. - 73-74 с.

5. Мин Хеин Хтет. Кинетика минералообразования при синтезе сульфоалюминатного клинкера на основе промышленных отходов/ Мин Хеин Хтет, Е.Н. Потапова, В.В. Рудомазин // Техника и технология силикатов. – 2024. - №3. – 274-283 с.

УДК 62-112.9

Богданов С.В., Зазыкин Д.А.

Научный руководитель: Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ

Современное машиностроение ежедневно сталкивается с задачами увеличения долговечности оборудования, оптимизации использования энергоресурсов и уменьшения ресурсозатрат как на производство и ремонт машин, так и на производство различных материалов, для которого эти машины используются. Существует множество различных технических предложений, направленных на решение этих вопросов, каждое подобное предложение позволяет в той или иной степени улучшить конструкцию машины или механизма.

В пример рассмотрим модернизации футеровки шаровой мельницы для производства цемента. В изобретении [2] предлагается использование измененной футеровки, состоящей из подложки с монтажной поверхностью и рабочей поверхностью, при этом рабочая поверхность подложки является волнистой или вогнуто-выпуклой. Рабочая поверхность покрыта износостойким покрытием на основе

карбида вольфрама, нанесенным методом сверхзвукового плазменного напыления. Износостойкое покрытие на основе карбида вольфрама дополнительно содержит порошок карбида цезия, порошок карбида титана или их комбинацию, они составляют 3-5% от общей массы износостойкого покрытия. Использование данного износостойкого покрытия позволяет увеличить устойчивость к коррозии, ударопрочность, износостойкость и чистоту конечного продукта измельчения.

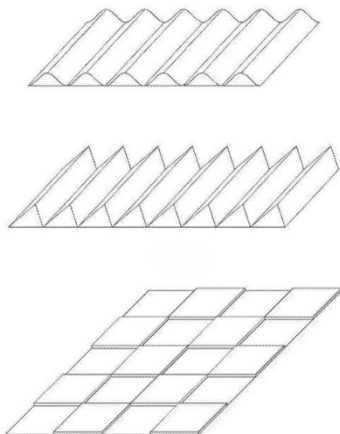


Рис. 1 Футеровка для цементной шаровой мельницы

При использовании шаровой мельницы выступы, скорее всего, будут изнашиваться, а футеровка не будет изнашиваться, эффект от шаров будет неидеальным и т. д. Проблема в том, что эффективность работы низкая, производительность не растёт, а затраты незаметно увеличиваются.

Техническая задача, решаемая настоящим изобретением [3], заключается в следующем: на основе вышеуказанных проблем настоящее изобретение предлагает составную прокладку. Одним из технических решений, принятых в настоящем изобретении для решения технической задачи, является следующее: составная облицовочная пластина, состоящая из корпуса пластины с монтажной поверхностью и рабочей поверхностью, рабочая поверхность выполнена гофрированной, в себя множество канавок в средней части и расположена в вогнутой форме. Полуканавка расположена с обеих сторон корпуса пластины, и две противоположные полуканавки на соседних двух пластинах образуют одну канавку. Изобретение обладает

следующими преимуществами: выступ на рабочей поверхности не изнашивается, а обшивочная доска имеет длительный срок службы.

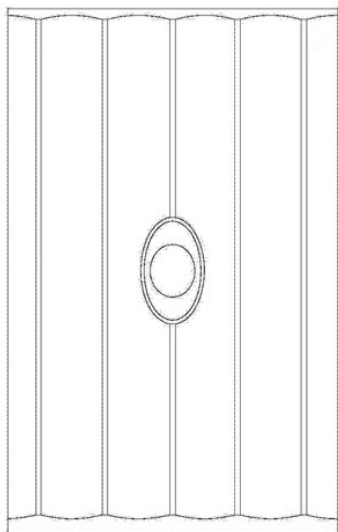


Рис. 2 Вкладыш футеровки

Футеровка является расходным материалом и требует замены после длительного использования. Как правило, футеровка крепится к внутренней стенке ролика с помощью болтов. Обычно футеровку соединяют с роликом следующим образом: в футеровке делают сквозное отверстие, затем пропускают болт через футеровку и ролик изнутри наружу, а затем устанавливают гайку на внешнем конце болта. Недостатком такого способа крепления является то, что внутренний конец болта остается открытым в ролике, и при длительном использовании происходит износ. Поэтому невозможно разобрать болт изнутри барабана. Таким образом, в предшествующем уровне техники сначала снимают гайку с внешнего конца болта, а затем вручную вдавливают болт внутрь, чтобы он провалился внутрь. Однако после длительного использования шаровой мельницы из-за таких проблем, как уплотнение материала и коррозия болтов, болты сильно привариваются к барабану, что приводит к огромным трудозатратам оператора и крайне низкой эффективности замены футеровки. Кроме того, некоторые футеровки изготавливаются из цельного металлического материала и имеют большой вес. После установки футеровки зазоры между футеровками небольшие, а внутренние

поверхности футеровок, как правило, представляют собой гладкие структуры, не имеющие эффективных точек опоры, что затрудняет отделение футеровки от внутренней стенки барабана.

Технический эффект настоящего изобретения [4] заключается в том, что болты в настоящем изобретении установлены снаружи внутрь, а головки болтов расположены снаружи барабана. При снятии футеровки весь болт можно вращать за головки болтов, тем самым ослабляя болты и облегчая последующее снятие. Корпус футеровки взаимодействует с болтами через глухие отверстия с резьбой, что позволяет предотвратить попадание болтов в барабан и тем самым избежать износа болтов. Кроме того, в настоящем изобретении используется основание вкладыша для ограничения хода болтов, и за счёт вращения болтов корпус вкладыша можно приближать или удалять от внутренней стенки барабана, что ещё больше облегчает снятие корпуса вкладыша.

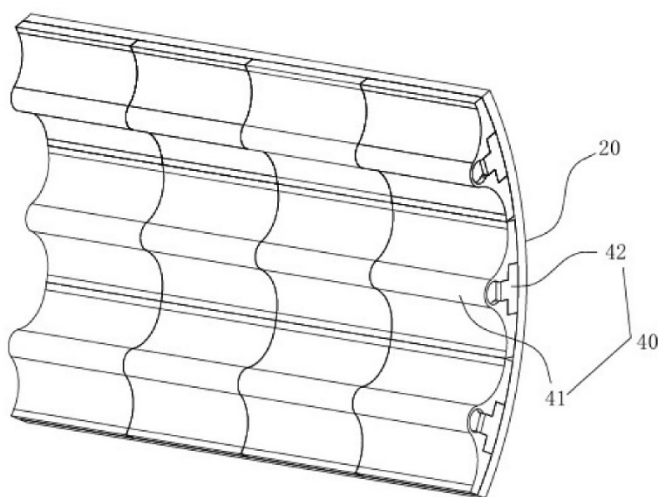


Рис. 3 Способ крепления футеровки: 20 – барабан, 40 – узел вкладыша, 41 – корпус вкладыша, 42 – основание вкладыша

Данные модернизации направлены на увеличение срока службы отдельных элементов шаровой мельницы и ремонтпригодности всей машины в целом. Это позволяет снизить затраты материалов на ремонт и простой оборудования на время ремонта.

Однако эти технические решения направлены на конкретные узлы оборудования и не могут решить глобальную проблему улучшения

конструкции. Каждая модернизация открывает новые горизонты для переосмысления тех или иных решений по способу крепления, форме футеровочных пластин, их материалу изготовления и т.д.

Исходя из этого можно прийти к выводу, что проблема совершенствования конструкции шаровых мельниц не может быть решена, поскольку с каждым новым совершенствованием появляются новые идеи по улучшению уже имеющихся решений. Однако это не означает, что нужно прекратить стремиться к совершенству, поскольку со временем производство становится все эффективнее, а значит, что все существующие исследования и модернизации не напрасны и дают свои плоды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Фадин Ю.М. Теоретические основы расчета усовершенствованных конструкций шаровых барабанных мельниц: монография / Старый Оскол: ТНТ, 2023 – 356 с.

2. Пат. CN105750032A кл В02С17/22. Противоабразивная футеровка для цементной шаровой мельницы и способ изготовления противоабразивной футеровки. Чжоу Цзюньхуа; заявл. 2016.07.13; опубл. 2018.06.15 – 2с.

3. Пат. CN104646118А кл В02С17/22. Композитная опорная плита. Хуан Гуйчжун; заявл. 2015.05.27; опубл. 2017.07.07 – 2с.

4. Пат. CN118719256А кл В02С17/22. Измельчительное устройство и технология для обработки цемента. Ван Цюйшо; заявл. 2024.10.01; опубл. 2025.01.17 – 2с.

УДК 621.3.049

Ваганов М.С.

Научный руководитель: Мухаметшина Е.С., канд. техн. наук, доц.

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Современное развитие электротехнической и кабельной промышленности предъявляет всё более жёсткие требования к материалам, используемым в качестве диэлектриков и изоляционных

покрытий. Поливинилхлорид (ПВХ) остаётся одним из наиболее востребованных полимеров благодаря своей технологичности, хорошим механическим и диэлектрическим характеристикам, а также низкой стоимости. Однако, в целях улучшения эксплуатационных свойств ПВХ-композиций всё чаще применяется модификация структуры материала путём введения различных функциональных добавок и наполнителей.

Особый интерес в последние годы вызывает использование техногенных отходов — как органического, так и минерального происхождения — в качестве наполнителей. Это не только снижает себестоимость материалов и позволяет утилизировать промышленные отходы, но и в ряде случаев приводит к улучшению или селективному изменению диэлектрических характеристик. Такие подходы соответствуют современным тенденциям устойчивого развития и замыкания технологических циклов.

Научная значимость настоящего исследования заключается в экспериментальной оценке влияния органических и минеральных наполнителей на комплекс диэлектрических свойств ПВХ-композиций, как жестких, так и пластифицированных. Полученные результаты позволяют глубже понять механизмы межфазного взаимодействия в полимерных системах, а также определить оптимальные концентрации наполнителей для создания материалов с заданными электрофизическими характеристиками. Это открывает перспективы для разработки новых композиционных материалов, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации в электротехнике и смежных отраслях.

В исследовании рассматриваются композиции на основе поливинилхлорида, для которых оценивали, как включение различных наполнителей отражается на -диэлектрическом поведении материала. Изучались три ключевые величины: относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс угла потерь $\tan \delta$ и удельное объемное сопротивление ρ_v .

Матрицей служил ПВХ марки С-7059–7058М, стабилизированный смесью стеарата кальция и силиката свинца (по 3 части на 100 частей полимера). Для придания пластичности добавляли диоктилфталат (10–50 мас. ч. на 100 мас. ч. ПВХ).

В роли дисперсных присадок использовали:

- органические – гидролизный лигнин (побочный продукт гидролизного производства);
- минеральные – отходы литейного цеха, образующиеся при литье по выплавляемым моделям.

Измерения проводились на диэлектрическом спектрометре «NOVOCONTROL CONCEPT». Сводные результаты для жёстких и пластифицированных образцов, демонстрирующие изменение электрических характеристик при введении органических и минеральных наполнителей, приведены в таблицах 1–3 [1–3].

Таблица 1. Диэлектрические свойства жестких композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ	1,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+1 ОЛП	1,82	$7,90 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ОЛП	1,80	$7,46 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
ПВХ+5 ОЛП	1,80	$7,45 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{11}$
ПВХ+10 ОЛП	1,78	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{11}$
ПВХ+20 ОЛП	1,88	$7,52 \cdot 10^{-3}$	$9,98 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ОЛП	2,12	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$9,91 \cdot 10^{10}$

Таблица 2. Диэлектрические свойства жестких композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ	1,82	$7,91 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{11}$
ПВХ+1 ГЛ	1,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ГЛ	2,20	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{11}$
ПВХ+5 ГЛ	2,80	$8,86 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{11}$
ПВХ+10 ГЛ	3,14	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$9,83 \cdot 10^{10}$
ПВХ+20 ГЛ	3,28	$9,79 \cdot 10^{-2}$	$9,51 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ГЛ	3,68	$9,96 \cdot 10^{-2}$	$9,19 \cdot 10^{10}$

Таблица 3. Диэлектрические свойства пластифицированных композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ+3 ГЛ+10 ДОФ	2,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ГЛ+30 ДОФ	2,80	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{10}$
ПВХ+3 ГЛ+50 ДОФ	3,86	$7,81 \cdot 10^{-2}$	$5,15 \cdot 10^9$

ПВХ+10 ГЛ+10 ДОФ	2,14	$8,59 \cdot 10^{-3}$	$8,43 \cdot 10^{10}$
ПВХ+10 ГЛ+30 ДОФ	2,80	$6,14 \cdot 10^{-2}$	$9,03 \cdot 10^9$
ПВХ+10 ГЛ+50 ДОФ	3,68	$7,52 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^9$
ПВХ+30 ГЛ+10 ДОФ	2,24	$8,62 \cdot 10^{-3}$	$8,06 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ГЛ+30 ДОФ	3,30	$6,14 \cdot 10^{-2}$	$7,67 \cdot 10^9$
ПВХ+30 ГЛ+50 ДОФ	3,09	$6,45 \cdot 10^{-2}$	$7,79 \cdot 10^9$

Исследование, проведённое в 2023 году, показало, что добавление лигноцеллюлозных наполнителей, таких как отруби и гранулы из кукурузных початков, в изотактический полипропилен приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Это объясняется наличием полярных групп в структуре лигноцеллюлозы, способствующих ориентационной поляризации и межфазной поляризации из-за различий в проводимости между матрицей и наполнителем [4].

Добавление бария титаната (BaTiO_3) в ПВХ-композиции приводит к значительному увеличению диэлектрической проницаемости. При содержании 30% BaTiO_3 диэлектрическая проницаемость увеличивается с 7.6 до 16.1. Это связано с высокой диэлектрической проницаемостью самого BaTiO_3 и его взаимодействием с ПВХ-матрицей [5].

В другом исследовании использование в качестве наполнителя вольфрамит (CaSiO_3) показало улучшение диэлектрических свойств ПВХ-композиций, что делает их перспективными для применения в высоковольтных изоляционных материалах [6].

Комбинирование глинистых минералов, таких как галлуазит, с лигнином приводит к улучшению механических и диэлектрических свойств ПВХ-композиций. Такие гибридные наполнители обеспечивают лучшее распределение в матрице и способствуют увеличению модуля упругости, что может быть полезно для создания материалов с заданными свойствами [7].

Анализ полученных данных показал, что для жестких композиций на основе ПВХ При введении инертного литейного порошка (ОЛП) электрические свойства изменялись неравномерно: зависимости имели выраженный экстремум. Максимальный разрыв с эталонными значениями обнаружен при дозировке порядка 10 частей на 100 частей

полимера, что указывает на существование наилучшей, «рабочей» концентрации наполнителя.

Использование гидролизного лигнина приводило лишь к незначительному ухудшению диэлектрических показателей относительно чистого ПВХ. Причину видят в специфической химической архитектуре лигнина — природного полимера, насыщенного функциональными группами, способными вступать во взаимодействие с матрицей и тем самым влиять на её электрическое поведение.

Для образцов, содержащих диоктилфталат, прослеживается чёткая тенденция: чем выше суммарное количество и пластификатора, и наполнителя, тем крупнее относительная проницаемость ϵ и тангенс угла потерь $\tan \delta$, тогда как объёмное сопротивление ρ_v уменьшается.

Таким образом, современные исследования подтверждают значительное влияние как органических, так и минеральных наполнителей на диэлектрические свойства ПВХ-композиций. Использование гибридных наполнителей и функционализация их поверхности открывают новые возможности для создания материалов с улучшенными характеристиками. Дальнейшие исследования в этом направлении помогут разработать ПВХ-композиты с заданными свойствами для различных технических применений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мухин А.М., Галимов Э.Р., Шибиков В.Г. Технологические и эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе поливинилхлорида // Вестник Казанского технического университета им. А.Н. Туполева, №4, вып.2, 2012. - С. 47-51.

2. Мухин А.М., Галимов Э.Р., Макарова Н.А. Влияние дисперсных наполнителей на диэлектрические свойства ПВХ композиций // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», - Казань: КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2013. - С. 25-27.

3. Галимов Э.Р. Процессы структурообразования и формирования свойств при модификации поливинилхлорида. – Казань, Отечество, 2014. – 161 с.

4. Cerovic, D.D.; Petronijevic, I.M.; Marinkovic, F.S.; Maletic, S.B.; Popovic, D.M. Dielectric Properties of Isotactic Polypropylene with Lignocellulose-Based Biomass Filler. Materials 2025, 18, 1657. <https://doi.org> (Дата обращения 5.5.25)

5. Uddin, S.; Akhtar, N.; Bibi, S.; Zaman, A.; Ali, A.; Althubeiti, K.; Alrobei, H.; Mushtaq, M. Effect of BaTiO₃ on the Properties of PVC-Based Composite Thick Films. *Materials* 2021, 14, 5430. <https://doi.org> (Дата обращения 5.5.25)

6. Yaacob, M.M., Kamaruddin, N., Mazlan, N.A. et al. Dielectric Properties of Polyvinyl Chloride with Wollastonite Filler for the Application of High-Voltage Outdoor Insulation Material. *Arab J Sci Eng* 39, 3999–4012, 2014. <https://doi.org> (Дата обращения 5.5.25)

7. Tomaszewska, J.; Wieczorek, M.; Skórczewska, K.; Klapiszewska, I.; Lewandowski, K.; Klapiszewski, Ł. Preparation, Characterization and Tailoring Properties of Poly(Vinyl Chloride) Composites with the Addition of Functional Halloysite–Lignin Hybrid Materials. *Materials* 2022, 15, 8102. <https://doi.org/10.3390/ma15228102>

УДК 666.942.2

Вакуленко Д.А., Лопарев А.С.

Научный руководитель: Головизнина Т.Е. канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННОГО МАСЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА

Производство вяжущих материалов является уникальным утилизатором промышленных отходов. В работе рассмотрена возможность использования отработанного машинного масла в качестве альтернативного топлива.

Отработанное машинное масло в основном состоит из: нефтепродуктов (от 57 до 94%), воды (до 3%) и железосодержащих примесей (от 3 до 40%). Данный отход можно использовать в качестве альтернативного топлива, так как он содержит до 94% нефтепродуктов, обладающих высокой теплотворной способностью – до 39 МДж/кг.

Отработанное моторное масло и смазочные материалы могут применяться как выгорающие добавки к сырьевому шламу при производстве цемента по мокрому методу, а также служить альтернативным источником топлива [1].

В производстве цемента мокрым способом замещение традиционного топлива альтернативными источниками может быть полным или частичным. Полное топливозамещение предполагает замену всего объема используемого топлива альтернативными видами,

тогда как частичное — замену лишь определенной его доли [2].
Преимущества частичного топливозамещения:

- снижение затрат на топливо: использование альтернативных источников, таких как отработанные масла, позволяет уменьшить расходы на приобретение традиционного топлива.

- повышение эффективности теплообмена: дополнительная подача отработанного моторного масла способствует снижению расхода топлива и повышению производительности печи.

- экологические преимущества: замещение части традиционного топлива отходами производства способствует снижению выбросов парниковых газов и уменьшению объема промышленных отходов.

- использование отработанного моторного масла, в качестве выгорающей добавки, не оказывает отрицательного влияния на гидравлическую активность и качество получаемого клинкера.

При частичном топливозамещении выгорающая добавка вводится непосредственно в сырьевую мельницу. Этот метод считается наиболее эффективным, так как именно в таких условиях обеспечивается необходимый и стабильный химический состав шлама [3].

Ввод добавки в состав цементного сырьевого шлама не должен ухудшать технологичность суспензии. К основным технологическим показателям шлама относится текучесть. Показатель текучести определяется эмпирическим путём на текучестемере МХТИ ТН-2 по диаметру расплыва. Оптимальным показателем текучести является значение расплыва в пределах 54 ± 2 мм. Такая текучесть обеспечивает работу шламовых насосов с минимальными затратами электроэнергии. Текучести добиваются путём подбора количества воды, индивидуального для каждой цементной сырьевой смеси. Количество воды, добавленное для получения суспензии-шлама, в значительной мере определяет расход топлива на обжиг клинкера, производимого мокрым способом. Увеличение влажности шлама на 1% пропорционально увеличивает расход топлива и на 1,5% снижает производительность вращающейся печи. Таким образом, добавка, вводимая в шлам, как минимум не должна увеличивать влажность шлама при необходимой текучести.

Влияние ввода отработанного масла на реологические свойства шлама определяли по показателям растекаемости шлама без добавки и с вводом 1,05% отработанного масла от массы шлама. Согласно проведённым расчетам, при частичном топливозамещении 5% технологического топлива, количество отхода составляет 1,05% от массы шлама. Для первичного определения приняли влажность шлама 35% [4].

Текучесть шлама оценивается по диаметру расплыва, образующегося на стеклянной поверхности, с точностью до 1 мм в четырёх взаимно перпендикулярных направлениях. Среднее значение этих четырёх замеров используется как показатель текучести. Зафиксированы следующие показатели: текучесть шлама без добавки составила 56 мм; шлама с добавкой отработанного масла – 59 мм.

По полученным данным установлено, что добавка отработанного масла обладает разжижающим воздействием и увеличивает растекаемость шлама. Полученные значения растекаемости превышают необходимый показатель, равный 54 ± 2 мм. Следовательно, для выбранной в качестве модели сырьевой смеси, принятая влажность 35% является повышенной. Следующим направлением работы было установить, при какой влажности растекаемость шлама достигнет величины – 54 ± 2 мм. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние добавки отработанного масла на водопотребность шлама, необходимую для оптимальной растекаемости.

Влажность шлама, %	Растекаемость шлама, мм	
	без добавки	с добавкой 1,05% отработанного масла
35	56	59
33	55	57
31	53	56
29	50	54
27	47	51

По данным эксперимента, для шлама без добавок необходимая для приемлемой растекаемости влажность составила 31 %, при вводе в состав шлама 1,05% отработанного масла достаточной является влажность 29%.

Таким образом, использование отработанного масла для приготовления сырьевого шлама увеличивает его подвижность. В соответствии с литературными данными [5] снижение влажности сырьевой смеси позволит дополнительно сэкономить технологическое топливо на обжиг клинкера, ориентировочно до 2%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента (учебное пособие). – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. – 308 с.
2. Борисов И. Н. Особенности процессов минералообразования при обжиге цементного клинкера с использованием медеплавильного шлака // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С.11-13.
3. Вакуленко Д. А., Исаева А.С. Использование отработанного масла в производстве цемента // Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. Ч.11. С. 7-9.
4. Исаева А.С., Вакуленко Д.А. Влияние на технологичность и качество клинкера использования пластикового отхода для частичного топливозамещения подачей в зону декарбонизции // Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. Ч.11. С. 49-52.
5. Классен, В.К. Техногенные материалы в производстве цемента: монография В.Классен., И.Н Борисов., В.Е.Мануйлов; под общ ред. В.К Классена. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 126 с.

УДК 691.31

Василенко М.Э., Сильченко Н.А.

***Научный руководитель: Володченко А.А., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия***

СИЛИКАТНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА, СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ

Силикатные строительные материалы, такие как силикатный кирпич, газосиликатные блоки и другие изделия на основе извести и песка, занимают важное место в современном строительстве. Их популярность обусловлена высокой прочностью, экологичностью и относительно низкой стоимостью по сравнению с другими стеновыми материалами. Производство силикатных материалов основано на автоклавной обработке, при которой сырьевая смесь (песок, известь, вода, а в случае газосиликата – еще и алюминиевая пудра) подвергается воздействию высокого давления и температуры, что обеспечивает отличные эксплуатационные характеристики готовой продукции.

Силикатный кирпич традиционно используется в жилищном и промышленном строительстве, а газосиликатные блоки, благодаря легкости и высоким теплоизоляционным свойствам, широко применяются в возведении энергоэффективных зданий. Однако, несмотря на множество преимуществ, включая долговечность, морозостойкость и хорошую геометрию, эти материалы имеют и недостатки, такие как гигроскопичность и ограниченная устойчивость к высоким температурам.

В данной статье рассматриваются основные технологии производства силикатных материалов, их ключевые свойства, а также анализируются преимущества и недостатки, которые следует учитывать при выборе материалов для строительства [1-3].

Производство силикатных строительных материалов, таких как силикатный кирпич и газосиликатные блоки, основано на автоклавном синтезе, при котором известь и кварцевый песок вступают в химическую реакцию под действием высоких температуры и давления, образуя прочный искусственный камень. Процесс начинается с подготовки сырья: кварцевый песок тщательно очищается от примесей и измельчается до мелкой фракции, что повышает его реакционную способность. Известь (обычно негашеная) также дробится и затем гасится в небольшом количестве воды, чтобы получить пластичную известковую массу.

Далее песок и известь смешиваются в определенных пропорциях (обычно в соотношении 9:1 для силикатного кирпича) с добавлением воды до получения однородной полусухой смеси. В случае производства газосиликата в смесь вводят алюминиевую пудру или пасту (около 0,1% от массы), которая, реагируя с известью, выделяет водород, вызывая вспучивание массы и формирование пористой структуры. Полученную смесь заливают в формы, где она либо прессуется (для кирпича), либо оставляется для вспучивания и предварительного твердения (для газосиликата) [4-5].

После формования заготовки отправляют в автоклав – герметичную камеру, где под давлением 0,8–1,2 МПа и при температуре 170–200°C происходит окончательное твердение в течение 8–12 часов. В этих условиях известь и песок вступают в реакцию с образованием гидросиликатов кальция, которые обеспечивают высокую прочность материала. После автоклавирования изделия проходят контроль качества, включая проверку на прочность, геометрию и морозостойкость, после чего отправляются на склад готовой продукции.

Газосиликатные блоки дополнительно подвергаются резке на специальных станках для придания точных размеров, тогда как силикатный кирпич обычно не требует дополнительной обработки. В

результате получают материалы с высокой несущей способностью, хорошей теплоизоляцией (особенно у газосиликата) и стабильными геометрическими параметрами, что упрощает процесс строительства. Однако ключевым условием качества остается строгое соблюдение технологических параметров на всех этапах производства [5].

Современные исследования и технологические разработки позволяют значительно улучшить свойства силикатных строительных материалов, таких как кирпич и газосиликатные блоки, за счет модификации состава и оптимизации процессов производства. Одним из перспективных направлений является введение различных добавок, которые могут повысить прочность, снизить теплопроводность, улучшить морозостойкость и уменьшить водопоглощение.

Одним из эффективных способов улучшения механических характеристик является добавление тонкомолотых минеральных компонентов, таких как микрокремнезем, метакраин или зола-унос. Эти материалы, обладая высокой пуццолановой активностью, усиливают реакцию между известью и песком, способствуя образованию более плотной и прочной структуры гидросиликатов кальция. Например, введение 5–10% микрокремнезема может увеличить прочность на сжатие на 15–20%, а также снизить усадку при высыхании.

Для снижения теплопроводности и повышения теплоизоляционных свойств газосиликата применяют легкие заполнители, такие как перлит, вермикулит или вспученный стеклянный гранулят. Эти добавки создают дополнительную пористость, не снижая значительно прочность. Также исследуется возможность использования органических порообразователей, которые, в отличие от алюминиевой пудры, не дают побочных газов и позволяют получать более экологичный материал [6–8].

Важным направлением является повышение водостойкости силикатных материалов, поскольку их основной недостаток – высокая гигроскопичность. Для этого в состав вводят гидрофобизирующие добавки, такие как кремнийорганические соединения или полимерные дисперсии, которые уменьшают капиллярное водопоглощение. Кроме того, обработка поверхности готовых изделий специальными пропитками на основе акрилатов или силоксанов позволяет создать защитный барьер от влаги без ухудшения паропроницаемости.

Еще одним перспективным методом является использование укрепляющих волокон (таких как стеклянные, базальтовые или полипропиленовые), которые повышают стойкость материала к появлению трещин. Для газосиликатных блоков конструкций это имеет большое значение, так как с течением времени происходят деформации. Равномерно распределенные волокна в материале предотвращают распространение трещин.

Благодаря использованию отходов промышленности – таких как шлаки или остатки строительных материалов, можно улучшить экологичность производства, а также снизить его стоимость [9-13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Состояние и перспективы использования техногенного сырья // В сборнике: Научные и инженерные проблемы строительного-технологической утилизации техногенных отходов Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 17-21.

2. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Крымова А.И. Синергетические принципы самоорганизации системы в теории твердения многокомпонентных порошковых композиций // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 3 (36). С. 49-55.

3. Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Клименко В.Г. Процессы структурообразования гипсосодержащих композитов с учетом генезиса сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 4 (640). С. 3-11.

4. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Милькина А.С. Особенности структуры бетонов нового поколения с применением техногенных материалов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 4 (62). С. 588-595.

5. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные материалы автоклавного твердения на основе алюмосиликатного сырья как фактор оптимизации системы «человек - материал - среда обитания» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 3. С. 27-33.

6. Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Lashina I.V., Feduk R.S. Theoretical backgrounds of non-tempered materials production based on new raw materials / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2018. №327 042064 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042064.

7. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // Строительные материалы. 2008. № 11. С. 42-44.

8. Володченко А.Н., Жуков Р.В., Лесовик В.С., Дороганов Е.А. Оптимизация свойств силикатных материалов на основе известково-песчано-глинистого вяжущего // Строительные материалы. 2007. № 4. С. 66-69.

9. Шорникова И.С., Бутт Ю.М., Кржеминский С.А. Свойства некоторых индивидуальных гидросиликатов кальция и гидрогранатов // Сб. тр. ВНИИстром. М.: Стройиздат, 1966. № 8(36). С. 3–19.

10. Говоров А.А., Овчаренко Ф.Д., Джус Е.В., Бакушина И.В. Фазо- и структурообразование в известково-каолининовых дисперсиях при гидротермальном нагреве // СССР. 1978. Т. 240. № 2. С. 384–386.
11. Володченко А.А., Лесовик В.С., Чхин Сован. Повышение эксплуатационных характеристик стеновых материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 29–34.
12. Лесовик В.С., Строкова В.В., Володченко А.А. Влияние наноразмерного сырья на процессы структурообразования в силикатных системах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 13–17.
13. Новоточинов А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В. Рациональный состав тугоплавких компонентов наплавочной проволоки обеспечения износостойкости рабочих поверхностей деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 117–129. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-117-129.

УДК 662.772

Гаручава М.Ю.

Научный руководитель: Павленко В.И., д-р техн. наук, проф.
*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНА

В работе исследуется воздействие высокоэнергетического электронного облучения ($E = 10$ МэВ, $D = 10^6$ – 10^7 Гр) на структурное состояние силикатной матрицы, синтезированной на основе полиорганосилоксанов. Обнаружено формирование дефектных областей, локальных уплотнений и признаков фазовой трансформации аморфной составляющей.

Полиорганосилоксаны (ПАОС) находят широкое применение в качестве прекурсоров для получения неорганических сеток кремнезёма с контролируемой морфологией и химическим составом. Термическое и радиационное воздействие на ПАОС инициирует процессы деградации органических радикалов и уплотнения структуры, что приводит к формированию аморфно-кристаллических фаз в системе Si–O–C. Расчёты позволяют выявить закономерности эволюции структуры и фазового состава силикатных матриц в процессе радиационного воздействия [1].

Целью настоящего исследования является выявление

особенностей структурно-фазовых превращений в силикатной матрице, синтезированной на основе полиорганосилоксана, при воздействии высокоэнергетических электронов.

В качестве исходного сырья использовался полидиметилсилоксан с заданной молекулярной массой, обладающий стабильностью при нагреве и способностью к формированию Si–O–Si каркаса с частичным сохранением углеродсодержащих фрагментов в виде аморфной фазы.

Синтез матрицы осуществлялся в лабораторных условиях путём контролируемого термоллиза при ступенчатом повышении температуры в диапазоне от 150 до 800 °С. Процесс проводился в статической атмосфере. Полученные образцы подвергались кондиционированию и предварительной структурной стабилизации перед воздействием облучения [2].

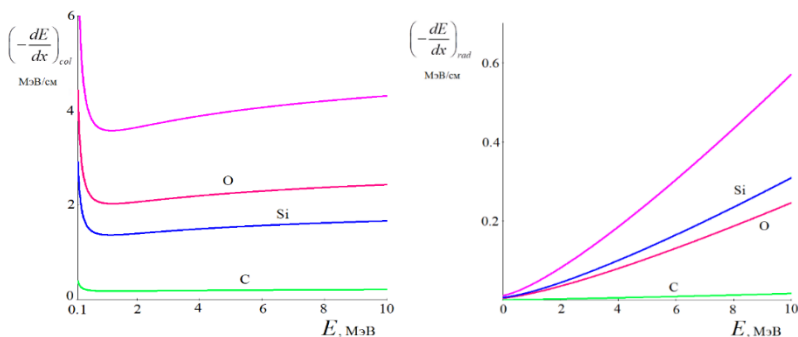


Рис. 1 Зависимость удельных ионизационных (слева) и радиационных потерь (справа) быстрых электронов в СГ-материале от кинетической энергии электрона (верхняя кривая – суммарный вклад элементов)

Воздействие высокоэнергетических электронов реализовывалось на ускорительном комплексе, обеспечивающем генерацию пучков с энергией порядка 1–2 МэВ.

Результаты комплексного анализа свидетельствуют о выраженных структурно-фазовых перестройках, развивающихся в результате радиационного воздействия. Полученные данные рентгенофазового анализа и электронной микроскопии позволяют утверждать о существенных трансформациях внутренней структуры, затрагивающих как межатомные взаимодействия, так и морфологические характеристики системы [3].

На основании анализа энергетических потерь прослеживаются характерные зависимости удельных ионизационных и радиационных потерь от кинетической энергии электронов. Виден отчётливый рост

радиационных потерь при увеличении энергии, указывающий на доминирование процессов тормозного излучения в высокоэнергетическом диапазоне. Это подтверждается характером кривой суммарных потерь, отражающей интегральное взаимодействие пучка с атомной структурой СГ-матрицы.

Параллельно, модельные расчёты, выполненные с применением метода Монте-Карло, демонстрируют нелинейную зависимость среднего пробега электрона от его начальной энергии. Установлено, что для энергии 10 МэВ максимальное проникновение составляет порядка 2 мм, что определяет глубину зоны радиационной модификации.

Траектории движения и характер рассеяния определяют коэффициенты пропускания по числу и энергии, которые демонстрируют снижение энергетической пропускной способности с ростом энергии, подтверждая эффективность поглощения в пределах плотной аморфной структуры [4].

На микрофотографиях до и после облучения прослеживаются отчётливые морфологические изменения. Исходный СГ-материал (рис. справа) характеризуется относительно однородной поверхностной текстурой с признаками полимеризованного геля, типичного для поликонденсированных силикатных образований. Однако уже при дозе облучения 10^6 Гр формируется сетчатая микроструктура с наличием начальных радиационно-индуцированных пустот и микротрещин, свидетельствующих о начальной фазе деградации каркаса.

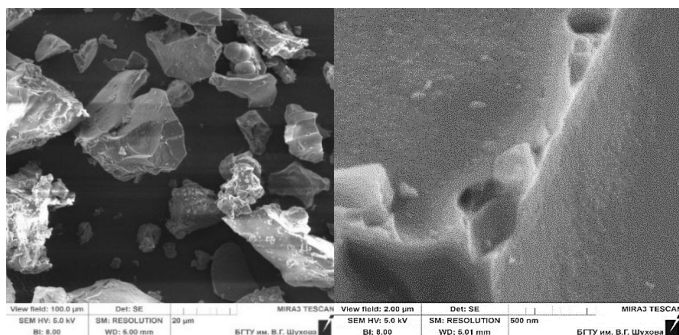


Рис. 2 Микроструктура исходного СГ-материала (до электронной обработки)

При дальнейшем увеличении дозы до 10^7 Гр наблюдается прогрессирующее развитие повреждений — появляются квазисферические поры, области распухания и деструктивной коалесценции фрагментов матрицы, что можно отнести к каскадным процессам выбивания атомов и радиационного распыления. Данные

процессы сопровождаются частичным упорядочением аморфной составляющей с формированием новообразованных кристаллических фаз (возможно, низкотемпературных модификаций кремнезёма), что подтверждается дополнительными рефлексам на рентгенограммах [5].

Таким образом, в результате электронного облучения с энергией 10 МэВ в СГ-структуре инициируются каскадные процессы атомного выбивания и тепловой активации, приводящие к комплексным изменениям как в химической, так и в фазовой структуре. Совокупность экспериментальных и модельных данных позволяет заключить, что возникающие трансформации носят нелинейный, многокаскадный характер, сопряжённый с последовательной перестройкой топологии силикатной сетки.

Выявленные изменения микротопологии, включая образование пор, микротрещин и радиационно-активных центров, сопровождаются частичной перестройкой аморфной структуры с тенденцией к локальной кристаллизации, что свидетельствует о возможных фазовых переходах в условиях энергетического насыщения.

Установлено, что при достижении дозовых порогов порядка 10^7 Гр начинает преобладать деструктивный режим трансформации, тогда как в интервале до 10^6 Гр наблюдаются в основном процессы дефектной модификации и радиационно-стимулированного структурного упорядочивания.

Таким образом, силикатные материалы на основе полиорганосилоксанов проявляют чувствительность к высокоэнергетическому электронному облучению, демонстрируя потенциальную способность к фазовой адаптации под действием внешнего радиационного воздействия. Полученные результаты имеют значительную научную и прикладную ценность, в частности, в контексте разработки радиационно-стойких композитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клочкив Е. П., Павленко В. И., Матюхин П. В., Ястребинская А.В. Модифицирование природных минеральных систем для очистки воды от радионуклидов // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - №6. - С. 13
2. Соколенко И. В., Ястребинский Р.Н., Крайний А.А., Матюхин П. В., Тарасов Д. Г. Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите // Вестник Белгородского государственного

технологического университета им. В. Г. Шухова. - 2013. - №6. - С. 145–148.

3. Yastrebinsky, R.N., Bondarenko, G.G., Karnauhov, A.A. et al. Multigroup Simulation of Protection Against Neutron and Gamma Radiation by Materials Based on Titanium Hydride. Inorg. Mater. Appl. Res. 2022, 13, 1261–1269

4. Матюхин П. В., Бондаренко Ю. М., Павленко В. И. Исследование микроструктуры поверхности композиционного материала на основеалюминиевой матрицы // Перспективные материалы. - 2013. - №6. - С. 22–26

5. Matyukhin P.V. Theoretical preconditions of new kinds of nuclear protective metal composite materials development based on ferric and bismuth oxides capsulated into metallic aluminum matrix // International Journal of Applied and Fundamental Research. - 2011. - №2. - С. 42

УДК 666.32

Дудина Е.И., Смагина А.Р., Колесова А.С.

*Научный руководитель: Сыса О.К., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Керамические материалы представляют собой группу конструкционных материалов, применяемых в стоматологии для создания искусственных зубов, покрытия металлических основ и изготовления полностью керамических зубных протезов. Широкий спектр их использования в стоматологической практике обуславливает различные требования к современным керамическим материалам [1].

В последние годы наблюдается значительное увеличение числа стоматологических клиник на рынке. Тем не менее, ни один из существующих материалов не может быть признан идеальным [2]. Оптимальный материал для восстановительной стоматологии должен соответствовать следующим критериям:

- 1) обладать биосовместимостью;
- 2) противостоять всем типичным воздействиям, характерным для полости рта;
- 3) обеспечивать надежную и устойчивую адгезию к твердым тканям зуба;
- 4) полностью имитировать внешний вид естественных зубов.

5) обладать необходимыми физическими и механическими характеристиками, способствующими заживлению и регенерации восстановленных тканей [2].

Керамические протезы можно изготовить разными способами: от традиционного литья до компьютерного фрезерования керамических блоков. Отдельные методы подходят лишь для создания микропротезов (вкладок, накладок, виниров) и одиночных коронок, тогда как другие технологии позволяют производить протяжённые конструкции, включая мостовидные протезы [2, 3].

Рассмотрим некоторые способы изготовления протезов подробнее.

Изготовление зубных протезов с использованием литьевого метода

Литые зубные протезы обладают значительно большей прочностью по сравнению с классической керамикой, которая применяется для облицовки металлических оснований. Поверхность зуба необходимо тщательно обработать, чтобы она была ровной и не имела зазубрин. Процесс создания протеза включает подготовку зуба, снятие оттиска, подбор цвета и последующее изготовление конструкции [3].

В 1980-х годах была разработана литая декоративная керамика (Dentsply) – поликристаллический стеклокерамический материал, который отливается в огнеупорные формы методом центрифугирования. В сравнении с традиционной обожжённой фарфоровой керамикой этот материал обладает более плотной структурой, лишённой пор, а его гладкая полированная поверхность обеспечивает лучшее прилегание к зубу [3].

Производство коронок по системе Dicos включает следующие этапы:

1. Изготовление гипсовой модели, на основе которой формируется восковая репродукция (минимальная толщина стенок — 1 мм).

2. Фиксация восковой модели на литниковый стержень и заливка формовочной массой с фосфатным связующим.

3. Обжиг в печи при температуре 900 °С с выдержкой в течение 30 минут после достижения заданного нагрева [3, 4].

Изготовление зубных протезов по компьютерной программе

Современный стоматологический рынок предлагает ряд цельнокерамических систем, отвечающих высоким требованиям профессионалов. Данные системы служат базой для применения передовых технологий, включая CAD/CAM (Компьютерное проектирование / Компьютерное производство) [7].

Современные методы изготовления керамических протезов

включают использование специальных матриц, чьи физико-химические характеристики аналогичны фарфору, а также технологии микрофрезерования. Широкое распространение получили техники горячего прессования керамической массы с последующим литьём под давлением [4, 5].

По сравнению с традиционными методами, предполагающими создание металлического каркаса, данные технологии отличаются значительно меньшей трудоёмкостью и более высокой экономической эффективностью.

Однако сфера применения данных технологий имеет четкие клинические ограничения, они подходят исключительно для изготовления:

- 1) вкладок (inlays/onlays);
- 2) цельнокерамических коронок;
- 3) керамических виниров;
- 4) мостовидных протезов малой протяженности (максимум 3 единицы включительно) [4].

Современная стоматология активно внедряет инновационные керамические системы, использующие передовые компьютерные технологии, включая CAD/CAM, Procera, In-Ceram, Vollceram и гальванические методы (Galvano). Значительным прорывом стало создание сканирующих устройств для цифрового моделирования зубных протезов, что позволило существенно сократить производственные затраты [4, 5].

Преимущества современных CAD/CAM технологий:

1. Высокая точность изготовления (погрешность 20-40 мкм).
2. Минимальное время участия зубного техника.
3. Оптимизированный производственный процесс.

Технические характеристики:

- Время автоматизированного производства трехзвенного мостовидного протеза: 65-80 минут
- Допустимая погрешность: в пределах 20-40 микрометров [5].

В последние годы стремительно развиваются технологии компьютерного моделирования и производства керамических зубных протезов. Современные CAD/CAM-системы включают три ключевых компонента:

1. 3D-сканирование – может выполняться с помощью внутриротовой камеры (для клинического применения) или лабораторного сканера для оцифровки гипсовых моделей.
2. Компьютерное проектирование – специализированное ПО позволяет создавать виртуальные модели реставраций, используя базы

данных анатомии зубов и прикуса. С помощью виртуального артикулятора можно точно смоделировать жевательную поверхность с учетом зубов-антагонистов, а также разработать индивидуальные конструкции протезов.

3. Фрезерование – осуществляется на станках различной сложности: от компактных настольных моделей с двумя фрезами (для изготовления вкладок и коронок) до мощных лабораторных систем с более чем 20 фрезами, способных производить мостовидные протезы длиной до 14 единиц [5].

Преимущества цифровых керамических систем (по данным производителей):

- естественная эстетика (цвет, прозрачность, опалесценция и флуоресценция, как у натуральных зубов);
- высокая биосовместимость с тканями полости рта;
- отличная механическая прочность;
- максимальная точность изготовления [6].

Изготовление зубных протезов методом прессования

Современная прессуемая керамика Optimal-ОРС сочетает высокую эстетику традиционной керамики с повышенной прочностью благодаря технологии горячего прессования. Этот метод позволяет создавать конструкции без металлической основы (до 3 единиц), отличающиеся долговечностью, естественной прозрачностью и отличной биосовместимостью [5, 6].

Ключевые системы прессуемой керамики

- IPS Empress 1 и Empress 2 (Ivoclar Vivadent)
- Optimal Pressable Ceramic (ОРС) (Jeneric/Pentron)
- Profi Presskeramik (Klema Dentalprodukte, Австрия) – отличается повышенной прочностью (150 МПа) [6].

Эти системы включают наборы материалов и оборудования для изготовления: вкладок, накладок, виниров; одиночных коронок; мостовидных протезов (3–4 единицы). Прочность прессуемой керамики варьируется в пределах 110–150 МПа (в зависимости от материала: Dicor, Optec HSP, Cera-press, ОРС, IPS Empress). Несмотря на преимущества, прессованная керамика имеет повышенную прозрачность, что может потребовать дополнительной коррекции при восстановлении зубов с низкой светопропускаемостью [6, 7].

Главным достоинством цельнокерамических систем IPS Empress и ОРС является их фтороapatитная основа. Благодаря этому они обладают высокой биосовместимостью с тканями зуба, а также оказывают минимальное абразивное воздействие на естественные зубы-антагонисты по степени износа сопоставимы с натуральной зубной

эмалью [7]. Несмотря на превосходные эстетические качества, данные системы имеют некоторые ограничения:

1. Прочностные характеристики: уступают металлокерамическим аналогам по механической прочности, однако превышают традиционную керамику по краевой точности прилегания

2. Клиническая устойчивость:

- демонстрируют оптимальную устойчивость при использовании: для одиночных коронок и коротких мостовидных протезов (до 3 единиц);

- показали снижение надежности при увеличении протяженности протеза и повышении жевательной нагрузки [8].

Согласно клиническим исследованиям, риск возникновения сколов и переломов возрастает пропорционально длине керамической конструкции [9]. Это ограничивает применение данных систем в области жевательных зубов и при необходимости изготовления протяженных протезов.

Современная стоматология демонстрирует впечатляющий прогресс в создании функционально-керамических покрытий для зубных протезов. Научные достижения последних лет в области материаловедения привели к появлению принципиально новых решений, отвечающих самым строгим клиническим требованиям и ожиданиям пациентов.

Перспективы развития данного направления включают несколько ключевых аспектов:

- Внедрение нанотехнологических разработок для оптимизации физико-химических характеристик покрытий.
- Создание гибридных композитных материалов, объединяющих лучшие свойства различных компонентов.
- Повышение эксплуатационной стабильности и износостойкости при длительном клиническом использовании.

Таким образом, область функционально-керамических покрытий для зубного протезирования достигла значительных высот и продолжает динамично развиваться. Постоянное совершенствование технологий производства и состава материалов создаёт фундамент для принципиально новых решений в стоматологической практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куркина, В. М. значение металлокерамических конструкций в ортопедической стоматологии [Текст] / В. М. Куркина // Научное обозрение. Медицинские науки. - 2017. - № 4. - С. 42-46.

2. the dental solutions company. dentsply sirona. Материаловедческий сборник по облицовочной керамике [Электронный ресурс] – URL: <https://disk.yandex.ru> (дата обращения 19.10.2024).

3. Яковлев Д.Н. Технология изготовления различных керамических систем / Яковлев Д.Н. [Электронный ресурс] // СтомПорт : [сайт]. — URL: <https://stomport.ru> (дата обращения: 19.04.2025).

4. Ноу-хау. Состав для производства керамического адгезива [Электронный ресурс] / Сыса О.К., Бондаренко Н.И., Дороганов В.А., Локтионова Е.В.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» - № 20240021; регистрация: 26.09.2024 – 4 с.

5. Варданын А.Р. Методы бондинга оксидной керамики для стоматологических реставрации / Варданын А.Р. [Электронный ресурс] // Вопросы теоретической и клинической медицины: [сайт]. — URL: <https://www.med-practic.com/rus> (дата обращения: 19.04.2025).

6. Ноу-хау. Способ производства керамического адгезива [Электронный ресурс] / Сыса О.К., Бондаренко Н.И., Дороганов В.А., Локтионова Е.В.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» - № 20240023; регистрация: 26.09.2024 – 5 с.

7. Медицинское оборудование. Глобальный рынок стоматологических коронок. Мировой рынок зубных коронок – тенденции отрасли и прогноз до 2030 года. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.databridgemarketresearch.com> (16.04.2025).

8. Булгакова, А. И., Валеев, И. В., Хисматуллина, Ф. Р., Хазиева, Л. М., Шафеев, И. Р. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СТОМАТОЛОГИИ [Текст] / А. И. Булгакова, И. В. Валеев, Ф. Р. Хисматуллина, Л. М. Хазиева, И. Р. Шафеев. - Уфа: Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2014 - 174 с.

9. Ноу-хау. Шихта для керамического адгезива. [Электронный ресурс] / Сыса О.К., Бондаренко Н.И., Дороганов В.А., Локтионова Е.В., Дудина Е.И., Смагина А.Р., Колесова А.С.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» - № 20250002; регистрация: 04.04.2025 – 4 с.

*Евдокимов А.Ю., Паиков Г.А., Погореленко К.А.
Научный руководитель: Мишин Д.А. канд. техн. наук., доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ СЕКТОРЕ («ЗЕЛЕНОЕ» СТРОИТЕЛЬСТВО)

В современном мире вопросы эффективного использования природных богатств и обеспечения стабильного развития общества становятся всё более актуальными. Рациональное природопользование — одна из приоритетных задач, которую необходимо решить человечеству.

Экологическая сертификация в строительной отрасли открывает новые возможности для создания энергоэффективных зданий. Так называемые «зелёные дома» отличаются существенно сниженным потреблением различных ресурсов: воды, электроэнергии и тепла.

Особого внимания заслуживают инновационные решения в сфере альтернативной энергетики. При благоприятных климатических условиях современные здания способны не только потреблять, но и производить энергию. Это становится возможным благодаря интеграции солнечных панелей в фасадные конструкции.

Такой подход к строительству не только способствует сохранению окружающей среды, но и открывает новые перспективы для развития экологически ответственного градостроительства.

Зеленое строительство выступает эффективным механизмом реализации концепции устойчивого развития как на городском, так и на государственном уровне.

Согласно авторитетному источнику — энциклопедии Green Evolution, зеленое строительство представляет собой специализированную отрасль, которая объединяет процессы возведения и обслуживания зданий при условии минимизации негативного влияния на экологию окружающей среды.

Ключевая цель данного направления заключается в существенном сокращении потребления различных ресурсов — как энергетических, так и материальных. Важно отметить, что этот принцип применяется на всех этапах жизненного цикла объекта:

- Предпроектная подготовка — выбор оптимального участка
- Проектирование — разработка экологических решений
- Строительство — применение современных технологий

- Эксплуатация — рациональное использование ресурсов
- Техническое обслуживание — своевременный ремонт
- Демонтаж — утилизация материалов

Такой комплексный подход позволяет не только сохранить природные ресурсы, но и создать комфортную среду для проживания, что полностью соответствует принципам устойчивого развития современного общества.

Зеленое строительство в России получает все более широкое признание, и различные организации предлагают схожие определения данного направления.

По версии Совета по экологическому строительству в России (RuGBC), зеленое строительство представляет собой комплексный подход к проектированию, строительству и эксплуатации зданий. Этот подход включает в себя:

- Специальные технические решения
- Применение особых материалов
- Использование современного оборудования
- Меры по обеспечению энерго- и ресурсоэффективности

Важно отметить, что все существующие определения зеленого строительства имеют общую концептуальную основу и сфокусированы на:

- Экологичном использовании пространства
- Рациональном потреблении ресурсов
- Минимизации негативного воздействия на окружающую среду

В настоящее время особое внимание уделяется изучению и внедрению мировых стандартов зеленого строительства. Эти стандарты служат основой для развития экологически ответственного подхода к возведению и эксплуатации зданий, что в конечном итоге способствует достижению целей устойчивого развития на различных уровнях — от городского до национального.

Развитие зеленого строительства в России идет в русле глобальных тенденций и направлено на создание комфортной, безопасной и экологичной среды обитания для нынешнего и будущих поколений.

В 1970-х годах в Европе началось активное развитие экологического движения. Важным этапом стало появление в 1990 году первого строительного экологического стандарта BREEAM в Великобритании.

Стандарт разработан компанией BRE Global и представляет собой метод оценки экологической эффективности зданий (Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

Сегодня система действует в 71 стране, выдано более 532 тысяч сертификатов. Наибольшее распространение BREEAM получила в Северной (3 567 проектов) и Западной (739 проектов) Европе.

Система сертификации BREEAM базируется на девяти ключевых разделах:

- Управление
- Здоровье
- Энергия
- Транспорт
- Вода
- Материалы
- Утилизация отходов
- Использование земельного участка
- Загрязнения

Оценка происходит следующим образом:

- По каждому разделу начисляются баллы
- Баллы умножаются на весовой коэффициент (зависит от актуальности применения в конкретных условиях)
- Подводится общий результат

На основе полученных показателей формируется итоговый рейтинг объекта.

В России набирает популярность стандарт BREEAM In-Use. Этот стандарт предназначен для сертификации зданий, которые были построены без учета требований стандарта, но эксплуатируются не менее двух лет на момент начала процедуры сертификации. BREEAM In-Use отличается гибкими требованиями и уже получил признание на международном уровне.

Основной акцент BREEAM In-Use делается на следующих ключевых параметрах:

1. Технические характеристики здания:

- Оценка качества архитектурных решений и инженерных систем
- Анализ потребления основных ресурсов (энергия, вода, материалы, оборудование)
- Измерение уровня образования отходов

2. Эффективность управляющей компании:

- Оценка учета экологических аспектов в политике и процедурах эксплуатации здания
- Анализ внедрения экологических практик в процессе эксплуатации

3. Организационная эффективность:

- Оценка активности пользователей в применении принципов

экологического менеджмента

○ Уровень вовлеченности в процессы энергосбережения и рационального использования ресурсов

DGNB — это система сертификации зданий, разработанная Немецким советом по устойчивому строительству (Deutscher Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, DGNB).

Этот стандарт основан на рейтинговой оценке по шести основным аспектам:

1. Экология — оценка воздействия на окружающую среду.
2. Экономика — экономическая устойчивость и эффективность затрат.
3. Социально-культурные аспекты — влияние на общество и качество жизни.
4. Функциональные аспекты — соответствие назначению и эргономичность.
5. Методы, процессы — используемые технологии и методы строительства.
6. Месторасположение — учёт особенностей участка и регионального контекста.

Изначально стандарт DGNB был разработан для сертификации новых административных и офисных зданий. Со временем область его применения расширилась и теперь охватывает:

- коммерческие здания;
- промышленные объекты;
- институциональные сооружения;
- жилые комплексы.

Это позволяет использовать систему DGNB для оценки устойчивости различных типов зданий и сооружений.

Выводы

В ходе исследования рынка зелёного строительства в мире было установлено следующее:

1. История развития: Направление зелёного строительства активно развивается уже около 30 лет, демонстрируя устойчивый рост и расширение применения.
2. Ведущие страны: Лидирующие позиции в создании и развитии стандартов занимают Великобритания и США. В Великобритании разработан стандарт BREEAM, а в США — LEED.
3. Международное признание: Оба стандарта признаны во многих странах мира и служат фундаментом для национальных систем сертификации. Существуют национальные комитеты, которые адаптируют и внедряют эти стандарты с учётом местных условий и

специфики.

4. Сравнение стандартов BREEAM и LEED:

○ Общие черты: Оба стандарта имеют много общих критериев, таких как оценка экологической эффективности, энергосбережение, управление ресурсами и др.

○ Различия: Несмотря на схожесть, между стандартами существуют некоторые различия в методологии оценки и применяемых критериях.

○ Результат применения: Внедрение любого из этих стандартов способствует рациональному использованию природных ресурсов, снижению негативного воздействия на окружающую среду и повышению устойчивости строительства.

Таким образом, развитие и применение международных стандартов зелёного строительства, таких как BREEAM и LEED, играют ключевую роль в формировании устойчивой архитектуры и градостроительства по всему миру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энциклопедия зелёного строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://greenevolution.ru> (Дата обращения 5.5.25)
2. Сайт совета по экологическому строительству в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rugbc.org> (Дата обращения 5.5.25)
3. Информационный сайт о BRE Global [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.greenbooklive.com/>. (Дата обращения 5.5.25)
4. Сайт стандарта BREEAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.breeam.com> (Дата обращения 5.5.25)
5. Консалтинговая фирма JLL – Обзор рынка экологического строительства в России. Тренды и прогнозы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jll.ru> (Дата обращения 5.5.25)

*Жариков Д.С., Крапивин С.Н., Дюкарева В.И.
Научный руководитель: Ковалев С.В., ст. преп.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА НИЗКОАЛЮМИНАТНОГО БЕЛОГО КЛИНКЕРА

С каждым годом в строительной отрасли возрастает необходимость применения специальных видов цемента. Одним из таких видов являются низкоалюминатные белые цементы, которые отличаются высокой прочностью и эстетическими свойствами, а также стойкостью к коррозии и перепадам температур и являются высококласным отделочным материалом, необходимым в больших количествах. Однако производство низкоалюминатного белого цемента связано с высокими энергозатратами на обжиг, так как температура синтеза клинкерных минералов составляет около 1550°C [1], что делает необходимым проведение мероприятий по интенсификации обжига.

Одним из способов интенсификации процесса обжига низкоалюминатного белого клинкера является ввод минерализаторов.

Согласно исследованиям, проведенным на кафедре ТЦКМ [2-4], раздельный ввод минерализаторов показывает лучшие результаты и является более предпочтительным, по сравнению с традиционным способом. При использовании минерализатора $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$ для интенсификации обжига обычного белого клинкера, полное усвоение свободного оксида кальция наступает при температуре 1300°C . Данные исследования проводились на клинкерах с высоким содержанием C_3A . Поэтому целью данной работы является интенсификация процесса обжига низкоалюминатного белого клинкера при использовании раздельного ввода минерализаторов $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$.

Для достижения поставленной цели были приготовлены смеси с содержанием C_3A : 0%, 5%, 8%, 12%. Для изготовления смесей использовались реактивы CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 квалификации «ч». Содержание Fe_2O_3 во всех смесях составляет 0,49% по клинкеру. Характеристика исследуемых смесей представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика исследуемых смесей

Химический состав, %						Модули			Расчетный минералогический состав, %			
№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	ППП	КН	n	p	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A F
1	17,5 0	0,22	0,31	44,6 0	37,3 0	0,90	33,0	0,70	0,10	74,4 0	24,1 0	1,49
2	16,7 0	1,40	0,31	44,5 0	37,1 0	0,90	9,75	4,50	5,10	70,6 0	22,9 0	1,49
3	16,2 0	2,17	0,31	44,4 0	36,9 0	0,90	6,50	7,00	8,30	68,2 0	22,1 0	1,49
4	15,5 0	3,13	0,31	44,3 0	36,8 0	0,90	4,50	10,0	12,3	65,2 0	21,1 0	1,49

Для моделирования циркуляции солей щелочных металлов во вращающейся печи в исходную сырьевую смесь вводился реактив Na₂CO₃ квалификации «ч» в количестве, рассчитанном на 1,2% R₂O по клинкеру.

Минерализатор 2C₂S·CaF₂ был синтезирован в ранних исследованиях и вводился в количестве 8,11% по клинкеру [4]. Обжиг повторялся до содержания свободного оксида кальция в количестве менее 3% в минерализаторе. Фазовый состав минерализатора представлен на рис 1.

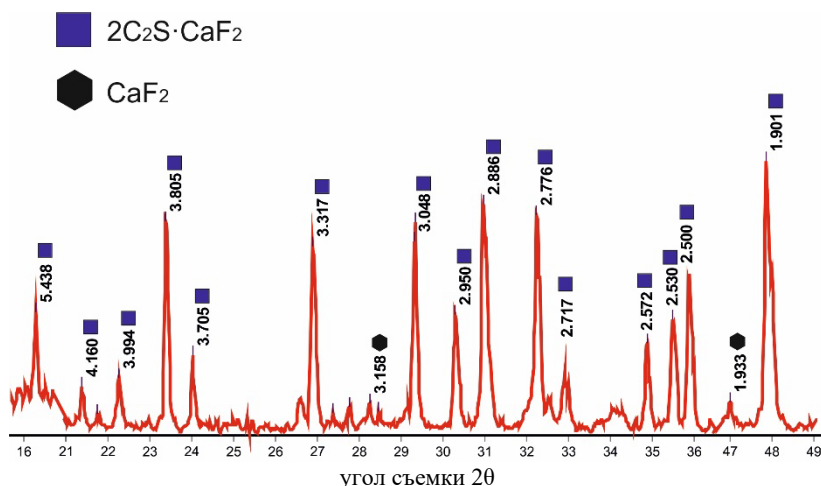


Рис. 1 Фазовый состав минерализатора 2C₂S·CaF₂

Фазовый состав рис. 1. показывает, что процесс синтеза минерализатора завершен, наблюдается лишь небольшое содержание CaF_2 (пики 3,158 и 1,933).

Составы обжигались при температурах 1250–1400°C шагом 50°C с выдержкой в течение 20 минут. Скорость набора температуры составляла 6°C/мин.

Влияние минерализатора на интенсификацию обжига исследовалось определением количественного содержания свободного оксида кальция при помощи этилово-глицератного метода [5].

Коэффициент отражения клинкера определялся по ГОСТ 965-89 [6] с помощью прибора лабораторного цифрового для определения показателя белизны РЗ-БПЛ-ЦМ.

Фазовые составы исследовались при помощи дифрактометра ARL X'TRA «ThennoFisherScientific».

В результате обжига были получены составы, результаты исследования которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние отдельного ввода минерализаторов R_2O и $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$ на содержание свободного оксида кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$), % и коэффициент отражения клинкера (КО), %.

№ состава	C3A, %	Состав	Температура обжига °C					
			1250		1300		1400	
			CaO	КО	CaO	КО	CaO	КО
№1	0,1	№1 без минерализаторов	-	-	-	-	14,39	75
№2	0,1	№2 1,2% R_2O + 8,11% $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$	7,35	79	0,92	72	-	-
№3	5,10	№3 без минерализаторов	-	-	-	-	9,48	76
№4	5,10	№4 1,2% R_2O + 8,11% $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$	7,32	80	0,15	78	-	-
№5	8,30	№5 без минерализаторов	-	-	-	-	9,79	76
№6	8,30	№6 1,2% R_2O + 8,11% $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$	5,82	82	0	77	-	-
№7	12,30	№7 без минерализаторов	-	-	-	-	10,11	74
№8	12,30	№8 1,2% R_2O + 8,11% $2\text{C}_2\text{S}\cdot\text{CaF}_2$	8,27	83	4,27	77	-	-

Введение минерализаторов позволяет снизить температуру, при которой наступает полное усвоение свободного оксида кальция. В

составах №2, №4 и №6 при температуре 1300°C содержание свободного оксида кальция составляет менее 1%. В смеси №8 при температуре 1300°C содержание свободного оксида кальция составляет 4,27%. Это может быть объяснено тем, что при наличии в клинкере соединений фтора, трехкальциевый алюминат будет разлагаться на майенит и оксид кальция (рис. 2). Во всех смесях с минерализаторами при температуре 1250°C содержание свободного оксида кальция меньше, чем в контрольных смесях при температуре 1400°C, даже при содержании C_3A 0%.

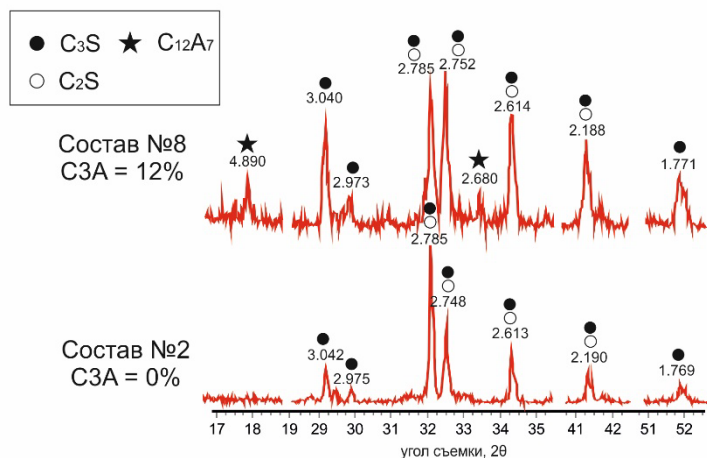


Рис. 2. Влияние минерализатора на минералогический состав клинкера при температуре 1300°C в зависимости от содержания C_3A

Отмечается, что свободный оксид кальция повышает белизну клинкера [7]. Нужно сравнивать клинкер с наименьшим содержанием $CaO_{св}$ (при температуре 1300°C) с контрольным клинкером при температуре 1400°C. Предположительно, при доведении контрольного клинкера до содержания $CaO_{св}$ 0%, его белизна будет ниже, по сравнению со смесями с минерализаторами при температуре 1300°C.

1. Раздельный ввод минерализаторов позволяет интенсифицировать обжиг низкоалюминатного белого клинкера, процессы клинкерообразования завершаются при температуре 1300 °C. Это позволяет снизить температуру обжига низкоалюминатного клинкера примерно на 200°C.

2. Добавка минерализатора $2C_2S \cdot CaF_2$ позволяют повысить белизну получаемого низкоалюминатного клинкера. Наблюдается увеличение

показателя коэффициента отражения по сравнению с контрольными смесями, что позволит повысить эстетические свойства получаемых клинкеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сычева Л.И., Остапчук О.В. Синтез белого клинкера с пониженным содержанием трехкальциевого алюмината // Стеновые доклады II Международного совещания по химии и технологии цемента. Том III. – СПб., Издательство ЦПО «Информатизация образования», 2000. С. 44-47.

2. Пат. 2633620 Российская Федерация, МПК C04B 7/42; C04B 7/06. Способ интенсификации процесса обжига портландцементного клинкера минерализаторами (варианты) / Мишин Д. А., Ковалев С. В., Чекулаев В. Г.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский Государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» - опубл. 16.10.2017, Бюл. № 29.

3. Мишин Д.А., Ковалев С.В., Чекулаев В.Г. Причина снижения эффективности действия минерализаторов обжига портландцементного клинкера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №5, С. 161-166

4. Пат. 2752767 Российская Федерация, МПК C04B 7/421; C04B 7/44. Способ получения клинкера белого цемента / Мишин Д. А., Ковалев С.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский Государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» - опубл. 03.08.2021, Бюл. № 22.

5. ГОСТ 5382-2019 Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа.

6. ГОСТ 965-89 Портландцементы белые. Технические условия.

7. Мишин Д.А., Ковалев С.В. Температура ввода минерализатора как фактор получения белого клинкера с повышенным содержанием оксида железа // Цемент и его применение. – 2022. – №1. – С.99-101.

Иванов Д.В.

Научный руководитель: Ястребинский Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ БЕТОНОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ХРИЗОТИЛА

В настоящее время все больше внимания уделяется проработке состава бетонов, используемых на атомных электростанциях, в непосредственной близости от реакторов. К таким бетонам предъявляются повышенные требования не только в вопросах прочности и радиационной защиты, но и в вопросах биологической защиты.

Радиационно-защитный бетон должен проявлять высокие показатели замедления быстрых нейтронов, поглощения нейтронов с меньшей энергией, а также поглощения гамма-излучения [1]. Этого можно достичь, подбирая такой состав бетона, который обеспечит его высокую плотность, ведь увеличение плотности материала прямопропорционально ослаблению в нем потока нейтронов и гамма-квантов. По этой причине радиационно-защитные бетоны - это всегда тяжелые бетоны.

Для большего увеличения плотности в бетон часто добавляют чугунный порошок или чугунную дробь, которая обладает большим сечением неупругого рассеяния быстрых нейтронов. После замедления нейтронов до тепловых энергий, большая их часть поглощается ядрами как водорода, так и других элементов.

Известно, что эффективность замедления тепловых нейтронов тем выше, чем ниже масса сталкивающихся частиц, а так как массы протона (ядра водорода) и нейтрона равны, больше всего энергии за один акт рассеяния теряется как раз в результате взаимодействия с водородсодержащими компонентами, чаще всего - с водой [2].

Так как радиационно-защитные бетоны, расположенные вблизи активной зоны реактора, всегда подвергаются воздействию высокой температуры, важно использовать такие компоненты, которые смогут удерживать большое количество воды в химически-связанном виде.

Одним из наиболее эффективных компонентов, содержащих химически-связанную воду, является серпентинит - природный магнезиальный силикат с химической формулой $(\text{Mg, Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.



Рис. 1 – Серпентинит

Бетоны, содержащие в своем составе серпентинит, называют серпентинитовые. Они способны удерживать химически-связанную воду, которая будет сохраняться при температурах до 500 градусов по Цельсию без охлаждения, а значит, обеспечивать эффективное замедление нейтронов [3].

Зачастую серпентинитовые бетоны изготавливаются путем введения в их состав хризотила ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) - волокнистого материала из группы серпентинитов, обладающего уникальной нанотрубчатой структурой. Диаметр нанотрубок хризотила варьируется от 10 до 30 нм.

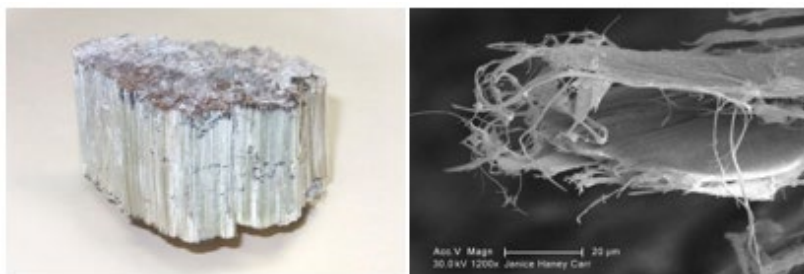


Рис. 2 – Хризотил (слева) и хризотиоловые волокна (справа)

Важной особенностью использования хризотила является низкая стоимость. Хризотил распространен почти на всех континентах, а в России находится крупнейшее месторождение в мире - Баженовское месторождение в Свердловской области, открытое в 1877. Разведанные запасы там составляют порядка 76 миллионов тонн хризотил-асбеста. Помимо того, что хризотил широко распространен, он может быть легко синтезирован [4].

Хризотил устойчив к основаниям, поэтому он остается стабильным в щелочной среде портландцемента. Добавление хризотила не только

повышает радиационную стойкость бетона, но и улучшает его термостойкость и прочностные характеристики за счет микроармирования.

Все вышеописанное свидетельствует о том, что радиационно-защитные бетоны, используемые на атомных электростанциях, могут иметь в своем составе различные компоненты. Существует множество различных подходов к изготовлению бетонов для защиты от радиации. Одним из наиболее эффективных подходов с точки зрения устойчивости к радиации и стоимости составляющих является добавление в бетон хризотилowych волокон [5]. Существует множество способов модификации хризотила, которые повышают те или иные характеристики бетона в зависимости от назначения. На сегодняшний день активно ведутся исследования, направленные на повышение эффективности использования хризотила в радиационно-защитных бетонах, что говорит о высокой актуальности темы изучения как бетонов в целом, так и хризотила в частности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ястребинский, Р. Н. Использование нанотрубчатых структур для синтеза радиационно-защитных экранов / Р. Н. Ястребинский, В. И. Павленко, О. В. Демченко // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 10. – С. 52-55. – EDN VCPADN.

2. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов / В. И. Павленко, Р. Н. Ястребинский, А. А. Смоликов [и др.] // Перспективные материалы. – 2006. – № 2. – С. 47-50. – EDN KXUXYT.

3. Разработка и исследование радио- и радиационно-защитных материалов / В.Н. Гульбин, В.А. Михеев, Н.С. Колпаков, В.В. Чердынцев // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. Т. 4. № 6. 597 с. – DOI 10.1134/S2079562913060055. – EDN QAXQHN.

4. Наумова Л.Н. Серпентинитовый заполнитель для радиационно-защитного бетона / Л.Н. Наумова, В.В. Павленко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. № 9(28). 44-45 с. – EDN SQCAEJ.

5. Ястребинский Р.Н. Использование нанотрубчатых структур для синтеза радиационно-защитных экранов / Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, О.В. Демченко // Успехи современного естествознания. – 2015. № 10. 52-55 с. – EDN VCPADN.

Исаева А.С., Лопарев А.С.

Научный руководитель: Головизнина Т.Е. канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

УТИЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Глобальный объём производства пластика превышает 460 млн тонн в год, однако менее 12% отходов подвергается рециклингу. Остальное накапливается на свалках, в водоёмах и природных ландшафтах, провоцируя долгосрочные экологические кризисы. В контексте устойчивого развития ключевой задачей становится поиск технологий, трансформирующих пластиковый мусор в ресурс для промышленности. Одним из прорывных направлений является интеграция полимерных отходов в производство строительных вяжущих материалов — цемента, асфальта и геополимеров. Этот подход не только сокращает углеродный след строительной отрасли, но и создаёт замкнутый цикл использования пластика.

Пластики классифицируются по химическому составу (ПЭТ, ПНД, ПВХ, полистирол и др.), что определяет их совместимость с вяжущими материалами. Например, термопласты (полипропилен, полиэтилен) подходят для модификации битума благодаря способности плавиться при нагреве. Термореактивные полимеры (эпоксидные смолы) менее пригодны из-за сложности повторной обработки.

Основные требования к пластиковому сырью:

Пластиковые частицы заменяют часть традиционных наполнителей (песка, щебня) или выступают армирующими добавками. Например, введение 5–15% полиэтиленовых гранул в бетонную смесь:

Преимущества: Снижение веса конструкции, повышение теплоизоляционных свойств, устойчивость к влаге.

Недостатки: Уменьшение прочности на сжатие на 10–25% при концентрации пластика выше 10%.

Исследования демонстрируют, что обработка поверхности пластика щелочными растворами улучшает адгезию с цементной матрицей, компенсируя потерю прочности.

Было исследовано влияние добавки пластика в качестве выгорающей составляющей на качество цементного клинкера. Для этого смоделировали подачу пластиковых отходов в зону

декарбонизации. Так как пластик представлен в виде небольших, легких кусочков, для отхода требуется упаковка.

Для опыта, в соответствии с расчётами, в состав цементной сырьевой смеси ввели 0,9% пластиковых отходов.

В идентичных условиях синтезированы 2 клинкера:

- контрольный без добавок;
- с добавкой пластикового отхода.

Для моделирования подачи отхода в зону декарбонизации, сырьевая смесь была сформована в брикеты, которые нагревались до температуры 1000°C, затем охлаждались при комнатной температуре и после измельчались в фарфоровой ступке. В частично обожженный материал добавлялся отход пластика в количестве 0,9% от массы сырьевой смеси. Затем происходило усреднение и снова формировались брикеты, которые обжигались при температуре 1450°C с выдержкой в 1 час.

Проанализировано влияние добавки пластика на фазовый состав клинкера, который определяли с помощью рентгенофазового анализа. Представлен фрагмент рентгенограммы образца без добавки (Рис. 1).

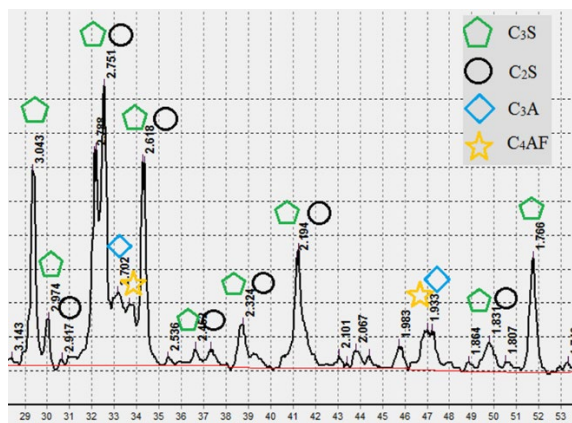


Рис.1 Фрагмент дифрактограммы клинкера без добавок.

В составе клинкера идентифицированы следующие минералы:

C3S – $d = 3,043; 1,66; 2,974; 2,788; 2,751; 2,618; 2,194; 2,329; 2,452; 1,831 \text{ \AA}$

C2S – $d = 2,917; 2,194; 2,978; 2,793; 2,751; 2,618; 2,329; 2,452; 1,831 \text{ \AA}$.

C3A – $d = 2,718; 1,933 \text{ \AA}$.

C4AF – $d = 2,702; 1,935 \text{ \AA}$.

На рисунке 2 представлена рентгенограмма клинкера, синтезированного как модель частичной замены топлива на отход пластика при подаче в зону декарбонизации.

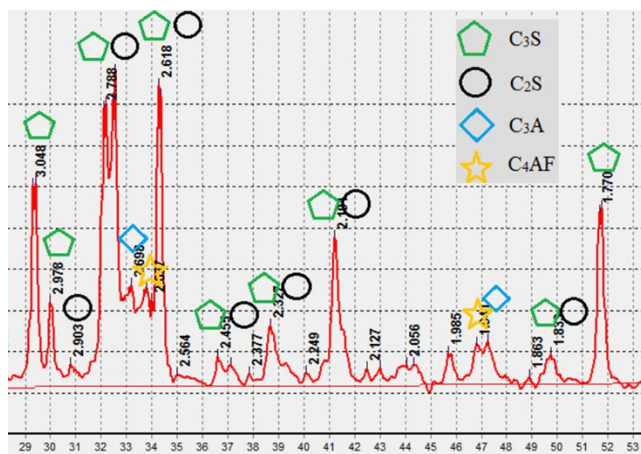


Рис.2 Фрагмент дифрактограммы клинкера с добавкой пластика.

В соответствии с данными рентгенофазового анализа в составе клинкера идентифицированы следующие минералы:

C₃S – d = 3,048; 1,77; 2,978; 2,788; 2,751; 2,618; 2,191; 2,377; 2,455; 1,833 Å

C₂S – d = 2,903; 2,191; 2,978; 2,788; 2,751; 2,618; 2,377; 2,455; 1,833 Å.

C₃A – d = 2,706; 1,924 Å.

C₄AF – d = 2,659; 1,941 Å.

По Данным рентгенофазового анализа, использование пластикового отхода при частичном топливозамещении при вводе его в зону декарбонизации не оказывает значимого влияния на фазовый состав клинкера.

Из продуктов обжига был изготовлен цемент путем измельчения в металлической, а затем в фарфоровой ступках до удельной поверхности 370 м²/кг с добавкой 5% гипса. Гидравлическую активность синтезированных клинкеров устанавливали по пределу прочности на сжатие малых образцов размером 1,41 x 1,41 x 1,41 см из цементного теста с водоцементным отношением В/Ц=25%.

По истечению сроков хранения: 2, 7 и 28 суток образцы подвергли испытанию на сжатие (Табл. 1).

Таблица 1 - Влияние добавки пластика при частичном топливозамещении добавлением пластика в зону декарбонизации на гидравлическую активность клинкеров

Клинкер	2 суток	7 суток	28 суток
	Прочность при сжатии, МПа		
Без добавок	27	60	75
С добавкой пластика	29	56	72

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что частичное топливозамещение на пластик, путём подачи отхода в зону декарбонизации не оказало негативного воздействия на гидравлическую активность цемента.

Оценивая полученные результаты, можно сделать вывод что, ввод отхода в зону декарбонизации не снижает гидравлической активности клинкера, позволяя уменьшить расход основного форсуночного топлива.

Использование пластиковых отходов для частичного топливозамещения позволит безвредно переработать отходы и уменьшить удельный расход невозобновляемого топлива на обжиг клинкера.

Утилизация пластиковых отходов в производстве вяжущих материалов — это не только инструмент борьбы с загрязнением, но и возможность переосмыслить подходы к строительству. Несмотря на технические сложности, технологии демонстрируют высокую адаптивность: от дорожных покрытий в Азии до инновационного бетона в Европе. Успех зависит от синергии между наукой, промышленностью и регуляторами, а также от готовности общества поддерживать «зелёные» инициативы. Внедрение таких решений станет ключевым шагом к достижению целей устойчивого развития (ЦУР) ООН, особенно в аспектах ответственного потребления и климатических действий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полипласт. Промышленная Химия [Электронный ресурс]: Использование альтернативного топлива в производстве цемента. – URL: <https://dzen.ru> (дата обращения: 08.05.2023)
2. Классен В. К. Техногенные материалы в производстве цемента: учебное пособие / В. К. Классен, И. Н. Борисов, В. Е. Мануйлов; под общ ред. В. К. Классена. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 126 с.

3. Использование различных горючих отходов в производстве цемента / О. В. Мирошникова, И. Н. Борисов. – Текст непосредственный // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 7. – С. 71-75.

УДК 621.793.7:004.932

Киященко В.В.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

КОМПЬЮТЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ СИЛИКАТНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Традиционные методы контроля технического состояния, основанные на визуальном анализе или ручных измерениях, обладают рядом недостатков: субъективностью, высокой трудоемкостью и недостаточной точностью. В связи с этим актуальной задачей является разработка автоматизированных систем анализа изображений, способных с высокой достоверностью выявлять дефекты микроструктуры.

В последние годы методы компьютерного зрения и машинного обучения активно применяются для обработки и анализа изображений в различных областях, включая промышленный контроль. Однако существующие алгоритмы часто требуют тонкой настройки параметров фильтрации и сегментации, что особенно важно при работе с микроскопическими изображениями сложных композитных материалов.

Целью данной работы является разработка и оптимизация методики фильтрации изображений для повышения точности оценки технического состояния элементов конструкций. Научная новизна работы заключается в применении гибридного подхода, сочетающего методы компьютерного зрения (LBP, морфологические операции, корреляционные фильтры) с алгоритмами оптимизации (дифференциальная эволюция) для адаптивной обработки изображений микроструктур. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью внедрения разработанной методики в системы контроля качества материалов, включая промышленные диагностические комплексы.

Современные методы компьютерного зрения играют ключевую роль в автоматизированном анализе микроструктурных изображений элементов боеприпасов. Среди наиболее эффективных подходов можно выделить следующие: локальные бинарные шаблоны (LBP, Local Binary

Patterns), морфологические операции. Корреляционные фильтры.

Метод LBP инвариантен к изменениям освещения и обладает высокой вычислительной эффективностью, что делает его применимым для обработки изображений микроструктур [1]. Преимущества LBP включают устойчивость к шуму и возможность работы с изображениями низкого качества, что особенно важно при анализе дефектов композитных покрытий [2]. Морфологические преобразования, такие как эрозия, дилатация, открытие и закрытие, широко применяются для выделения структурных элементов и удаления шумов на изображениях. Размер структурного элемента (ядра) играет критическую роль в эффективности морфологической обработки [3]. Применение корреляционных фильтров требует тщательного подбора размера ядра и пороговых значений, так как их эффективность зависит от согласованности с анализируемыми структурами [4].

Для настройки параметров методов компьютерного зрения применяются алгоритмы оптимизации, позволяющие находить оптимальные значения в условиях многокритериальных ограничений. Среди наиболее эффективных подходов можно выделить дифференциальную эволюцию (Differential Evolution, DE). DE является методом глобальной оптимизации, основанным на идеях генетических алгоритмов [5]. Он эффективен для работы с непрерывными, дискретными и смешанными пространствами параметров. DE демонстрирует высокую устойчивость к попаданию в локальные минимумы, что делает его идеальным выбором для задач оптимизации параметров фильтрации изображений [6]. Генетические алгоритмы (Genetic Algorithms, GA) имитируют процесс естественного отбора, используя операции скрещивания, мутации и отбора. Преимущество GA заключается в их способности исследовать большие пространства параметров, однако они могут требовать значительных вычислительных ресурсов по сравнению с DE [7].

Выбор дифференциальной эволюции в данной работе обусловлен ее сбалансированностью между скоростью сходимости и устойчивостью к локальным минимумам (Табл. 1), что критически важно для обработки изображений в условиях ограниченных ресурсов.

Таблица 1 – Сравнение методов оптимизации

Критерий	Дифференциальная эволюция	Генетические алгоритмы
Сходимость	Быстрая	Медленная
Устойчивость к шуму	Высокая	Средняя
Вычислительная сложность	Низкая	Высокая
Применимость	Смешанные пространства параметров	Дискретные и непрерывные задачи

Методы компьютерного зрения, совмещённые с алгоритмами оптимизации, позволяют автоматизировать и существенно повысить точность анализа микроскопических изображений.

В рамках данного исследования была разработана программно-алгоритмическая платформа, направленная на автоматизированную обработку изображений с целью повышения достоверности идентификации дефектов в структуре композиционных покрытий. Исследование ориентировано на повышение точности контроля качества изделий, минимизируя влияние человеческого фактора и повышая производительность обработки.

Основная задача исследования заключается в нахождении оптимальных параметров обработки изображений микроструктур композитных покрытий боеприпасов, обеспечивающих максимальную точность детектирования дефектов при заданных ограничениях на вычислительные ресурсы. Формально задача оптимизации формулировалась как многоцелевой поиск таких параметров обработки, которые минимизируют суммарную ошибку классификации дефектов и при этом укладываются в допустимое время обработки, лимиты по объёму данных, вычислительным затратам и энергопотреблению.

Математически задача формулируется как многоцелевая оптимизация. Целевая функция (1) оптимизации имела следующий вид:

$$F(x) = \min(\omega_1 \cdot E(x) + \omega_2 \cdot T(x)), \quad (1)$$

где $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор оптимизируемых параметров;

$E(x)$ – ошибка классификации дефектов (в %);

$T(x)$ – время обработки одного изображения (в мс);

ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты определяющие приоритет точности и скорости соответственно ($\omega_1 + \omega_2 = 1$).

Основными объектами оптимизации выступали:

1. методы обработки изображений: корреляционные фильтры, пороговая сегментация, морфологические преобразования, локальные бинарные шаблоны (LBP);

2. параметры обработки: пороговые значения, размеры структурных элементов, параметры LBP и ядра корреляции.

Вектор x включает следующие ключевые параметры:

1. Размер структурного элемента для морфологических операций (3×3 , 5×5 , 7×7 пикселей);
2. Порог сегментации (диапазон $[0,1]$);
3. Количество уровней анализа для LBP (целые значения от 2 до 8);
4. Размер ядра корреляционного фильтра (2×2 , 3×3 , 4×4 пикселей).

Для учета ограничений использован метод штрафных функций. Введена динамическая адаптация весовых коэффициентов ω_1 и ω_2 . Реализована параллельная оценка целевой функции для ускорения вычислений. Схема алгоритма представлена на Рис. 1.

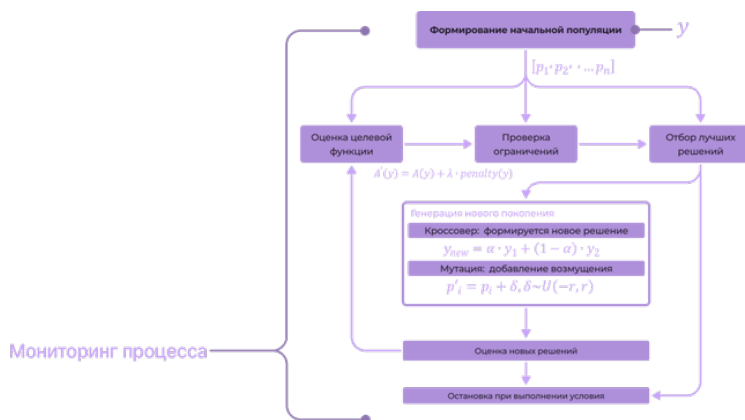


Рис. 1 – Алгоритм дифференциальной эволюции

Алгоритм включал следующие этапы:

- Инициализация случайной популяции параметров обработки;
- Оценка значений целевой функции с учетом штрафов за нарушения ограничений;
- Отбор лучших решений на основе минимального значения $F'(x)$;
- Применение операторов мутации и кроссовера для формирования новых решений;
- Повторение цикла до достижения сходимости или выполнения критериев останова (по числу итераций, изменению функции, достижению приемлемого решения).

Для достижения цели необходимо было подобрать оптимальные алгоритмы обработки изображений, а также настроить их параметры таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность при

заданных ограничениях на вычислительные ресурсы (Табл. 2).

Реализация алгоритма дифференциальной эволюции позволила получить следующие оптимальные параметры обработки изображений: размер структурного элемента: 3×3 пикселя, порог сегментации: 0.4458, уровни анализа LBP: 4, размер ядра корреляции: 2×2 пикселя.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики до и после оптимизации

Параметр	До оптимизации	После оптимизации	Улучшение
Точность детектирования (%)	78.2 ± 2.1	89.7 ± 1.5	+11.5%
Ложноположительные срабатывания	15.3%	6.8%	-8.5%
Время обработки (мс)	120 ± 15	95 ± 10	-20.8%
Использование памяти (МБ)	450	380	-15.6%

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность предложенного подхода, сочетающего методы оптимизации параметров обработки изображений с современными алгоритмами компьютерного зрения для решения задачи анализа микроструктурных дефектов в элементах конструкций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № 125040404855-0).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ojala T., Pietikäinen M., Mäenpää T. Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 2002. - Vol. 24, № 7. - P. 971-987.

2. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. - 4th ed. - Pearson, 2018. - 1168 p.

3. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. - 2nd ed. - Springer, 2022. - 925 p.

4. Russ J.C. The Image Processing Handbook. - 7th ed. - CRC Press, 2016. - 889 p.

5. Storn R., Price K. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces // Journal of Global Optimization. - 1997. - Vol. 11. - P. 341-359.

6. Das S., Suganthan P.N. Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. - 2011. - Vol.

15, № 1. - Р. 4-31.

7. Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. - Springer, 2005. - 538 p.

УДК 666.016.

Корыпаева О.Г.

Научный руководитель: Онищук В.И., д-р техн. наук, проф.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВОВ СТЕКОЛ ДЛЯ СТЕКЛЯННЫХ ШАРИКОВ

Стеклянные шарики (стеклошарики) - это продукт стекольной промышленности в виде маленькой сферы. Могут быть как сплошными, так и пустотелыми. Различные способы производства позволяют варьировать размеры получаемых изделий: от 5 мкм до 1 см и более. Стеклошарики нашли применение в разнообразных сферах промышленности:

1) от 5 до 10 мкм - в качестве наполнителя при производстве красок, шпатлевок, клея, пластмасс, бетонов, утеплителей; наполнителя для пенопластовых, цементных или эпоксидных материалов и т.д. [1, 2];

2) от 50 до 500 мкм - используются для стеклоструйной обработки поверхностей (очистка металлических деталей, обработка сварных швов, очистка от эффекта «побежалости», удаление окислов, сатинирование) [2];

3) от 425 до 850 мкм - в качестве присадки для буровых растворов;

4) от 100 до 600 мкм - предназначены для применения в качестве световозвращающих элементов для горизонтальной дорожной разметки автомобильных дорог и дорожных знаков [2, 3];

5) от 630 до 1200 мкм - в производстве декоративных отделочных строительных материалов;

6) от 0,5 до 1,5 мм - в качестве фильтрующего материала очистительных устройств для воды;

7) от 1 до 3 мм - в ювелирной промышленности в качестве имитации натуральных камней [4];

8) от 1 до 3 мм - в качестве наполнителя для игрушек, ковриков, утяжеленных одеял;

9) от 1 до 5 мм - как клапанные шарики-дозаторы для бутылок;

10) от 1,6 до 2 мм - для измельчения веществ в горизонтальных бисерных мельницах, а также для размалывания красок и лаков на

открытых вертикальных мельницах;

11) от 1,5 до 2 мм - в специальных устройствах для стерилизации предметов медицинского назначения;

12) от 1,5 до 16,0 мм - для перемешивания и смешивания содержимого аэрозольных баллончиков;

13) от 10 до 20 мм - шарики-марблс для декоративных целей;

14) от 19 до 22 мм - в качестве исходного сырья для выработки стекловолокон и стекловаты;

15) от 1 см до 10 см - для различных игр, медитаций, декора.

В настоящее время существует два основных способа получения шариков. По первому способу шарики диаметром 5-500 мкм получают путем оплавления предварительно измельченного стекла. По второму способу шарики диаметром 500-1500 мкм получают из расплава путем диспергации в газовом потоке с последующим охлаждением и улавливанием [4].

Количество статей, опубликованных по данной теме, составило 62 шт. за последние 15 лет, из чего можно сделать вывод, что на сегодняшний день в научной среде есть интерес к получению стеклошариков. Одним из новейших направлений применения стеклянных шариков может стать получение декоративных витражей, качественно отличающихся от общепринятых техник изготовления (таких как классический витраж или техника Тиффани).

При формировании шариков в диапазоне размеров от 500 мкм до 5 мм существенным критерием является химический состав стекла, а именно оксиды элементов, влияющие на определенные значимые свойства. На основании литературного обзора, было установлено, что: введение оксидов Li_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 повышает поверхностное натяжение стекла [5]; показатель преломления повышается за счет введения щелочных оксидов - PbO , BaO , CaO , ZnO , Sb_2O_3 , но понижается при большом количестве SiO_2 ; MgO и ZnO повышают температурный коэффициент линейного расширения стекла.

Целью исследования является поиск составов стекла, которые будут обладать повышенными поверхностным натяжением, показателем преломления и ТКЛР, а также склонностью к окрашиванию различными красителями.

Используя данные патентов, учебных пособий, сайтов по продаже стеклянных шариков и собственные предложения, можно сформировать перечень химических составов стеклошариков, масс., %:

1. SiO_2 54; Al_2O_3 2,5; MgO 0,15; Fe_2O_3 0,07; CaO 30; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 13,28.

2. SiO_2 62,19; Al_2O_3 0,56; MgO 2,72; Fe_2O_3 0,04; CaO 27,49; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 7.

3. SiO₂ 64; Al₂O₃ 5; MgO 1,5; Fe₂O₃ 2,5; CaO 7; Na₂O 15.
4. SiO₂ 53; Al₂O₃ 15; Fe₂O₃ <0,4; CaO+MgO 21,35; B₂O₃ 9,5; R₂O 0,5; F₂ <0,25.
5. SiO₂ 72; Al₂O₃ 1; MgO 4; Fe₂O₃ 0,1; CaO 9; Na₂O 13,8; K₂O 0,1.
6. SiO₂ 72; Al₂O₃ 2; MgO 3,8; Fe₂O₃ 0,2; CaO 6,8; Na₂O 14,8; K₂O 0,1.
7. SiO₂ 72; Al₂O₃ 1,5; MgO 2,5; CaO 10; Na₂O 14.
8. SiO₂ 73,7; Al₂O₃ 0,97; MgO 4,2; Fe₂O₃ 0,1; CaO 10; Na₂O 10,8; K₂O 0,2.
9. SiO₂ 57,2; Al₂O₃ 2; MgO 1,5; Fe₂O₃ 0,1; CaO 25; Na₂O 14; K₂O 0,1; крас. 0,1.
10. SiO₂ 50,2; Al₂O₃ 2,5; MgO 2; Fe₂O₃ 0,1; CaO 30; Na₂O 15; K₂O 0,1; крас. 0,1.
11. SiO₂ 75; MgO 2; CaO 6,5; Na₂O 13,5; K₂O 2,5; примеси 0,5.

Расчет значимых свойств составов по методу А.А. Аппена представлен в таблице:

Таблица – Результаты расчета

№ состава порядку	Поверхностное натяжение, мН/м	Показатель преломления, ед.	ТКЛР, град ⁻¹
1	365	1,572	111,86
2	363	1,561	88,5
3	325	1,502	98,1
4	371,9	1,542	51,72
5	326,7	1,519	92,23
6	322,8	1,514	93,03
7	325	1,520	92,91
8	328,6	1,516	81,81
9	357	1,559	110,2
10	371	1,574	118,2
11	308,3	1,509	92,64

Сопоставим предложенные составы по количеству содержания оксидов (SiO₂; Al₂O₃; MgO; CaO; Na₂O) и показателям свойств. Чтобы проследить зависимости, составим диаграммы, где по горизонтальной оси расположены составы стекол в порядке увеличения определенного показателя.

На первой диаграмме (Рис. 1) рассмотрено поверхностное натяжение. Можно проследить тенденцию падения количества SiO₂ в составе стекла, но при этом повышение количества CaO.

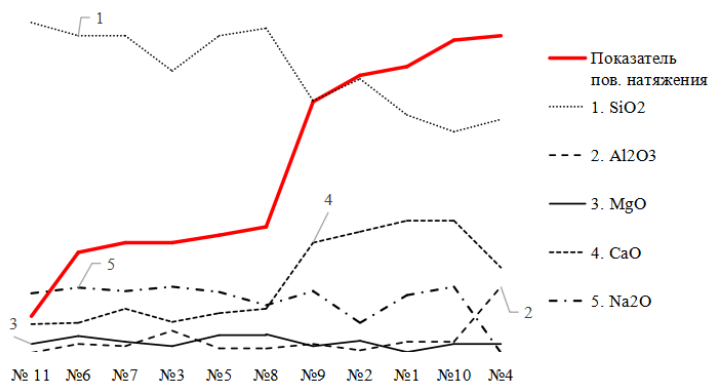


Рис. 1 Зависимость показателя поверхностного натяжения от компонентов в сформированных составах

Следующая диаграмма (Рис. 2) рассматривает показатель преломления стекла. Аналогично прослеживается падение количества SiO_2 и увеличение количества CaO . Можно заметить небольшое уменьшение содержания MgO .

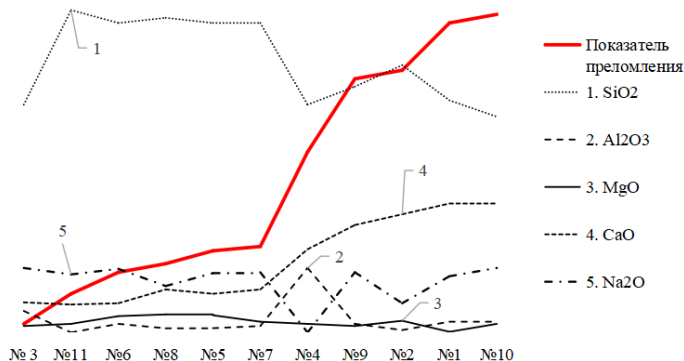


Рис. 2 Зависимость показателя преломления от компонентов в сформированных составах

На третьей диаграмме (Рис. 3) представлена зависимость показателя ТКЛР от введенных в состав стекла оксидов. Наблюдается снижение количества SiO_2 , небольшое увеличение количества Na_2O . Скачок приходится на повышение количества CaO .

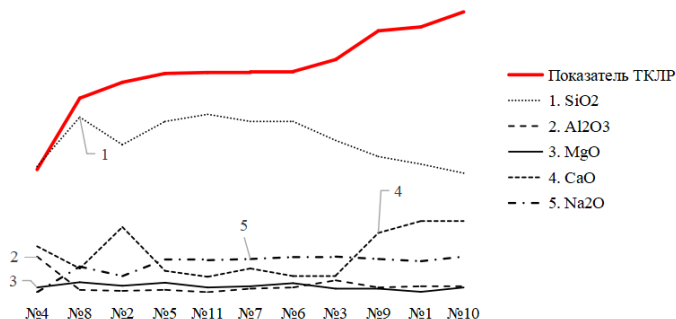


Рис. 3 Зависимость показателя ТКЛР от компонентов в сформированных составах

На основании расчета подходящими по свойствам составами можно считать №1, №9 и №10. Недостаточно отвечающими требованиям являются №3, №6, №8 и №11.

Таким образом, после расчета свойств и их анализа, из сформированной группы составов для формирования стеклянных шариков по свойствам наиболее подходят №1, №9 и №10. Оптимальный состав для производства будет выбран после проведения экспериментальных исследований, которые позволят получить стеклянные шарики в диапазоне от 3 до 7 мм. Так как шарики будут использоваться в декоративных целях, будут проведены эксперименты по разнообразному окрашиванию стекол, чтобы получить цветные или бесцветные, прозрачные или глухие шарики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калатоzi В. Использование стеклoбoя в тeхнoлoгии мaтeриaлoв стрoитeльнoгo нaзнaчeния / В. Калатоzi, Н. И. Минькo // Вeстник Бeлгoрoдскoгo гoсудaрствeннoгo тeхнoлoгичeскoгo унивeрситeтa им. В.Г. Шухoвa. — 2018. — №. 1. — С. 82-88.
2. Бeссмeртный В. С. Плaзмeннaя тeхнoлoгия пoлучeния стeклoмикрoшaрикoв нa oснoвe бoя тaрных и сoртoвых стeклo / В. С. Бeссмeртный, Н. И. Минькo, М. А. Бoндaрeнкo, Д. В. Кoчурин // Извeстия Сaнкт-Пeтeрбургскoгo гoсудaрствeннoгo тeхнoлoгичeскoгo институтa (тeхничeскoгo унивeрситeтa). — 2022. — № 62. — С. 16-20.
3. Бeссмeртный В. С. Исслeдoвaниe эсплoуaтaциoнных хaрaктeристик стeклoмикрoшaрикoв, пoлучeнных мeтoдoм плaзмeннoй oбрaбoтки / В. С. Бeссмeртный, В. С. Лeсoвик, Н. И. Бoндaрeнкo [и др.]

// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2013. — № 3. — С. 140-143.

4. Бессмертный В. С. Энергосберегающая технология получения стеклянных микрошариков методом плазменного распыления / В. С. Бессмертный, А. А. Ляшко, П. С. Дюмина [и др.] // Успехи современного естествознания. — 2010. — № 3. — С. 105-107.

5. Бушуева Н. П. Технология материалов [Текст] : учебное пособие для студентов направления подготовки 20.03.01 - Техносферная безопасность профиля "Безопасность технологических процессов и производств" / Н. П. Бушуева, И. А. Ивлева, О. А. Панова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. — 201 с.

УДК 666.9.015.23

Кривошеин Д.В., Литвинова Ю.И., Кужелева А.А.

Научный руководитель: Новоселов А.Г., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ КЛИНКЕРА РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Процесс обжига сырьевой смеси формирует основные клинкерные минералы и наряду с этим для достижения требуемого минералогического состава этап охлаждения играет важную роль в фиксации получаемых параметров клинкера. Режим охлаждения оказывает влияние на микроструктуру и как следствие предопределяет конечные свойства получаемого клинкера [1...3].

Современные тенденции в цементной промышленности направлены на повышение энергоэффективности и экологичности производства, а также на улучшение качества цемента. Оптимизация процесса охлаждения наряду с этим позволяет достичь этих целей путем снижения энергопотребления, уменьшения выбросов вредных веществ и улучшения свойств клинкера.

Классические методы охлаждения, зачастую, не позволяют оптимизировать все параметры одновременно: скорость охлаждения, энергопотребление оборудования, и свойства клинкера. Неравномерное охлаждение может привести к образованию внутренних напряжений, снижению прочности и изменению минералогического состава, что, в свою очередь, сказывается на сроках схватывания, водопотребности и

других важных параметрах. В связи с этим, исследование оптимальных режимов охлаждения клинкера является актуальным.

В работе исследуется влияние режима охлаждения на свойства клинкера посредством его резкого охлаждения от 1450, 1250 и 1100 °С.

Целью работы является изучение возможности управления свойствами клинкера путем регулирования процесса охлаждения.

Для получения клинкеров с заданным минералогическим составом подготовлены две сырьевые смеси на основе сырьевой муки АО «Серебряковцемент».

Получены клинкеры, характеризующиеся следующими минералогическими составами (табл.1).

Таблица 1 – Характеристика клинкеров и параметры охлаждения

Клинкер	Модули			Расчетный фазовый состав, масс. %				Скорость охлаждения образцов, °С в мин	
	КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	В печи	На воздухе
№1	0.81	2,33	1,24	38,27	38,31	7,15	13,65	~20	~200°С
№2	0.93	2,02	1,24	63,34	12,72	7,36	14,17		

Обжиг сырьевых смесей выполнялся в лабораторной печи с силовыми нагревателями при температуре 1450 °С в течение одного часа. Охлаждение образцов клинкера осуществлялось по следующему температурному режиму. Температура изъятия образцов из печи: 1450 °С, 1250 °С, 1100 °С для образцов №1 и №2 соответственно.

Для изучения полученных образцов клинкера использовали петрографический и рентгенофазовый методы анализа с определением прочности на сжатие образцов из затвердевшего цементного камня на 2 и 7 сутки.

В ходе анализа исследуемых образцов клинкера на свободный кальций этилово-глицератный метод не выявил его наличие ввиду отсутствия характерной реакции.

Результаты рентгенофазового анализ указывают о наличии на всех дифрактограммах исследуемых образцов клинкеров №1 и №2 наличие всех основных клинкерных фаз и их характерных пиков интенсивностей (рис.1...3). Наблюдаемое изменение содержания жидкой фазы в образцах при различном температурном режиме от 1450 до 1100 °С свидетельствует о динамике протекающих фазовых превращений характерных для данных температур.

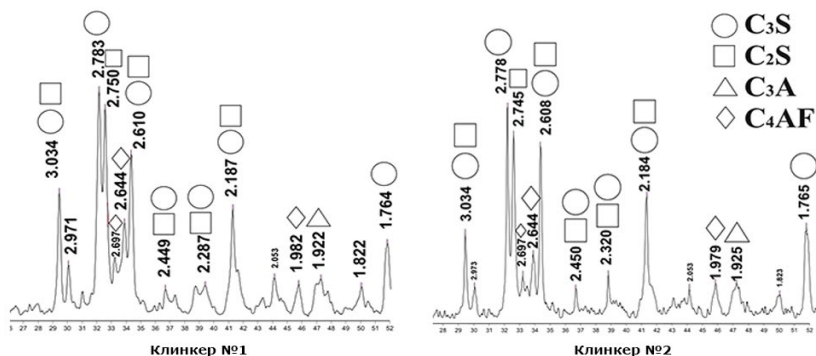


Рис.1 Рентгенограммы клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1100 °С

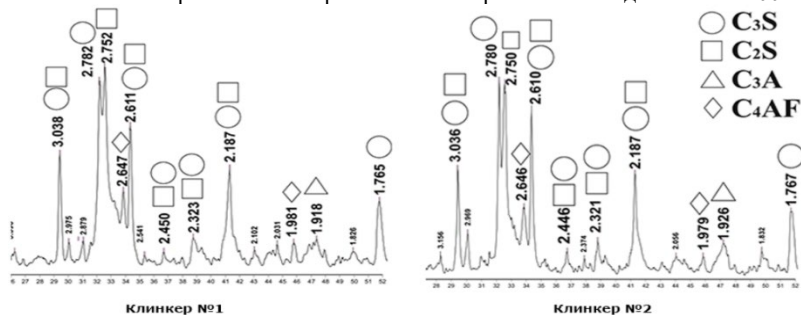


Рис.2 Рентгенограммы клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1250 °С

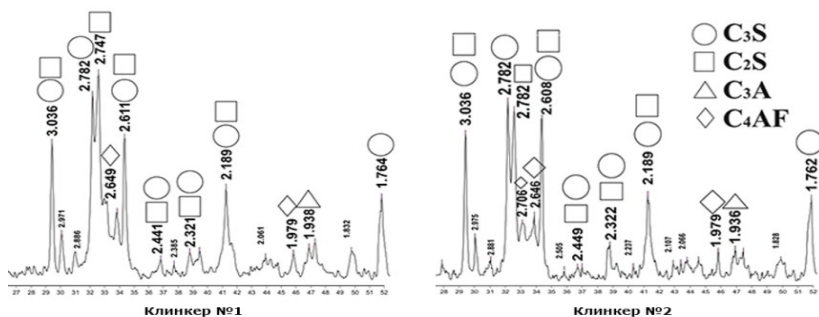
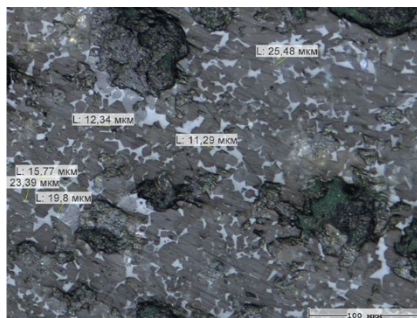
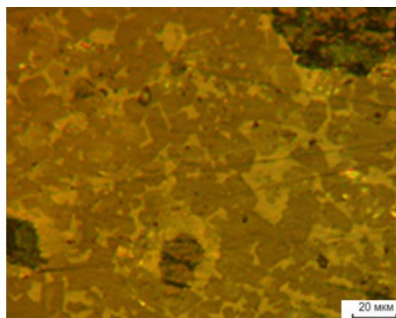


Рис.3 Рентгенограммы клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1450 °С

Петрографический анализ аншлифов подтверждает соответствие расчетного минералогического состава фактическому (рис.4...6).

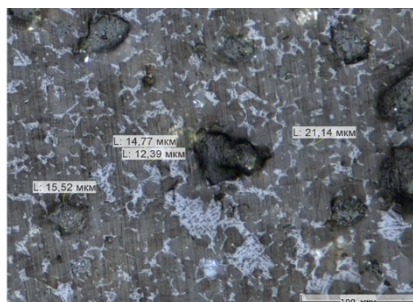


Клинкер №2

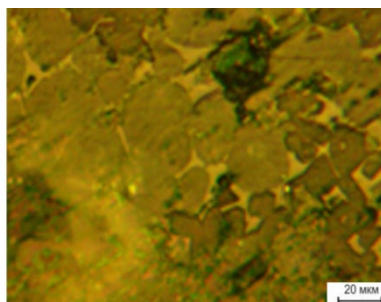


Клинкер №1

Рис.4 Микроструктура исследуемых клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1100 °С

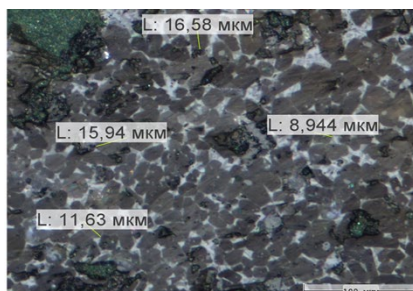


Клинкер №2

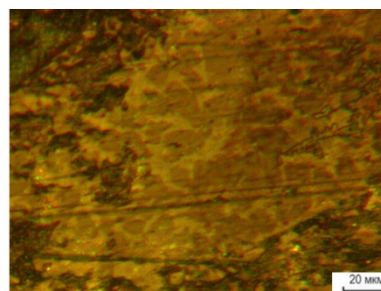


Клинкер №1

Рис.5 Микроструктура исследуемых клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1250 °С



Клинкер №2



Клинкер №1

Рис.6 Микроструктура исследуемых клинкеров №1 и №2 с резким охлаждением от 1450 °С

При резком охлаждении от 1450 °С наблюдаются сросшиеся кристаллы алита с размерами в среднем от 8,9 до 17 мкм. В обоих образцах, встречаются кристаллы с включениями белита.

При резком охлаждении от 1250 °С наблюдаются кристаллы алита размерами от 12,3-23 мкм, встречаются кристаллы 30-40 мкм.

При резком охлаждении от 1100 °С наблюдаются кристаллы алита от 9-26 мкм, встречаются удлиненные кристаллы от 20-26 мкм. Кристаллы алита имеют четкую угловатую структуру.

Белит при любом режиме охлаждения сформирован округлыми кристаллами, сконцентрированными как правило вокруг пор образцов. Средний размер кристаллов белита составляет 12 – 35 мкм.

С целью оценки прочностных характеристик цемента, клинкер с добавкой реактивного гипса измельчали до удельной поверхности $350 \pm 10 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Ввод реактива составил 3% по SO_3 исследуемых клинкеров (рис.7).

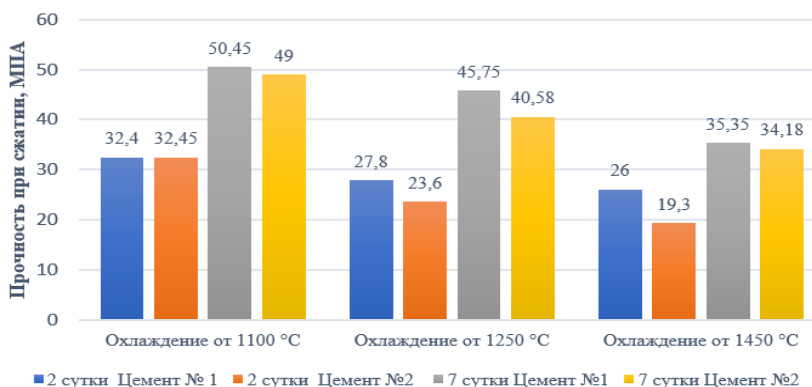


Рис.7 Гидратационная активность клинкеров №1 и №2

В исследуемых цементах наблюдается снижение гидравлической активности по мере повышения температуры изъятия образцов из печи.

Выводы.

1. Режим охлаждения оказывает влияние на микроструктуру, фазовый состав и гидратационную активность клинкера.

2. При увеличении температуры резкого охлаждения от 1100 °С к 1450 °С наблюдается уменьшение кристаллов алита с 20-26 мкм до 8-18 мкм. По мере снижения температуры наблюдается формирование четкой угловатой структуры кристаллов алита.

3. Оптимальный размер кристаллов алита достигаемый резким охлаждением от 1100 °С формирует оптимальную гидравлическую

активность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутт Ю.М., Химическая технология вяжущих материалов / Сычев М.М., Тимашев В.В. — М.: Высш.школа, 1980. — 472 с.
2. Классен, В.К. Технология и оптимизация цемента / В.К. Классен. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. — 298 с.
3. Новоселов А.Г., Влияние режима охлаждения на активность клинкера с различным содержанием C_3A / А.Г. Новоселов, В.К. Классен, А.С. Коломацкий // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — 8 с.

УДК 666.94

Кужелева А.А., Литвинова Ю.И.

Научный руководитель: Морозова И.А., канд. техн. наук, доц.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

РОЛЬ ФОСФОГИПСА В ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В настоящее время темпы строительства с каждым годом увеличиваются всё больше и больше. Портландцемент является основным материалом для производства строительных конструкций различного назначения. В связи с этим потребность в цементе соответственно возрастает. С увеличением выпуска цемента растут и объёмы необходимых для его изготовления материалов, в частности гипсового камня, который применяется в качестве регулятора сроков схватывания.

В Белгородской области природный гипсовый камень не добывается. Весь объём гипсового камня для получения портландцемента импортируется. Поэтому целесообразно вовлечение в производство гипсосодержащих отходов для удовлетворения потребностей цементной промышленности в сырьевых материалах [1].

В это же время существуют промышленные предприятия, которые вырабатывают огромное количество гипсосодержащих отходов. С ростом объёмов их производства растут и размеры промышленных свалок, что ведёт к нанесению ущерба окружающей среде [2].

Среди разновидностей гипсосодержащих отходов, различают фосфогипс, борогипс, цитрогипс, фторогипс, и др., которые именуются и классифицируются по наиболее характерным для них примесям или

техническим процессам, имеющим важное промышленное значение [3]. Среди перечисленных отходов, объёмы фосфогипса наиболее велики, на территории России они составляют около 450-500 млн тонн.

Широкомасштабное использование фосфогипса в качестве регулятора сроков схватывания цемента позволит решить вопросы защиты окружающей среды, а также сэкономить природное минеральное гипсовое сырьё [4].

В связи с этим, целью данной работы являлось исследование возможности использования фосфогипса в качестве добавки при производстве цемента.

Для проведения исследований в работе использовались следующие материалы: клинкер ЗАО «Белгородский цемент» (табл. 1, 2), природный гипс ООО «КНАУФ ГИПС Новомосковск» (табл. 3), фосфогипс «ФосАгро» (табл. 4).

Таблица 1 – химический состав и модульные характеристики клинкера, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	n	p	КН
21,48	5,30	67,20	4,20	0,30	2,26	1,26	0,95

Таблица 2 – минералогический состав клинкера, %

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Сумма
65,32	9,79	9,55	12,77	97,43

Таблица 3 – химический состав природного гипса, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	ппп
1,12	0,32	30,7	0,12	2,85	42,39	22,1

Таблица 4 – химический состав фосфогипса, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
0,41	0,20	47,40	0,77	0,16	47,06

Для проведения исследований были рассчитаны составы цементов с различным содержанием природного гипса (Г) и фосфогипса (Ф) при одинаковом содержании SO₃ в цементе.

Синтез цементов проводился путём совместного помола клинкера и гипсосодержащей добавки в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности, равной 300±10 м²/кг.

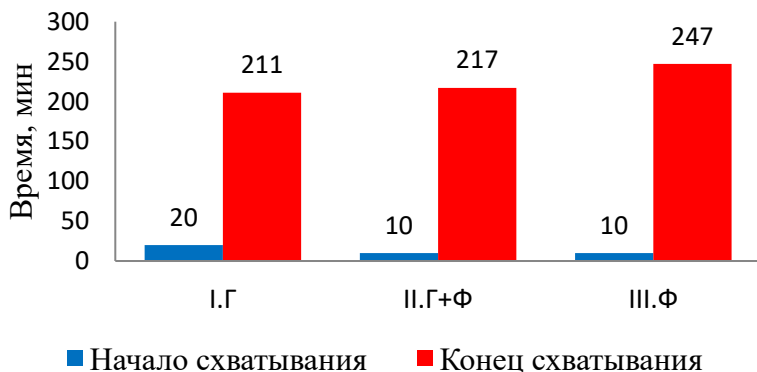


Рис.1 Влияние фосfogипса на сроки схватывания цементного теста

Результаты определения сроков схватывания цементного теста (в малых образцах) показали (рис.1), что при частичной (II.Г+Ф) и полной (III.Ф) замене природного гипса на фосfogипс время начала схватывания сокращается, а время конца схватывания увеличивается по сравнению с рядовым цементом (I.Г).

На следующем этапе работы было проведено исследование влияния фосfogипса на прочностные характеристики цемента (в малых образцах).

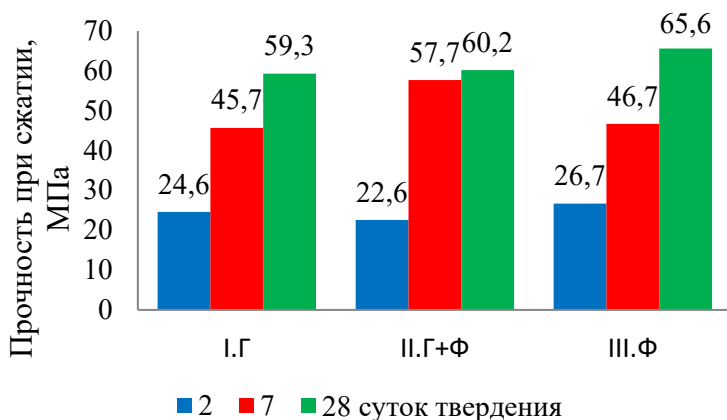


Рис.2 Влияние фосfogипса на прочность цемента

По результатам исследований видно (рис. 2), что использование

фосфогипс приводит к увеличению прочностных показателей цемента в 28-ми суточном возрасте твердения. Наилучшие результаты показал цемент при полной замене природного гипса на фосфогипс (Ш.Ф), его прочностные характеристики во все сутки твердения выше, чем у цемента с природным гипсом (И.Г).

Таким образом, в результате проведенных исследований была установлена возможность использования фосфогипса в качестве добавки при производстве цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский В.И. Замена природного гипсового камня техногенными отходами при производстве цемента / В.И. Лобачевский, А.Г. Губская, П.И. Письменский // Цемент и его применение. – 2022. – №3. – С. 61-64.
2. Агеева М.С. К вопросу использования промышленных отходов в производстве вяжущих веществ / М.С. Агеева, С.М. Шаповалов, А.Н. Боцман, А.В. Ищенко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №9 – С. 58-62.
3. Русина В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учеб. пособие / В.В. Русина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 224 с.
4. Алфимова Н.И. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – №11. – С. 8-23.

УДК 666.94

Кузнецов Д.В., Кривошеин Д.В., Алексеев В.Ю.
*Научный руководитель: Долгова Е.П., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА

Одним из эффективных направлений энерго- и ресурсосбережения в цементном производстве является использование металлургических шлаков как замены части клинкера при помоле цемента или в качестве исходного сырьевого компонента шихты [1, 2].

В данной работе исследована пригодность доменного шлака следующего состава (Табл.1) для применения в качестве сырьевого компонента.

Таблица 1 – Химическая характеристика сырьевых компонентов, %

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП	Сумма
Мел	3,98	1,22	0,52	51,5	0,91	0,31	0,08	41,4	100
Глина	58,76	12,89	5,07	6,69	1,98	0,19	3,12	11,3	100
Огарки	3,92	1,58	79,31	13,02	2,17	-	-	-	100
Доменный шлак	39,11	9,34	1,49	41,62	3,82	1,56	1,65	1,43	100

Как видно, содержание CaO, SiO₂ и Al₂O₃ в нем значительно, что позволяет заменить шлаком часть природных сырьевых компонентов, а именно глины и мела.

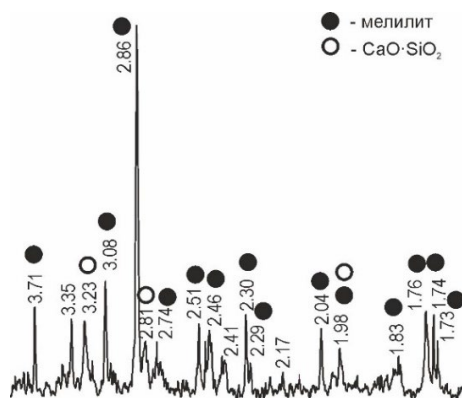


Рис.1. Фазовый состав доменного шлака

Однако доменный шлак, являясь техногенным материалом, имеет фазовый состав весьма отличный от традиционного природного сырья (Рис. 1). Так, основными фазами рассматриваемого шлака являются мелилит – твердый раствор геленита C₂AS и окерманита C₂MS₂, а также псевдоволластонит CS. В связи с этим возникла необходимость оценить особенности процессов минералообразования при синтезе клинкера из шлакосодержащих сырьевых смесей.

Из мела, глины, огарок и доменного шлака были приготовлены четыре сырьевые смеси с КН=0,92, n = 2,3–2,39, p = 1,35–1,37 (Табл. 2). При этом снижение доли природных компонентов составило в относительных процентах: для глины – до 100%, для мела – около 19%.

Таблица 2 – Компонентный состав сырьевых смесей, %

Сырьевая смесь	Мел	Глина	Огарки	Доменный шлак
№1	80,25	18,29	1,45	-
№2	75,12	12,05	1,84	11
№3	69,35	5,43	2,22	23
№4	65,02	-	2,53	33

Для исследования процесса алитообразования приготовленные смеси были обожжены до температур 1250, 1350, 1450°С.

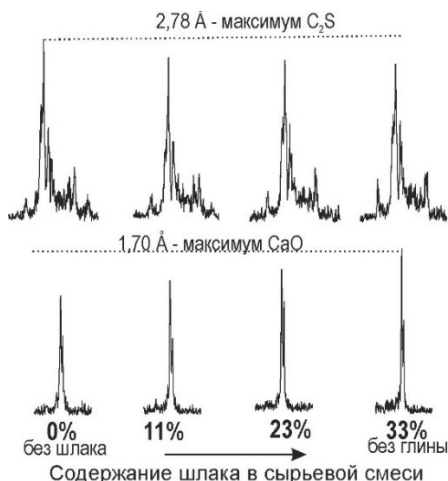


Рис.2. Фрагменты рентгенограмм спёков смесей, обожжённых при 1250°С

Рентгенофазовый анализ спёков сырьевых смесей, обожжённых при 1250°С (Рис. 2), свидетельствует, что при увеличении доли доменного шлака несколько замедляется синтез двухкальциевого силиката. Действительно, дифракционный максимум 2,78 Å, характерный для C_2S , в шлакосодержащих смесях имеет меньшую интенсивность, а отражение 1,70 Å, принадлежащее CaO , напротив – большую.

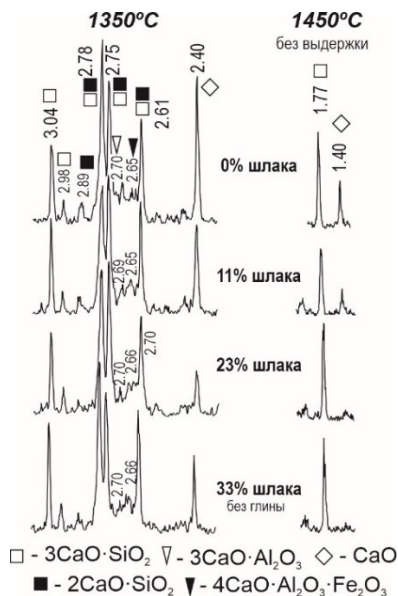


Рис.3. Особенности алитообразования в шлакосодержащих смесях

Однако, при нагревании до 1350°C отражения оксида кальция в смесях со шлаком менее выражены, чем в традиционной смеси без шлака (Рис.3, 0% шлака), а к 1450°C минимальны. Основной клинкерный минерал, алит, идентифицируется во всех спексах в преобладающих количествах. Это подтверждает возможность применения шлака в качестве сырьевого компонента без снижения качества клинкера.

Таким образом, исследуемый доменный шлак, содержащий 41,62% CaO, 39,11% SiO₂, 9,34% Al₂O₃ и 3,82% MgO в виде мелилита и псевдоволластонита, является ценным техногенным сырьем, пригодным для синтеза качественного клинкера. Однако целесообразность использования шлака в качестве сырьевого компонента определяется технико-экономическими показателями производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В.К. Техногенные материалы в производстве цемента // В.К. Классен, И.Н. Борисов, В.Е. Мануйлов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. –125 с.
2. Текучева Е.В. Эффективность замены железосодержащего компонента сырьевой смеси шлаком ОЭМК // Е.В. Текучева, В.П. Кудрявцев, В.К. Классен / Техника и технология силикатов. – 2010. – №2. – 22-26 с.
3. Классен В.К. Техногенные материалы в производстве цемента // В.К. Классен, И.Н. Борисов, В.Е. Мануйлов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. –125 с.

УДК 666.1.001.5

Лазарова Ю.С.

Научный руководитель: Онищук В.И. канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ ДЛЯ ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА

Высокомодульные стеклянные волокна отличаются от других видов стеклянных волокон повышенным значением модуля упругости, который также называют модулем Юнга. Эта характеристика определяет сопротивление материала растяжению или сжатию при упругой деформации, или же свойство объекта деформироваться вдоль оси при воздействии силы вдоль этой оси. Высокие значения модуля упругости таких волокон позволяют использовать их в качестве арматуры в высоконагруженных композиционных конструкциях, а высокие химическая и коррозионная стойкость, а также биологическая инертность позволяют успешно конкурировать с традиционной стальной арматурой.

В России к высокомодульным волокнам относятся следующие типы:

- волокно Е: с модулем упругости от 60 до 72,5 ГПа.
- ВМП (S): с модулем упругости от 80 до 95 ГПа.
- углеродное волокно: с модулем упругости от 647 до 903 ГПа, являясь абсолютным лидером по прочности.
- базальтовое волокно: с модулем упругости от 79 до 93 ГПа.

Наиболее востребованным и доступным армирующим материалом для высоконагруженных конструкций из перечисленных материалов являются стекловолокна марки ВМП (высокомодульные высокопрочные). Зарубежный аналог ВМП S-стекло было разработано для создания высокопрочных волокон с повышенным модулем упругости, которые сохраняют свою прочность при высоких температурах лучше, чем Е-стекло. Это стекло изготавливается в системах $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ и $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$, а иногда эти составы легируются добавками BeO_2 , TiO_2 и ZrO_2 [1].

В таблице 1 представлен диапазон содержания оксидов в высокомодульных составах S-стекла для ВМП стекловолокна.

Таблица 1 Примерные химические составы стекол ВМП, масс. %.

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	Fe_2O_3
60-65	23-25	0-9	6-11	0-0,1	0,01

Прочностные характеристики стекла, включая модуль упругости, тесно связаны с его химическим составом и особенностями строения стекол. Основным структурным элементом силикатных стекол является тетраэдр $[\text{SiO}_4]^{4-}$, где атомы кислорода соединяют вершины тетраэдров, формируя непрерывную сетку. Благодаря высокому заряду (+4) и небольшому (0,039 нм) ионному радиусу, катион кремния (Si^{4+}) обладает высокой плотностью заряда и эффективно поляризует анионы кислорода, образуя прочную ионно-ковалентную связь Si-O (443 кДж/моль), что, в итоге, определяет прочность структурной сетки стекла.

Введение в состав стекла щелочных оксидов, таких как Na_2O , вносит изменения в его структуру. Низкая (+1) валентность и, относительно большой (0,098 нм) ионный радиус не позволяют щелочным металлам образовывать направленные ковалентные связи с кислородом. Вместо этого катионы щелочных металлов разрывают связи Si-O-Si в кремнекислородной сетке, формируя два "немостиковых" атома кислорода, с одним из которых образуется ионная связь с энергией 84 кДж/моль. Это снижает общую связность сетки и уменьшает прочность стекла.

В отличие от щелочных оксидов, введение щелочноземельных оксидов, таких как MgO , может увеличить степень связности стекла и приводить к формированию более жесткой и плотной структуры. Хотя щелочноземельные металлы также разрывают связи Si-O-Si, их более высокий (+2) заряд и меньший (0,074 нм для Mg^{2+}) ионный радиус обеспечивают более сильное взаимодействие с анионами кислорода,

что позволяет им эффективно выступать в роли «мостиков», соединяющих тетраэдры и формирующих более прочную структуру стекла.

Оксид алюминия (Al_2O_3), занимая промежуточное положение по способности образовывать сетку стекла, при добавлении в щелочное стекло может образовывать тетраэдры $[\text{AlO}_4]^-$, которые изоморфно замещают тетраэдры $[\text{SiO}_4]^{4-}$ в кремнекислородной сетке, «сшивая» разорванные связи Si-O. Энергия связи Al-O (423-331 кДж/моль) в тетраэдрическом положении (КЧ=4) лишь незначительно ниже энергии связи Si-O. При этом, источником кислорода для образования $[\text{AlO}_4]^-$ могут выступать щелочноземельные оксиды, что дополнительно делает структуру стекла более прочной.

Известно [2, 3], что упругая деформация в стеклах протекает за счет взаимного поворота тетраэдров. Высокое значение модуля упругости в магнезиальносиликатных стеклах обусловлено тем, что катион-модификатор (Mg^{2+}) взаимодействует с отрицательно заряженными тетраэдрами $[\text{SiO}_4]^{4-}$ и $[\text{AlO}_4]^-$, связывая их и уплотняя структуру стекла, что затрудняет взаимный поворот и перемещение тетраэдров.

Если вероятность существования определенных группировок давно сформулирована теоретически и доказана экспериментально, то для высокожелезистых стекол такой однозначной трактовки нет, хотя существует значительное число публикаций [4-7], свидетельствующих о существовании в структуре стекла железа как в двухвалентной (Fe^{2+}), так и в трехвалентной (Fe^{3+}) форме. При этом, устанавливающийся в расплаве стекла окислительно-восстановительный баланс и ряд других условий, определяет преобладание одной или другой формы, что весьма важно, если в качестве сырьевых материалов для производства ВМП-волокон предлагается использование отходов техногенного происхождения – зол-уноса Рэфтинской ГРЭС [8], которые содержат значительное (до 5,5 мас.%) содержание оксидов железа (таблица 2).

Таблица 2 Химический состав используемой золы-уноса Рэфтинской ГРЭС, мас. %.

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	SO_3
49,1	1,1	38,3	5,5	0,9	2,8	0,1	0,7	0,9

Железо, как элемент с достраивающейся 3d-оболочкой, характеризуется переменной валентностью. В стеклах железо присутствует преимущественно в двух валентных состояниях: FeO (Fe^{2+}) и Fe_2O_3 (Fe^{3+}). Изменение степени окисления влияет на ионный

радиус железа, его координационное число и другие кристаллохимические характеристики.

Ион Fe^{2+} , имеющий больший ионный радиус (около 0,078 нм), в кислородных минералах обычно занимает октаэдрические позиции, демонстрируя изоморфное замещение Mg^{2+} . Ион Fe^{3+} , напротив, может находиться как в тетраэдрической (КЧ=4), так и в октаэдрической (КЧ=6) координации. В первом случае ионный радиус иона Fe^{3+} составляет 0,049 нм и в кислородных минералах занимает тетраэдрическое положение, проявляя изовалентный изоморфизм с ионами Al^{3+} [9].

Согласно электростатической теории, описывающей химическую связь в стеклах, каждый катион окружен анионным полиэдром, где расстояние между катионом и анионами определяется суммой их ионных радиусов, а координационное число (КЧ) - соотношением этих радиусов. Для тетраэдрической координации (КЧ=4) предел устойчивости, определяемый отношением радиуса катиона к радиусу аниона, составляет 0,225-0,414. Оценка этого отношения для Fe^{3+} (КЧ=4, $r=0,049$ нм) дает значение 0,36, что находится в пределах устойчивости (аналогично Al^{3+} , для которого это отношение составляет 0,39). Эти кристаллохимические параметры, а также энергетические факторы, в целом не противоречат возможности участия Fe^{3+} в построении структуры стекла в тетраэдрической координации (таблица 3).

Таблица 3 Кристаллохимические и энергетические характеристик ионов, содержащихся в составе проектируемых стекол.

Ион	Заряд иона	Радиус иона, нм	КЧ	Напряженность поля (по Дитцелю)	Ионный потенциал, нм ⁻¹	Энергия связи Ме-О, кДж/моль	Электроотрицательность
Si	4+	0,039	4	1,56	100	443	1,9
Al	3+	0,053	4	0,97	53	331-423	1,6
	3+	0,067	6	0,84	45	224-284	1,6
Fe	3+	0,049	4	0,92	61	301	1,8
	3+	0,063	6	0,73	48	200	1,8
	2+	0,078	6	0,45	26	154	1,8
Mg	2+	0,074	4	0,51	27	155	1,3
			6	0,45			
Ca	2+	0,104	6, 8	0,35	10	134	0,9
Na	1+	0,098	6, 8	0,19	19	84	1,0

Переход железа из двухвалентного (Fe^{2+}) в трехвалентное (Fe^{3+}) состояние в стеклах в значительной степени определяется окислительно-восстановительным потенциалом шихты, составом газовой атмосферы в печи и наличием окислителей в составе шихты. Повышение основности стекла приводит к уменьшению координационного числа катиона железа, что аналогично и для катиона алюминия. Возможность подобного перехода для железа в щелочных алюмосиликатных стеклах следует рассматривать как результат конкуренции за доступный кислород, подобно механизму, лежащему в основе «алюмоборного эффекта» [10].

Хотя ионный радиус Fe^{3+} в тетраэдрической координации несколько меньше (0,049 нм), чем у Al^{3+} (0,053 нм), что может определять конкурентное преимущество железа перед алюминием, но, учитывая неопределенность в кристаллохимических характеристиках для Fe^{3+} в тетраэдрической координации, целесообразно рассматривать общепринятые характеристики Fe^{3+} для КЧ=6 (0,065 нм), что смещает баланс в пользу Al^{3+} .

Для формирования стекла, содержащего как минимум три стеклообразующих оксида (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), необходимо введение достаточного количества катионов-модификаторов, способных обеспечить трансформацию двух промежуточных оксидов в категорию стеклообразующих. Эти катионы не просто компенсируют заряд отдельных тетраэдров, а формируют группы атомов типа $[(\text{AlO}_4)^-\text{Me}^+]^0$, в которых катион-модификатор (Me^+) не связан с каким-либо определенным атомом кислорода, а локализован вблизи тетраэдра. Аналогичные группировки образуются в щелочноборосиликатных стеклах, где структура состоит из чередующихся (BO_3) -треугольников и $[(\text{BO}_4)^-\text{Me}^+]^0$ -группировок [10]. Вероятно, образование прочных связей Si-O, Al-O, Fe-O снижают подвижность структурных элементов стекла, обеспечивая более плотную упаковку атомов, что определит высокий модуль упругости и низкую кристаллизационную способность проектируемых железосодержащих ВМП стекол.

Для проверки этой гипотезы были разработаны две серии стекол: щелочные (ЩС-1, ЩС-2, ЩС-3) и бесщелочные (БЩС-1, БЩС-2, БЩС-3), в которых варьируется содержание Fe_2O_3 и Al_2O_3 (Таблица 4).

Таблица 4 Расчетные составы стекол, масс. %.

Наименование состава стекла		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	TiO_2
ЩС-1		55,0	25,0	1,0	0,5	11,5	7,0	0,2

	ЩС-2	54,0	23,0	3,0	1,5	11,0	7,0	0,6
	ЩС-3	53,0	20,0	6,5	1,5	11,0	8,0	0,6
Бесщелочное	БЩС-1	61,0	25,0	1,0	0,5	11,0	0,1	0,2
	БЩС-2	60,0	23,0	3,0	1,5	11,0	0,3	0,6
	БЩС-3	61,0	20,0	6,5	1,5	11,0	0,4	0,6

Содержание основных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO) в бесщелочной серии стекол соответствует типичным составам ВМП стекол (S). В щелочной серии содержание SiO_2 несколько снижено (53-55 масс. %) по сравнению с ВМП стеклами (60-65 масс. %), что обусловлено введением до 8 масс. % Na_2O при сохранении содержания Al_2O_3 и MgO на уровне, характерном для ВМП стекол. Максимальное содержание Fe_2O_3 ограничено 6,5 масс. %, исходя из его концентрации в используемой золе. Зола также является источником CaO и TiO_2 , что объясняет их присутствие в разработанных составах. Соотношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} < 1$ в щелочной серии, что, согласно исследованию [11], благоприятствует нахождению железа в тетраэдрической координации.

В обеих сериях стекол (щелочных и бесщелочных) увеличение содержания Fe_2O_3 приводит к уменьшению содержания Al_2O_3 , что отражает частичную замену одного стеклообразующего оксида другим и, возможно способствует переходу Fe_2O_3 в тетраэдрическую координацию ($\text{KЧ}=4$). Принимая во внимание общую склонность к кристаллизации стекол, содержащих оксиды переходных металлов, включая железо, окисление железа до Fe_2O_3 и реализация его в качестве стеклообразователя может подавить кристаллизационную способность разработанных составов, что станет ключевым фактором, определяющим их практическую применимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Браутман Л. Современные композиционные материалы. / Л. Браутман, Р. Крока. – Москва: Изд-во «Мир», 1970.-360 с.
- 2 Асланова М.С. Стекланные волокна/М.С. Асланова, Ю.И. Колесов, В.Е. Хазанов, М.Д. Ходаковский, В.Е. Шейко;Химия, 1979. - 256 с.

3 Пух В.П. Атомная структура и прочность неорганических стекол / В.П. Пух, Л.Г. Байкова, М.Ф. Кириенко и др. // Физика твердого тела.- 2005.- Т.47.- № 5.- С. 850-855.

4 Конон М.Ю. Фазовое разделение и физико-химические свойства стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ [Текст]: дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. В.Г. Гребенщикова.- Санкт-Петербург. 2016.- 139 с.

5 Михайлов В.И. Получение и физико-химические свойства материалов на основе нанодисперсных оксидов алюминия и железа (III) [Текст]: дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.- Сыктывкар. 2016.- 129 с.

6 Воловецкий М.В. Валентное и структурное состояние атомов железа в стеклах ударного и вулканического происхождения [Текст]: автореф. дис. на соискание учен. степени кандидата химич. наук / Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.- Москва, 2010.- 25 с.

7 Harizanova, R. Crystallization and Microstructure of Glasses in the System $\text{Na}_2\text{O}/\text{MnO}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ / R. Harizanova, G. Völksch, Ch. Rüssel // Mater. Res. Bull. – 2011. – Vol. 46. – P. 81–86.

8 Онищук В.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна / В.И. Онищук, Ю.С. Лазарова, Е.И. Евтушенко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.- 2021.-№ 5.- С.71-81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81.

9 Геохимия элементов: группа железа [Электронный ресурс] URL: <http://www1.geol.msu.ru> (Дата обращения 14.5.25)

10 Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов / Н.М. Павлушкин. М.: Стройиздат, 1983. - 432 с.

11 Борисов Н.В. Комплексообразование железа с участием ионов O^{2-} в расплавах и стеклах системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ / Н.В. Борисов, А.В. Васильев, В.Г. Конаков// Вестник СПбГУ.- 2005.-№ 1.- С. 47-54.

Линец В.В., Лазарова Ю.С.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕЛЁНОГО СТЕКЛА МАРКИ ЗТ-1 С КОМБИНАЦИОННЫМ ОКРАШИВАНИЕМ

Окрашенные стекла с древних времен используются для производства стеклянной тары и плоского светотехнического стекла и стекла для строительства, где важны как эстетические, так и функциональные свойства материала.

В производстве стеклянной тары зеленые стекла используются для выработки узкогорлой стеклянной тары для напитков, которые теряют свое качество при длительном воздействии света [1].

В ГОСТ 34382–2017 Упаковка стеклянная. Стекло. Марки стекла химические составы представлены двумя марками – ЗТ-1 и ЗТ-2 [2], при этом марка ЗТ-1 предусматривает комбинационное окрашивание оксидами железа и хрома, причем в качестве комплексного красителя используют феррохромовые шлаки.

Стекло марки ЗТ-2 окрашивается только оксидами железа (III), который вводится в состав, стекла от 1.2 и до 2 масс. % посредством либо крокуса, либо использованием кварцевых песков низкого качества, что не всегда рационально с точки зрения технологических процессов.

Обеспечить расширение возможности получения более широкого диапазона насыщенности зеленого цвета можно путем применения отсевов обогащения кварцевых песков, в частности песков Междуреченского месторождения, содержащих в своем составе оксиды железа. Таким образом, при необходимости получения стекол более светлых оттенков предполагается использовать пески указанного месторождения, которые подвергались просеву с удалением железосодержащих фракций. В случае необходимости получать более насыщенные тона зеленого цвета, в шихты нужно будет вводить расчетные количества отсева. Поэтому в данной работе представлены результаты определения цветовых характеристик стекла марки ЗТ-1 при различном содержании отсева в рецептах стекольных шихт.

Для проведения исследований использовался базовый состав стекла марки ЗТ-1 (Табл. 1) [2], для которого был произведен расчет

рецепта стекольной шихты. В шихту базового состава с определенным шагом добавлялись отсе́вы кварцевого песка, таким образом концентрация оксида железа (III) в стекле увеличивалась.

Таблица 1 – Химический состав зеленого стекла марки ЗТ-1

Оксиды	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cr ₂ O ₃
Масс. %	71	10	8	4	3	3	0.5	0.3	0.2

Всего было получено 5 экспериментальных рецептов шихты, из которых было синтезировано 5 образцов стекол. Варка стекол производилась в электрической стекловаренной печи с карбидкремниевыми нагревателями сопротивления в корундовых тиглях вместимостью 200 мл, с выдержкой для дегазации расплава в течение 60 мин при температуре 1500°C. Далее расплав формовали отливкой в металлические формы. Отжиг производился при начальной температуре 580°C. Полученные пластины стекла после отжига подвергалась резке с получением образцов с размерами 3×1×0.2 см и последующей шлифовке и полировке.

Анализ спектрального пропускания стекла с различной концентрацией красителей был проведен путем спектрофотометрического анализа. Как видно из рис. 1 интегральное светопропускание спектров пропускания стекол падает с увеличением в их составе концентрации содержания отсе́вов; в диапазоне 520–560 нм для зеленой тары оно составило, соответственно 84%, 69%, 53%, 38%, а для коричневой тары в диапазоне 540–560 нм составило 29% что соответствует ГОСТ 34382–2017.

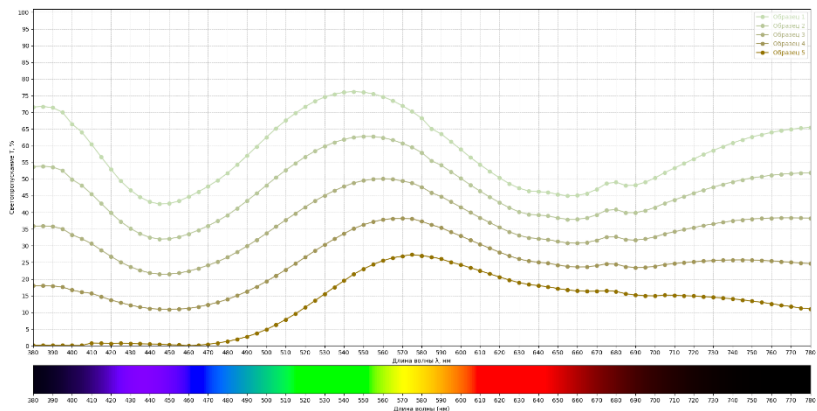


Рис. 1 Спектральное пропускание экспериментальных образцов стекол

Характерные пики поглощения Cr^{3+} в стекле (Образцы 1, 2, 3, 4) при 450 и 650 нм хорошо видны для зеленого стекла. Янтарное стекло (Образец 5) демонстрирует сильное поглощение янтарного хромофора при 420 нм, а также характерный большой пик поглощения Fe^{2+} (железо в восстановленной форме) с центром при 1050 нм (по справочным данным), что соответствует пологому снижению спектрального светопропускания после 650 нм с увеличением концентрации железа в стекле. Оливково-зеленое стекло (Образцы 3 и 4) - восстановленное стекло, содержащее как янтарный хромофор, так и Cr^{3+} , - демонстрирует комбинацию их спектральных признаков [3].

Был произведен расчет координат X , Y , Z в цветовом пространстве XYZ (Табл. 2)

Таблица 2 – Координаты X , Y , Z в цветовом пространстве XYZ

№ Образца	Координата X	Координата Y	Координата Z
Образец 1	56.2075	66.0508	51.0960
Образец 2	46.5722	54.0485	38.5527
Образец 3	36.9369	42.0464	26.0094
Образец 4	27.3017	30.0438	13.4661
Образец 5	17.6664	18.0415	0.9228

Для использования диаграммы цветности CIE 1931 необходимо преобразовать координаты пространства XYZ в координаты цветности x и y (Табл. 3).

Таблица 3 – Координаты цветности x и y

№ Образца	Координата x	Координата y
Образец 1	0.3242	0.3810
Образец 2	0.3346	0.3884
Образец 3	0.3518	0.4005
Образец 4	0.3856	0.4243
Образец 5	0.4823	0.4925

Использование диаграммы цветности СИЕ 1931 [4] (Рис. 2) позволяет преобразовать спектральное распределение пропускания стекла в воспринимаемый человеком цвет, что достигается посредством интеграции по чувствительности зрительной системы, характеризуемой тремя фотопигментными каналами. Такой подход способствует оценке эстетических свойств материала и позволяет визуализировать и анализировать соответствие характеристик стекла заданным техническим требованиям.

Наблюдаемые смещения координат на диаграмме цветности СИЕ 1931 при изменении состава стекла связаны с присутствием в стекле ионов Fe^{2+} , Fe^{3+} и Cr^{3+} , которые за счёт специфических переходов поглощают свет в различных спектральных диапазонах и формируют итоговый цвет стекла.

Для Fe^{2+} характерен выраженный вклад зарядопереносного перехода « $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ » с максимумом поглощения около 210 нм, а также дополнительная, менее интенсивная полоса в области ближнего ИК-диапазона (1000...1100 нм), которая обусловлена d-d переходом в октаэдрической координации.

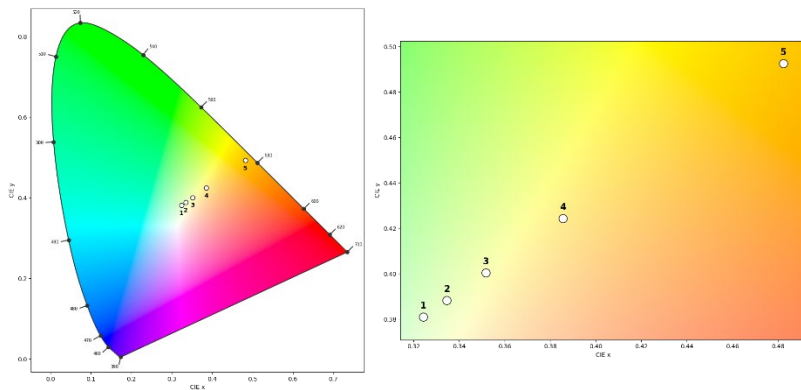


Рис. 2 Диаграмма цветности СИЕ 1931 и расположение на ней цветовых координат экспериментальных составов стекол

Ионы Fe^{3+} придают стеклу жёлто-коричневые оттенки главным образом за счёт двух важных полос поглощения, связанных с зарядопереносными переходами « $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ » в УФ-области (примерно 220 нм и 290 нм). Кроме того, в видимом диапазоне могут наблюдаться слабые d-d переходы (например, около 380–400 нм), что при определённых концентрациях усиливает либо жёлтый, либо коричневый оттенок [5].

Ионы Cr^{3+} обычно ответственны за появление зелёной или зеленовато-голубой окраски стекла. Основные d-d переходы для октаэдрически координированного Cr^{3+} лежат в видимой области, формируя полосы поглощения в диапазоне примерно 440–460 нм и 600–650 нм. При увеличении концентрации Cr^{3+} эти полосы становятся более выраженными, сдвигая координаты цветности в сторону «холодных» зелёных или более тёплых желтовато-зелёных оттенков в зависимости от соотношения с остальными ионами [6].

Анализ по диаграмме цветности CIE 1931 в совокупности с данными о спектральных полосах поглощения Fe^{2+} , Fe^{3+} и Cr^{3+} даёт возможность понять влияние отсеков кварцевого песка Междуреченского месторождения на цвет стекла.

Для представления цвета полученных образцов был произведен расчет координат R, G, B в цветовой модели sRGB (Табл. 4)

Таблица 4 – Координаты R , G , B в цветовой модели sRGB

№ Образца	Координата R	Координата G	Координата B
Образец 1	195	219	176
Образец 2	185	200	154
Образец 3	173	177	126
Образец 4	160	149	87
Образец 5	146	113	0

Удобство представления полученного цвета 5 различных образцов представлено ниже (Рис. 3).



Рис. 3 Цвет полученных образцов

В результате проведённого исследования достоверно установлено, что варьирование содержания отсеков кварцевого песка Междуреченского месторождения в составе стекольной шихты для стекла марки ЗТ-1 сопровождается изменением его цветовых

характеристик от светло-зелёного к оливковому и янтарному за счет действия комбинационного окрашивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Онищук В. И., Жерновая Н. Ф., Минько Н. И. Контроль производства и качества листового стекла и стеклоизделий. – 2005.
2. ГОСТ 34382–2017. Упаковка стеклянная. Стекло. Марки стекла. – Москва: Изд-во Стандартиформ, 2018. – 18 с.
3. W.A. Weyl Coloured Glasses / W.A. Weyl – 1-е изд. – Sheffield: Society of Glass Technology, 2023 – 558 с.
4. Горбунова Е. В., Чертов А. Н. Колориметрия источников излучения. – 2015.
5. R.J.D. Tilley Colour and the Optical Properties of Materials / R.J.D. Tilley – 1-е изд. – Hoboken: Wiley, 2011 – 510 с.
6. D. Möncke, M. Papageorgiou, A. Winterstein-Beckmann, N. Zacharias Roman glasses coloured by dissolved transition metal ions: Redox-reactions, optical spectroscopy and ligand field theory / D. Möncke, M. Papageorgiou, A. Winterstein-Beckmann, N. Zacharias // J. Archaeol. Sci. – 2014. – № 46. – С. 23–36.

УДК 66.041.491:004.942

Лопарев А.С., Вакуленко Д.А., Исаева А.С.

Научный руководитель: Мишин Д.А., канд. техн. наук, доц.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ПОЗОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО НОВОМУ СПОСОБУ

Одним из аналитических способов, позволяющий оптимизировать и интенсифицировать процесс обжига цементного клинкера во вращающихся печах, является расчет теплового баланса печной системы. Математическое моделирование предоставляет значительные преимущества по сравнению с исследованием реальных объектов или их физических аналогов. Данный подход позволяет существенно увеличить объем получаемых данных, изучать любые возможные режимы работы, включая те, которые не встречаются в реальной практике, а также анализировать гипотетические объекты. Особую эффективность демонстрирует комбинированное использование математического моделирования и натурных экспериментов [1].

На кафедре ТЦКМ Белгородского государственного

технологического университета им. В.Г. Шухова к.т.н., доц. Д.А. Мишиным был предложен способ обжига портландцементного клинкера с раздельным питанием печи по мокрому способу производства портландцемента, суть которого заключается в одновременном питании печи шламом и сухой сырьевой мукой [2].

Для печей мокрого, сухого и комбинированного способов рассчитаны и определены температуры газовых потоков на границах технологических зон. Для нового способа таких расчетов не сделано.

Таким образом, целью данной работы является расчет позонного теплового баланса печи, работающей по новому способу.

Характеристика исходного оборудования и компонентов и методика проведения работы. Для расчета использовалась печь по мокрому способу обжига клинкера (табл. 1) типоразмером 4×119 м.

Таблица 1 – Характеристика работы печи

Коэфф. избытка воздуха	Теплота сгорания, ккал/кг	Температура вторичного воздуха, °С	Расход топлива на обжиг, кут/кг кл	Производительность, т кл/ч
1,25	6385	211	215	29

За основу расчета использовался метод, описанный Х.С. Воробьевым и Д.Я. Мазуровым в работе [3]. В известной методике расчета не учтены тепловые эффекты испарения оксидов Na, K и пылевозврата. Эти статьи баланса были учтены в предложенном расчете.

Были составлены тепловые балансы по каждому методу и произведен расчет отходящих газов по отдельным технологическим зонам печи. Влажность сырьевого шлама в расчете – 35,10%.

Результаты и их обсуждение. Для сравнения в таблице 2 представлены результаты расчетов: I – баланс по работе [3] печи мокрого способа производства; II – добавлены в расчет материальные потоки пылевозврата и безвозвратного пылеуноса; III – в расчеты II методики добавлены материальные потоки циркуляции Na_2O и K_2O ; IV – расчет для печи, работающей по новому способу.

Таблица 2 – Температура газового потока на выходе из данной зоны, °С

Технологическая зона	Метод составления структуры теплового баланса			
	I	II	III	IV
Охлаждения	-	305	305	305
Спекания	1711	1706	1692	1669
Экзотермических реакций	1747	1727	1709	1713
Декарбонизации	1302	1301	1281	991
Подогрева	842	759	759	343
Испарения	351	278	278	254

При структуре теплового баланса, представленном в методе I на выходе из зоны экзотермических реакций наблюдается самая высокая температура из представленных методов – 1747°С. В методе II данная температура на 20°С меньше. Это связано с изменением структуры во II методе, где в статьях прихода и расхода тепла учитывались материальные потоки с определенным теплосодержанием, поступающие и выходящие из зоны, а не тепло, необходимое для нагрева материала, как в методе I. Дальнейшие расхождения между данными методами наблюдались в зонах подогрева и испарения – 842°С и 351°С в методе I, 759°С и 278°С в методе II соответственно. При структуре метода I температура газового потока в представленных двух зонах выше, чем при структуре метода II не только из-за разных статей прихода и расхода, о чем говорилось выше, но и из-за различающихся алгоритмов подсчета тепла, необходимого для удаления физической влаги из сырья. К примеру, для полного удаления физической влаги из сырья по методу I потребовалось 446,85 ккал/кг кл тепла, а по методу II – 491,83 ккал/кг кл. Также в методике II в статьях учитывалась пыль, уносимая газовым потоком из зоны подогрева и пыль, возвращаемая в печь в эту же зону.

В методике III в позонный тепловой баланс были добавлены приходные и расходные статьи, соответствующие процессу циркуляции щелочных соединений во вращающейся печи. При наличии щелочных соединений в газовой фазе на выходе из зоны спекания температура газового потока снизилась с 1706°С до 1692°С, на выходе из зоны экзотермических реакций – с 1727°С до 1709°С, на выходе из зоны декарбонизации – с 1301°С до 1281°С. Причиной снижения температуры является эндотермический эффект испарения щелочей в зоне спекания. В зоне подогрева щелочные соединения конденсируются, возвращая потраченное ранее тепло, поэтому на

выходе из зон подогрева и испарения температуры отходящих газов в расчетах по обем методикам равны. Исходя из составленного позонного теплового баланса, наличие циркуляции щелочных соединений в печном агрегате снижает температуру газового потока в среднем на 15–20°C.

В сравнении с методом III у новой методики IV меньше температура на выходе из зоны спекания – 1669°C против 1692°C в методе III.

Расчетные температуры газового потока на выходе из зон декарбонизации, подогрева и испарения в методе III и методе IV – 1281°C и 991°C, 759°C и 343°C, 278°C и 254°C соответственно. Представленные данные говорят о более эффективном обжиге по новому способу в сравнении с мокрым способом обжига клинкера.

Расчеты отходящих газов по методам I, II и III характеризуются одинаковым объемом отходящих газов на выходе из печи – 3,42 нм³/кг кл (табл. 3).

Таблица 3 – Объем отходящих газов на выходе из данной зоны, нм³/кг кл

Технологическая зона	Метод составления структуры теплового баланса			
	I	II	III	IV
Охлаждения	-	2,10	2,10	2,10
Спекания	2,12	2,12	2,12	1,29
Экзотермических реакций	2,12	2,12	2,12	1,29
Декарбонизации	2,37	2,37	2,38	1,55
Подогрева	2,63	2,63	2,63	1,61
Испарения	3,42	3,42	3,42	1,69

Расчет по методу IV характеризуется меньшим количеством отходящих газов в каждой технологической зоне, в том числе, и на выходе из печи – 1,69 нм³/кг кл в сравнении с остальными расчетами. Такая разница связана с меньшим расходом топлива, в результате чего выделяется меньше продуктов горения, а также с уменьшением содержания влаги, которую необходимо выпарить. Питание шламом по новому способу необходимо для регулирования температуры отходящих газов.

С повышением содержания сухой муки уменьшается температура отходящих газов (рис. 1). Так, при полном замещении шлама сухой мукой температура отходящих газов на выходе из печи будет составлять 249°C, при 90%-м замещении – 254°C. С увеличением замещения шлама

сухой мукой на каждый 10% температура газов на выходе из печи понижается на 2–3°C.

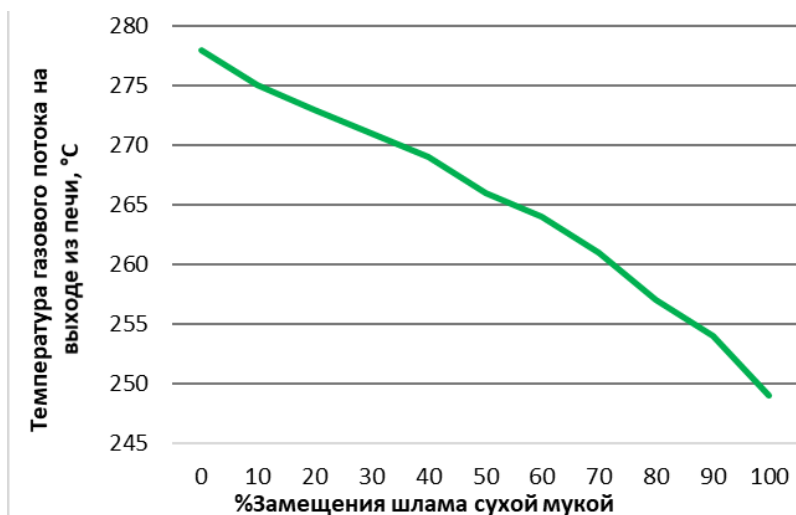


Рис. 1. График температуры газового потока на выходе из вращающейся печи в зависимости от процента замещения шлама сухой сырьевой мукой.

Выводы

1. Наличие циркуляции солей щелочных металлов понижает температуру газового потока в среднем на 15–20°C.
2. Обжиг клинкера по новому способу производства позволяет уменьшить температуру и объем отходящих газов, а также снизить расход топлива.
3. С увеличением замещения шлама сухой мукой на каждые 10% температура газов на выходе из печи понижается на 2–3°C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беседин П.В. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера. / П.В. Беседин, П.А. Трубаев; под общ. ред. П.В. Беседина. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова: БИЭИ, 2005. – 460 с.
2. Пат. 2783930 Российская Федерация, СПК С04В 7/44. Способ производства портландцементного клинкера / Мишин Д.А., Сысоев А.Н.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» - опубли. 22.11.2022, Бюл. № 33.

3. Воробьев Х.С., Мазуров Д.Я. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов / Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров. – М.: Высш. шк., 1962. – 352 с

УДК 666.94

Малютин Б.А.

Научный руководитель: Коновалов В.М., канд. техн. наук, доц.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ПРИ ПОМОЛЕ ЦЕМЕНТА

1. Введение. Современное строительство активно ищет инновационные подходы к созданию строительных материалов, объединяющих в себе высокую прочность, долговечность, и экологичность. Одним из наиболее многообещающих направлений является применение кальцинированных продуктов, таких как глина и техногенные отходы, в качестве активной минеральной добавки при изготовлении композиционных вяжущих веществ. Высокотемпературная обработка глины при обжиге наделяет её специфическими химическими и физическими свойствами, делая её ценным компонентом для цементных смесей. Целью данного исследования стало изучение воздействия обожженной глины на характеристики композиционного вяжущего и оценка ее потенциала в сравнении с другими материалами. Работа охватывает широкий спектр вопросов: от анализа свойств обожженной глины и методов ее изучения в составе вяжущих, до определения уникальных свойств полученных композиционных материалов [1]. Внедрение обожженной глины в строительные составы не только расширяет горизонты в строительной отрасли, но и способствует повышению экологической устойчивости, учитывая распространенность глины в строительной природе. Полученные в ходе публикации «Кальцинированная глина как компонент цемента и бетона» ученые Ш. Гросс, Х.В. Майер и П.Х. Хеерше [2] отмечают, что в последние десятилетия в цементной промышленности наблюдается ограниченное количество принципиально новых технологических прорывов. В этой связи производители все активнее работают над оптимизацией ключевых показателей

эффективности производства и устойчивого развития отрасли, таких как удельное потребление энергии (тепла и электроэнергии), выбросы вредных веществ и CO₂, а также рациональное использование природных ресурсов. Для этого применяются различные корректирующие меры в технологиях производства клинкера и цемента, в том числе использование альтернативного топлива и сырья (АТС) и добавление в цемент природных или техногенных минеральных добавок (МД). Для более широкого внедрения АТС и МД в процесс изготовления цемента и строительных материалов необходимы согласованные усилия представителей отрасли, потребителей, государственных органов и проектировщиков. Это позволит привести строительные нормы и целевые показатели эффективности в соответствие с передовыми международными стандартами и результатами научно-исследовательских работ. В частности, рассматривается вопрос о разработке добавок на основе кальцинированной глины для бетона и смешанных цементов. Отмечается, что производство таких добавок набирает обороты, поскольку доступность и качество традиционных техногенных МД, таких как молотый гранулированный доменный шлак (ГДШ) и зола-унос (продукт сжигания угля на ТЭС), часто ограничены.

В статье С.Е. Шульце и Й.Риверт [3] под названием «Свойства цементов с прокаленными глинами в качестве основного компонента» изучались пуццолановые свойства прокаленных глин с различным минеральным составом в сочетании с четырьмя видами портландцемента. Авторы пришли к выводу, что температура обжига глины существенно влияет на ее удельную поверхность и водопотребность пуццоланового цемента. Также было установлено, что глины с высоким содержанием Si и Al способствуют повышению прочности цемента. Для цемента с добавкой 20% прокаленной глины можно достигнуть класса прочности 52.5 Н, не прибегая к дополнительным оптимизациям. В случае цементов с 40% добавкой прокаленные глины возможно достижение класса прочности 42.5 Н.

2. Экспериментальная часть.

2.1. Характеристика используемых материалов. Целью исследования использования техногенного сырья как минеральной активной добавки в бездобавочный цемент является снижение расхода клинкерной составляющей. При этом заменяя некоторую часть клинкера на минеральную добавку, мы снижаем выбросы углекислого газа в атмосферу. В процессе исследования решались задачи по влиянию параметров термообработки породы различного состава на гидравлическую активность смесенных цементов, и определение

фазового состава новообразований, возникающих в процессе гидратации вяжущих композиций.

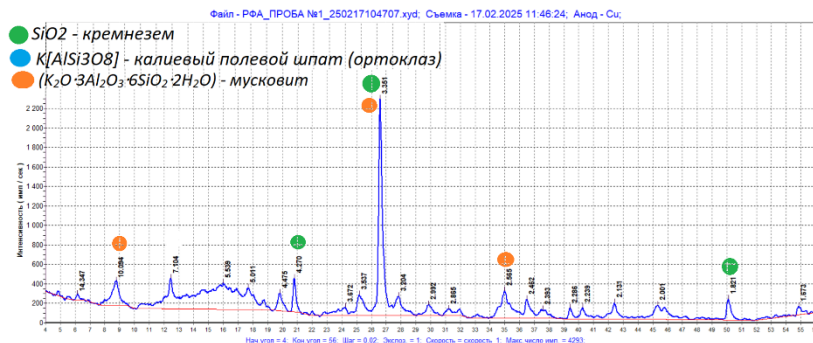
В качестве сырья, представляющего интерес как минеральная добавка были выбраны отвалы угольных шахт Свердловского района, Луганской области. Химический состав отобранных проб в четырех различных местах показал высокую сходимость химического состава, который приведен в таблице 1.

Таблица 1 Химический состав исследуемых пород

Порода, №	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	R ₂ O	ППП
№1	54,02	28,6	7,79	0,28	1,9	0,27	0,99	0	0
№2	53,7	28,2	8,4	0,6	2,11	0,39	0,87	0	0
№3	55,19	26,9	6,36	0,5	1,12	3,21	0,82	0	0
№4	52,85	24,1	8,05	2,23	1,86	4,86	0,80	0	0

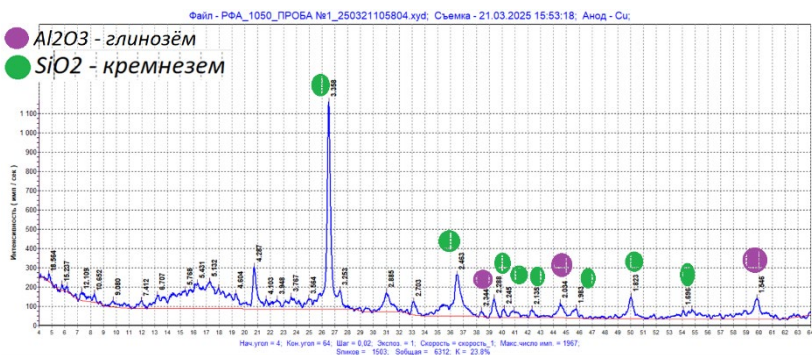
Наличие высокого содержания глинозема и кварца указывает на возможность использования данного сырья в качестве компонентов цементной сырьевой смеси и активной минеральной добавки при помеле цемента.

Фазовый состав исходной породы приведен на рисунке 1. Рентгенофазовым методом идентифицируются фазы кварца, мусковита, ортоклаза, и других полевых шпатов.



[illegible]

Фазовый состав продуктов разложения исследуемой породы при 1050 градусов приведен на рисунке 3.



Эндотермические пики в указанных температурных интервалах соответствуют разложению гидратных фаз в полевых шпатах, а при температуре 1050°C происходит разрушение кристаллической решетки мусковита, биотита и полевых шпатов, с образованием глинозёма, кварца, и лейцита. Последний представляет из себя минерал структуры

циалита, обладающий гидравлической активностью.

Исходная порода и продукты её обжига при 650°C, 850°C и 1050°C, измельчались в лабораторной мельнице, и до остатка на сите 008, и в качестве минеральной добавки в количестве 10%, 20% и 30% смешивались с бездобавочным цементами.

Физико-механические испытания цементов выполнялись на малых образцах кубиках 1,41x1,41 см изготовленных из цементного теста с В/Ц = 0,28. Фазовый состав определялся по результатам рентгено-фазового анализа, выполненного на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.

Результаты испытаний приведены на рисунках 4 и 5.

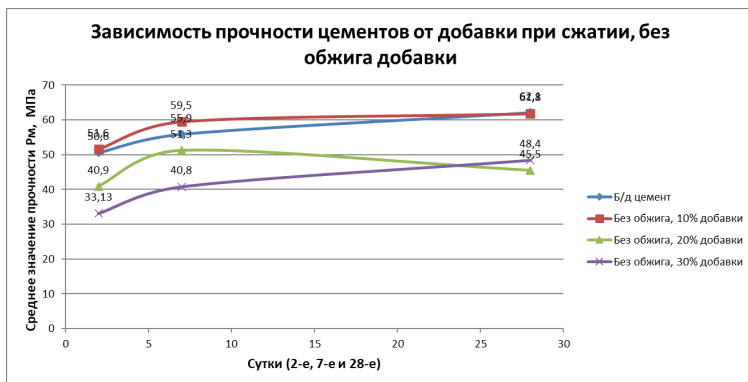


Рис. 4 График зависимости прочности цементов от добавки при сжатии, без обжига добавки, в возрасте на 2-е, 7-е и 28-е сутки

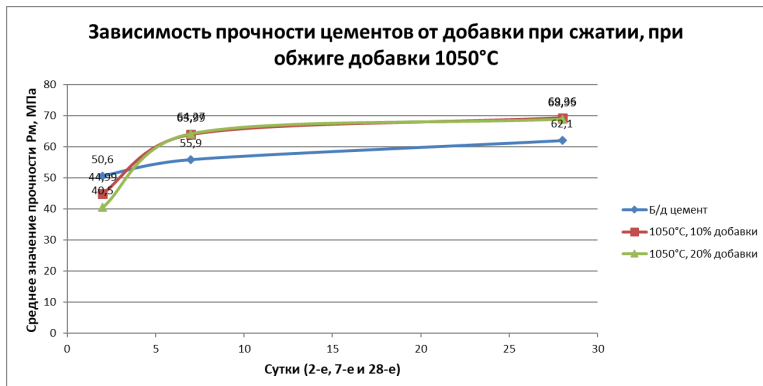


Рис. 5 График зависимости прочности цементов от добавки при сжатии, при обжиге добавки 1050°C, в возрасте на 2-е, 7-е и 28-е сутки

Анализ прочности показывает, что исходная порода может заменять клинкер в цементе в количестве до 10%. А термически активированная при 1050°C порода обеспечивает замену до 20% клинкерной составляющей.

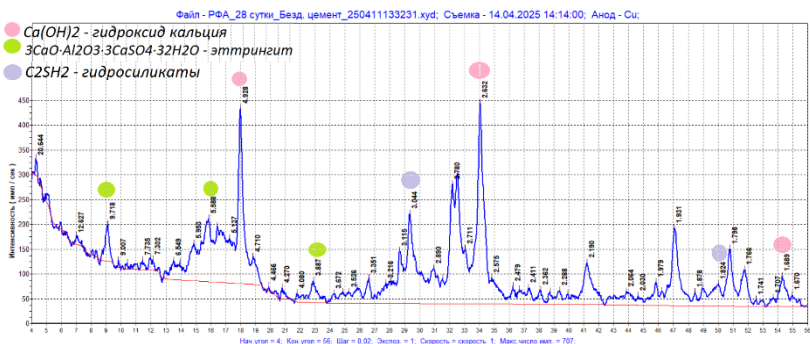


Рис. 6 Дифрактограмма продуктов гидратации цемента 28 суток

В продуктах гидратации бездобавочного контрольного цемента четко фиксируются фазы эттрингита (9.718, 5.56 и 3.88), гидроксид кальция (4.93, 2.63 и 1.69), и гидросиликаты C2SH2 (1.825, 3.07), а также фиксируются отражения исходных силикатных и алюминатной фазы.

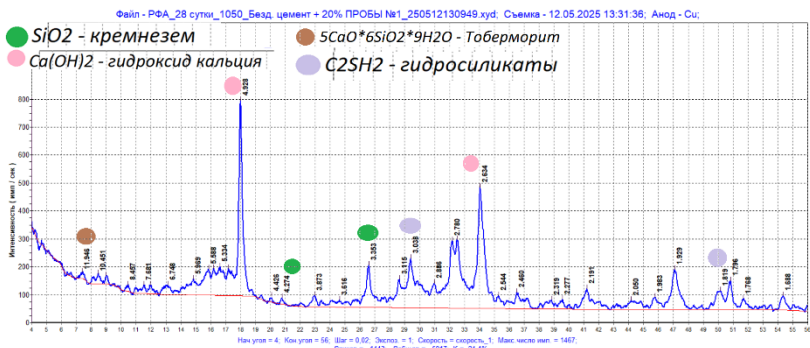


Рис. 7 Дифрактограмма продуктов гидратации цемента с активированной добавкой при 1050°C 28 суток

В продуктах гидратации цементов с термически активированной при 1050 °C добавкой отмечается более высокие интенсивности (в 2 раза) Ca(OH)2, что указывает на активацию гидратации силикатных фаз. Помимо идентифицированных в без добавочном цементе фаз

фиксируются отражения характерные для кварца (3,35 и 4,24) и формирования гидросиликата тобиморитовой группы с межплоскостным расстоянием 11.3 агстрема. Следовательно, можно утверждать, что активированная добавка проявляет гидравлические свойства, ускоряет гидратацию алита, и способствует формированию дополнительного количества гидро-силикатов кальция (ГСК), что улучшает прочностные показатели цемента.

Выводы

В результате проведённых исследований установлено:

- 1) Термоактивация породы из полевошпатовых минералов при температурах, обеспечивающих разложение кристаллической решетки позволяет усилить гидравлическую активность используемой породы в качестве добавки в цемент;
- 2) Использование полевошпатовых минералов дает возможность использовать их в качестве минеральной добавки заменяя клинкерную составляющую при помоле цемента;
- 3) Термоактивированная добавка позволяет снизить долю клинкерной составляющей при сохранении прочностных характеристик цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ш. Гросс, Х.В. Майер, П.Х. Хеерше // Кальцинированная глина как компонент цемента и бетона [Электронный ресурс] // Цемент и его применение. — 2019. — № 4: сайт. — URL: <https://jcement.ru> (Дата обращения 5.5.25)
2. Л. Д. Шахова [и др.] // Оценка активности минеральных добавок для композиционных цементов // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов (XIX научные чтения, 5-8 октября 2010 г. г. Белгород) : междунар. науч.-практ. конф. : сб. докл. - Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. - Ч. 2: Современные технологии керамики, стекла, вяжущих и композиционных материалов. - С. 306-314.
3. С.Е. Шульце, Й. Рикерт // Свойства цементов с прокаленными глинами в качестве основного компонента [Электронный ресурс] // Цемент и его применение. — 2016. — № 1. — с. 152-155: сайт. — URL: <https://jcement.ru> (Дата обращения 5.5.25)
4. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные.

Мерясов А.В., Шабалин С.И.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

О ВЛИЯНИИ ВЛАЖНОСТИ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ВАГРАНОК НА КАЧЕСТВО МИНЕРАЛЬНОГО РАСПЛАВА И МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ

В современном мире на рынке тепло и звукоизоляции занимают лидирующие позиции минеральные волокнистые материалы. Для изготовления разновидностей минеральной каменной ваты сырьем выступают горные породы базальтовой группы вулканического происхождения [1,2].

При изготовлении минеральной каменной ваты для получения силикатных расплавов применяют различные печи [3-6]:

- газовые ванны,
- газозлектрические,
- электрические,
- шахтные,
- шлакоприемные ванны печи.

В минеральном производстве наиболее распространенным плавильным агрегатом является вагранка [7]. В вагранке при температурах около 1500 °С происходит расплав минеральной смеси. Температура имеет важное значение для вязкости расплава, которая достигается в печи. Вязкость оказывает влияние на основные свойства материала, такие как теплопроводность и прочность. Учитывая высокую скорость плавления вагранки и короткое время нахождения минерального расплава в вагранке, не маловажное значение на качество материала оказывает, качество смешения (однородность) минеральных расплавов в вагранке до переработки его в волокно [8].

Для получения гомогенного расплава, необходимо поддержание стабильных температур и вязкости расплава в вагранке на протяжении все процесса производства [2,6,8]. Для этого подбираются необходимые рецептуры шихтных составов, гранулометрический состав каменного сырья и качественное топливо [2]. Не мало важным этапом является подготовка сырьевых компонентов для вагранки. Учитывая различные климатические условия в разных уголках нашей страны, нельзя упускать из учета при работе вагранки такие показатели как влажность сырьевых компонентов вагранки, ведь зимние периоды в некоторых

регионах достигают 4-х месяцев в году. Сырье, хранящееся на открытой площадке, подвергается обильным осадкам, что влечет за собой увеличение влажности. На рис. 1 приведены фото каменных материалов, хранящихся в кучах на открытых площадках.

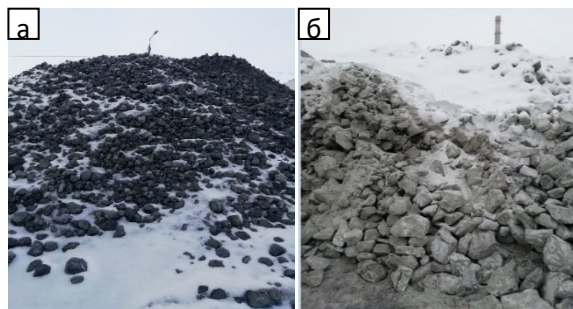


Рис. 1 Хранение каменного сырья на открытой площадке в зимнее время:
а – алюмосиликатного; б - карбонатного

Повышенная влажность каменного сырья и топлива для вагранок несет за собой такие проблемы как увеличение затрат на энергоресурсы, нарушение стабильности процесса плавления вагранки, а, как следствие, снижение качества минеральной ваты, из которой изготавливают изделия различного назначения [1,2].

Не менее важные последствия повышенной влажности каменных материалов оказывает и на экологическую составляющую процесса получения расплава. Для успешного удаления влаги из материалов и кокса, загружаемых в вагранку требуется дополнительное количество тепла, что, соответственно, требует дополнительного расхода кокса, что приведет к увеличению объемов образования и удаления в окружающую атмосферу дымовых газов [9]. Вместе с тем не следует забывать о том, что при повышенной загрузке в вагранку кокса, для сохранения определенного коэффициента избытка воздуха можно увеличить объемы дутьевого воздуха, но суммарную площадь каналов между кусковыми материалами, отводящие дымовые газы изменить невозможно. В результате этого в рабочей камере вагранки будет протекать «химический недожег» кокса, следовательно, в вещественном составе дымовых газов наряду в CO_2 , N_2 и H_2O (пар), будут определенные количества бесцветного токсичного угарного газа – CO , крайне опасного как для человека, так и для окружающей среды.

Учитывая все приведенные доводы, в указанной работе был выполнен комплексный анализ, который будет использован для разработки перечня теоретических и экспериментальных исследований,

позволяющих оценить не только отрицательный интегральный эффект от распространенного несовершенства инженерного решения при оборудовании мест приемки, разгрузки и хранения сырьевых материалов, но и разработать рациональные решения для исключения этого отрицательного эффекта.

Комплексному анализу подвергалась работа ваграночной печи производительностью от 14 до 16 т/ч, высотой 11,5 м и рабочим диаметром фурменного пояса 1,8–2,3 м. На рис. 2 представлена схема вагранки для получения минерального расплава.

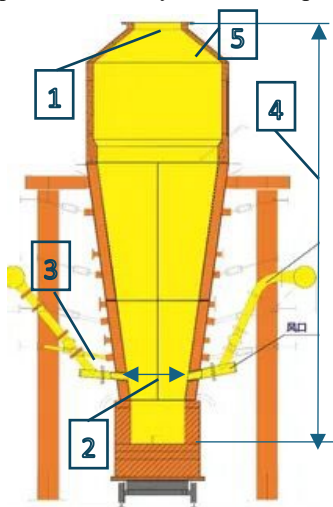


Рис. 2. Схема ваграночной печи для производства минерального расплава: 1 – загрузка вагранки; 2 – диаметр фурменного пояса; 3 – фурма; 4

Время прохождения от загрузки шихты до выхода минерального расплава из сифона составляет 1,4–2,0 час. Температура дутьевого воздуха в фурмы 450–650°C, расход воздуха до 12000 м³/ч. Номинальное количество образующихся дымовых газов до 1600 м³/ч, содержание СО в дымовых газах – не более 5 объёмных %. Расход кокса на процесс плавки при температуре воздуха, подаваемого на дутье в фурмы ~550°C оставляет до 2,5 т/ч. Приведенные данные являются среднестатистическими для большинства производителей минеральной ваты, поэтому весьма важным является выявление указанных значений отклонений от приведенных параметров работы вагранок при изменении влажности сырьевых материалов и топлива а также выявление дефектов в

минеральной вате, связанных с этим явлением.

В блоке теоретических исследований были выполнены тепловые расчеты и на их основе составлены тепловые балансы работы вагранки при выявленных колебаниях влажности на протяжении 2-х весенних месяцев на одном из предприятий. Так, средняя влажность в марте алюмосиликатного сырья составляла 5,11 мас. %, а в апреле, после активного таяния снегов, среднемесячная влажность этого же сырья снизилась до 4,7 мас.%. Влажность карбонатного сырья за указанный период изменилась в меньшей степени – с 5,95 до 5,0 мас. %, а вот

влажность различных видов углеродного топлива изменялась неоднозначно, что, очевидно связано с различной пористостью различных видов кокса и требует дополнительного изучения.

В результате выполненных теплотехнических расчетов установлены относительные изменения требуемого расхода топлива и связанное с этим необходимое регулирование подачи воздуха в фурмы. Также установлено, что отсутствие возможности повышения температуры нагрева воздуха, подаваемого в фурмы, заставляет компенсировать эти тепловые потери в балансе дополнительным увеличением расхода топлива.

Блок экспериментальных исследований подразумевает проведение экспериментов по первому направлению - выполнение мониторинга состава отходящих дымовых газов при помощи газоанализаторов. Это позволит установить, будет ли при отклонении от нормативной среднесезонной влажности сырьевой смеси и увеличении объема образующихся дымовых газов, фиксироваться увеличения содержания в них угарного газа. Следует отметить, что возможные колебания угарного газа в отходящих дымовых газах, в итоге, в окружающую среду не попадают, поскольку в технологической схеме безопасности предусмотрен дожиг угарного газа, а генерируемое тепло используется на нагрев дутьевого воздуха, но при выявлении увеличения содержания его необходимо будет решать задачу дополнительного расхода воздуха на операцию дожига.

Второе направление экспериментальных исследований должно быть связано с мониторингом качества образцов минерального расплава, индивидуальных минеральных волокон и минеральной ваты при исследуемых колебаниях влажности.

Для этого разработана блок-схема проведения экспериментальных, способных дать не только ответы эти важные вопросы, но и разработать технологические и технические решения для упреждающих оперативного регулирования параметрами процесса получения расплава и, соответственно достижения заданного уровня качества минеральной ваты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горяйнов К.Э. Минеральная вата и изделия из нее//Москва: Изд. Министерства строительства и предприятий машиностроений 1950. С. 33–44/
2. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 416 с.

3. Исокжонов Ш. С. Особенности использования плавильных агрегатов для получения минерального расплава / Ш. С. Исокжонов, В. И. Матюхин, А. В. Матюхина. — Текст : непосредственный // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2024) с международным участием (Екатеринбург, 16–17 мая 2024 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2024. — С. 46–52.

4. Оборудование для производства минеральной ваты и изделий из нее: обзор. инф. строит., дорож. и коммун. машиностроения / И.И. Юцис. – М.: ЦНИИТЭСтроймаш, 1981 Сер. 8 Вып. 1. - 45 с.

5. Онищук В. И. Костенко С. Е., Жерновая Н.Ф. Современные стекловаренные печи и пути повышения их технико-экономических показателей/Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2010. №3. С.127-130.

6. Сентяков Б.А. Базальтовое волокно. Технология и оборудование для производства изделий из базальтового волокна: патентная и научно-техническая информация, опыт производства: справочное пособие / Б.А. Сентяков, Л. В. Тимофеев, Ф.Ф. Шайхразиев. – Ижевск: ИжГТУ, 1995–48 с.

7. Матюхин В.И., Хандошка А.В., Журавлев С. С., Матюхина А.В. Тепловая и газодинамическая работа в минераловатной вагранке// В сборнике докладов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2018) с международным участием. 2018. С. 242–247.

8. Татаринцева О. С., Зимин Д. Е. Особенности плавления горных пород и волокнообразования из расплавов. Ползуновский вестник № 2–2. 2006. С.158-162

9. Баркан М. Ш., Ковшов С. В., Ковшов В. П. Некоторые аспекты экологической и энергетической безопасности при эксплуатации вагранных печей // International scientific review. 2016. №5 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-ekologicheskoy-i-energeticheskoy-bezopasnosti-pri-ekspluatatsii-vagrannyh-pechey> (дата обращения: 22.05.2025).

Миронов В.А., Субботин В.Д.

Научный руководитель: Щелокова Л.С., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОМОЛА КЛИНКЕРА

В условиях растущего внимания к экологическим проблемам и рациональному использованию ресурсов цементная отрасль активно модернизирует технологии, уделяя особое внимание оптимизации процесса помола клинкера, который напрямую влияет на энергоэффективность производства. Современные предприятия в Европе и России, применяющие сухую технологию изготовления цемента, сталкиваются с высокими энергозатратами на этапе измельчения сырья в шаровых мельницах, чей низкий КПД (не превышающий 3,5% [3]) подчеркивает необходимость поиска решений для повышения производительности. Эффективность помола зависит от множества факторов, включая химический состав клинкера, определяющий прочность, водостойкость и морозостойкость цемента; минералогические особенности сырья, влияющие на кинетику гидратации; структуру клинкерных минералов, от которой зависит их механическая устойчивость; а также применение минеральных добавок, модифицирующих эксплуатационные свойства. Уникальность каждого типа цемента требует индивидуального подхода к выбору режимов измельчения.

Использование интенсификаторов помола позволяет решать несколько задач: снижение энергопотребления за счет уменьшения нагрузки на аспирационные системы [1], повышение тонкости помола благодаря введению органических соединений [4], а также предотвращение слеживаемости цемента при хранении [2]. Эти добавки, применяемые в строго контролируемых дозах, подразделяются на монофункциональные (например, амины и гликоли), направленные на увеличение производительности мельниц или улучшение гранулометрии без изменения прочности, и полифункциональные (такие как ПАВ "Литопласт И"), сочетающие повышение эффективности измельчения с улучшением физико-механических характеристик. Таким образом, интенсификаторы становятся ключевым элементом энергосберегающих технологий, способствуя росту качества продукции и снижению экологической нагрузки.

Цель работы заключается в определении вида и концентрации добавок для клинкера «АО Белгородский цемент».

Первым этапом работы являлось измельчение в лабораторной мельнице клинкера «АО Белгородский цемент» с природным гипсом. Для этого использовали 100 грамм клинкера и 5 грамм гипса. Интенсификаторы помола не применялись. Время помола составило 40 минут, каждые 10 минут производилась проверка удельной поверхности и тонкости помола на сите №008.

После измельчения клинкера и гипса без использования интенсификаторов помола, были введены добавки в концентрации 0,01%. Добавками являлись: MC-Grinding pro 01, MC-Grinding pro 02, MC-Grinding pro 03, MC-Grinding pro 03N, MC-Grinding pro 04.

После проведения помолов каждые 10 минут определялась степень измельчения приведенных материалов по удельной поверхности методом воздухопроницаемости на приборе ПМЦ-500 и остатку на сите №008. Этот метод позволяет оценить эффективность помола и качество получаемого материала. Удельная поверхность — это суммарная площадь поверхности всех частиц материала, приходящаяся на единицу его массы. Чем больше удельная поверхность, тем тоньше помол. Для определения удельной поверхности используется прибор ПМЦ-500, который работает на основе метода воздухопроницаемости. Прибор пропускает поток воздуха через слой исследуемого материала и измеряет перепад давления. По этому перепаду давления можно рассчитать удельную поверхность материала. Остатки на сите №008 также являются важным показателем качества помола. Они показывают, какая часть материала прошла через сито с размером ячейки 80 микрон. Чем меньше остаток на сите, тем тоньше помол. Остатки на ситах определялись на технических весах. Это позволяло получить точные данные о количестве материала, оставшегося на сите после просеивания.

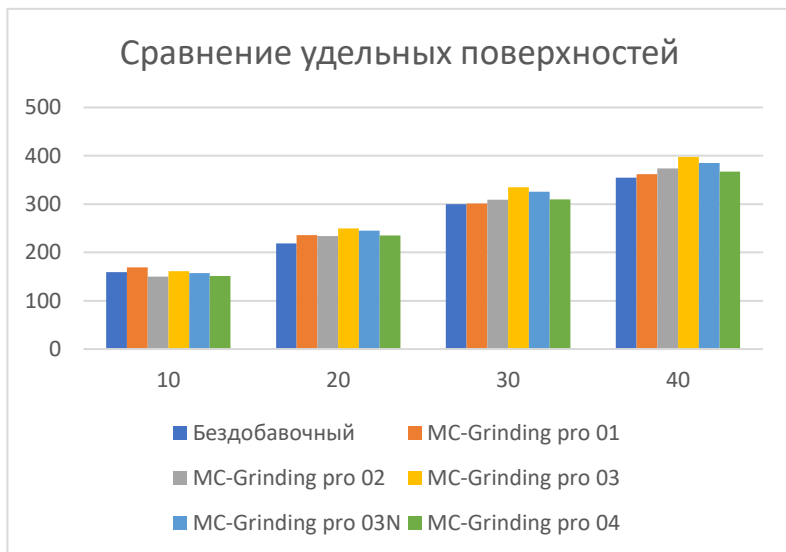


Рис. 1 Зависимость удельной поверхности цемента от времени помола при использовании интенсификаторов.

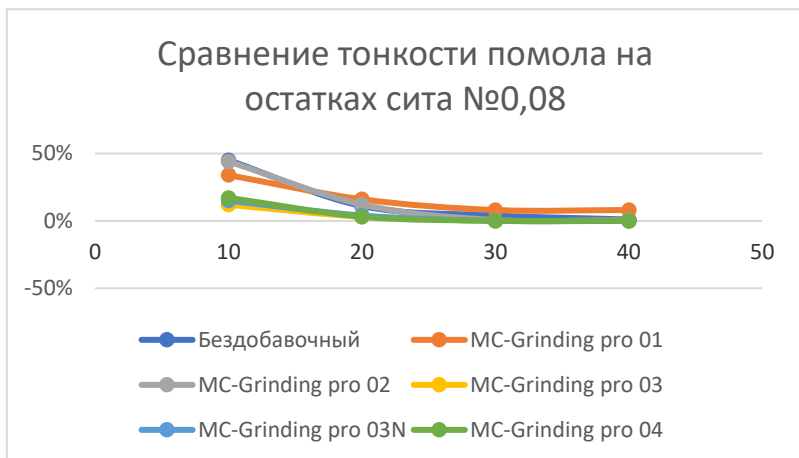


Рис. 2 Динамика изменения остатка на сите №008 в процессе помола с различными добавками.

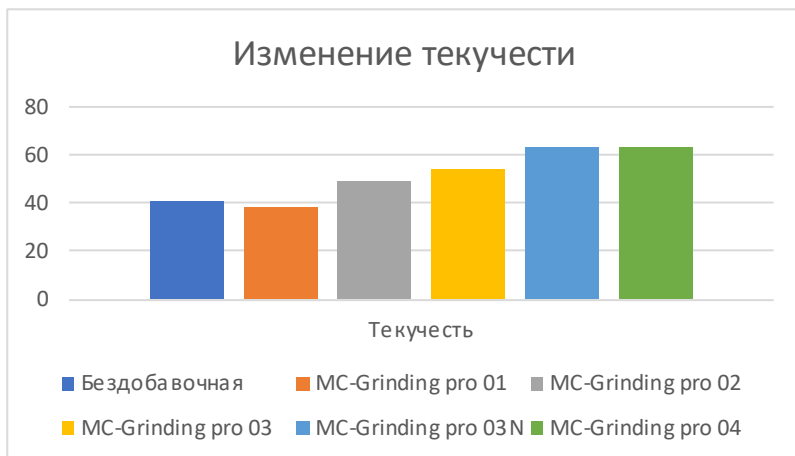


Рис. 3 Влияние интенсификаторов помола на текучесть цемента.

Исследование влияния интенсификаторов помола линейки MC-Grinding pro на процесс измельчения клинкера показало, что все добавки улучшают ключевые технологические показатели по сравнению с бездобавочным составом. Наиболее эффективной оказалась добавка MC-Grinding pro 04, которая за 40 минут помола обеспечила удельную поверхность $367 \text{ м}^2/\text{кг}$, что на 3,4% выше, чем у контрольного образца ($355 \text{ м}^2/\text{кг}$). Остаток на сите №008 для этой добавки составил 0,0003% против 0,01% в бездобавочном варианте, что соответствует требованиям высокотонкого помола. Добавка MC-Grinding pro 03N продемонстрировала значительный прирост удельной поверхности — $385 \text{ м}^2/\text{кг}$ (+8,4% за 40 минут), однако её конечная тонкость уступает лидеру, что делает её менее подходящей для условий, требующих максимального измельчения.

При анализе текучести цементного теста MC-Grinding pro 04 показал наилучший результат — 63,2 ед., что на 54% превышает показатель бездобавочного состава (41 ед.). Это снижает энергозатраты на транспортировку материала в мельницу и повышает однородность помола. Добавка MC-Grinding pro 03N достигла 62,8 ед., но её применение менее предпочтительно из-за более низкой удельной поверхности, что может негативно повлиять на прочностные характеристики цемента.

Добавки MC-Grinding pro 04 и 03N проявили полифункциональные свойства: они ускоряют процесс измельчения, повышают тонкость помола и улучшают реологические свойства цемента. В то же время

добавки MC-Grinding pro 01 и 02 показали умеренную эффективность — их использование привело к увеличению удельной поверхности на 1,9–5,6%, а остатки на сите №008 остались в диапазоне 0,003–0,005%, что существенно ниже результатов лидеров.

Внедрение MC-Grinding pro 04 на предприятии АО «Белгородский цемент» позволит сократить энергопотребление за счёт снижения времени помола и нагрузки на оборудование, повысить производительность мельниц благодаря улучшенной текучести материала, а также получить цемент с повышенной прочностью за счёт увеличенной удельной поверхности. Для специализированных составов, где приоритетом является максимальная текучесть, рекомендуются дополнительные испытания MC-Grinding pro 03N.

Использование полифункциональных интенсификаторов помола, таких как MC-Grinding pro 04, способствует решению ключевых задач цементной отрасли: повышению производительности, снижению энергозатрат и улучшению качества продукции, что соответствует современным экологическим и ресурсосберегающим требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение / А.А. Абрамзон. – Л. «Химия». – 1975. – С.248.
2. Борисов И.Н. Влияние вида применяемого помольного агрегата на гранулометрический состав продукта / Борисов И.Н., Злобин И.А., Мандрикова О.С., Dr. Zysk К.-Н. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – №5. – С. 164-168.
3. Карибаев К.К. Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих материалов. / К.К. Карибаев. - Алма-Ата «Наука», 1980. – С. 336
4. Стронин А.А. Исследование интенсифицирующего воздействия добавок на помол портландцементного клинкера / Л.С. Щелокова, А.А. Стронин. // Международный студенческий научный вестник. — 2016. — №2. — С. 118-119.

НАНЕСЕНИЕ ПРИРАБОТОЧНОГО СЛОЯ MoS_2 НА АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОЦЕНКА ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В настоящее время наноструктурированные покрытия, в частности материалы класса DLC (diamond-like carbon), находят широкое применение в науке и технике благодаря их исключительным характеристикам и широким возможностям использования в промышленности, включая механическую обработку и транспортное машиностроение. Изучение и создание углеродных покрытий является важным направлением современных исследований, открывающим перспективы для разработки инновационных технологий и оптимизации производственных процессов.

Следует отметить, что при определённых эксплуатационных условиях, таких как вакуумная среда или экстремальные механические нагрузки, может наблюдаться увеличение коэффициента трения DLC-покрытий. Это обуславливает необходимость применения дополнительных антифрикционных слоёв для улучшения трибологических характеристик. В качестве эффективного модификатора поверхности DLC-покрытий рассматривается дисульфид молибдена (MoS_2) – соединение со слоистой кристаллической решёткой, демонстрирующее выдающиеся свойства твердой смазки в инертных средах и вакууме, а также обладающее низким трением и в атмосфере [1].

В ходе работы проводилось нанесение композитного покрытия WC/C, объединяющее высокую износостойкость карбида вольфрама (WC) и низкое трение аморфного углеродного слоя (C). Процесс осаждения осуществлялся на контрольные образцы (Рис.1а), изготовленные из стали AISI 1045. В ходе нанесения было получено пять образцов покрытий с различной толщиной: от 1,5 мкм до 5,5 мкм с шагом 1 мкм. Технология нанесения включала одновременное дуговое испарение мишеней из WC и ионизацию плазмой аргона газообразного ацетилена (C_2H_2). В этом случае между катодом (мишень) и анодом создается дуговой разряд. Дуга вызывает локальное испарение и ионизацию материала мишени, образуя плазму с высокой степенью

ионизации. На подложку подается отрицательное смещение, что приводит к ускорению ионов из плазмы к поверхности. Таким образом формируется композиция из указанных элементов, обладающая высокой твердостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения [2].

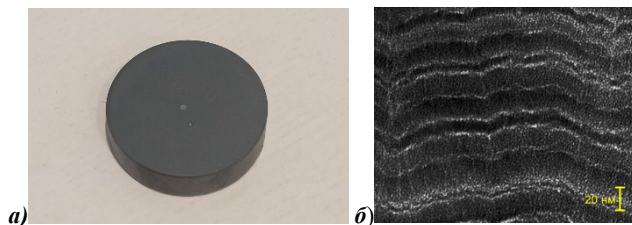


Рис. 1 Покрытие а-С:N:W:
а – образец с покрытием; б – наноструктура покрытия

На Рис.1б приведена наноструктура покрытия WC/C: темные полосы на РЭМ-снимке являются зонами с повышенным содержанием углерода, а относительно светлые содержат высокую долю карбида вольфрама. Толщина слоев карбида вольфрама в покрытиях составляет около 5 нанометров, а углерода около 15 нанометров [2].

Затем проводилось нанесение фрикционно-оптимизирующего слоя. Он устраняет главный парадокс DLC – сочетание высокой твердости с нестабильным трением. За счет обеспечения функции щадящей приработки поверхности покрытия это позволяет увеличить ресурс узлов трения в 5–10 раз и снизить энергопотребление механизмов на 15–20%.

Слой покрытия MoS_2 осаждался методом магнетронного распыления стехиометрической мишени MoS_2 в аргонной плазме. Для обеспечения высоких трибологических свойств и минимизации неравномерности толщины покрытия проводился подбор параметров моделирования процесса (Рис. 2). Результат моделирования в виде цветовой карты распределения толщины покрытия на образцах, представлен на Рис. 3. Моделирование проводилось с использованием авторского программного обеспечения «TFDepositionR».

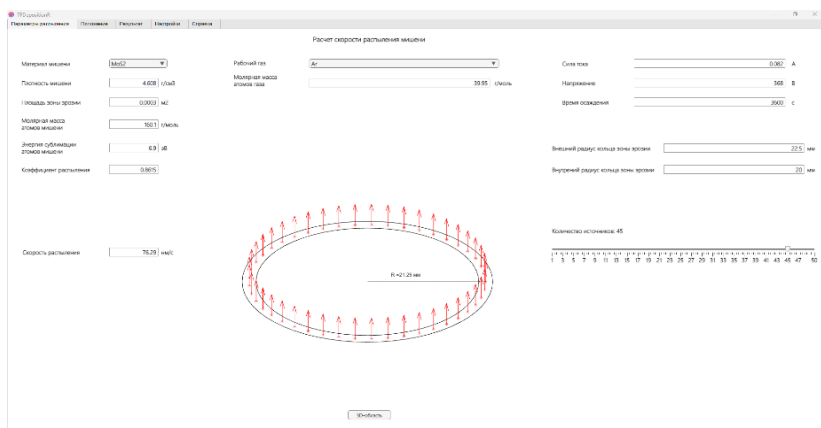


Рис. 2 Интерфейс программы моделирования процесса осаждения слоя MoS

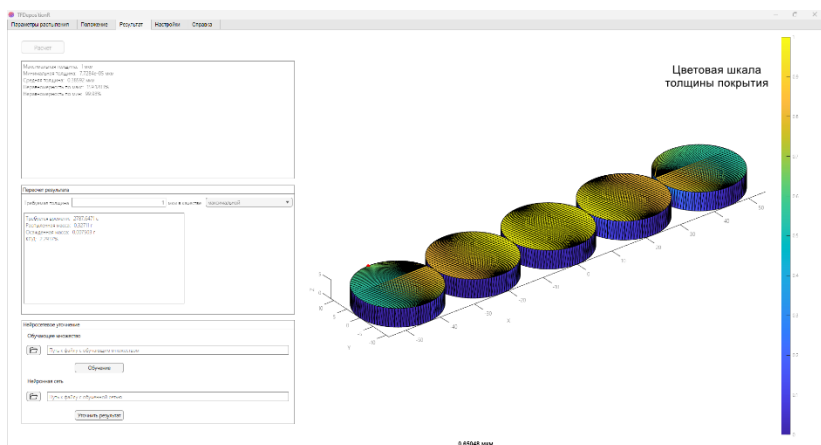


Рис. 3 Интерфейс программы с результатами моделирования

По результатам моделирования толщина покрытия составила 1 мкм при максимальной неравномерности 120% (на крайних образцах при данной компоновке). Нанесенное на образцы в течение 75 мин покрытие имело толщину 0,8 мкм. Измерение толщины проводилось с использованием профилометра по ступеньке покрытия, полученной на кремниевом образце-свидетеле, расположенном рядом с образцами.

Трибометрические испытания покрытий проводились на трибометре с вращательным столиком по схеме pin-on-disc [3] в условиях атмосферы при температуре 25,9 °C и влажности 35%. Параметры испытаний: нагрузка на шарик-контртело – 50 г, диаметр

шарика – 3 мм, материал шарика – сталь ШХ15. Выход на режим стабильного трения определяется дистанцией скольжения, для покрытия а-С:H:W это около 250 м (для частоты вращения столика 5,05 Гц и радиуса дорожки трения 2,5 мм, период времени - примерно 6000 секунд). Для каждого из пяти образцов проводилось одно испытание, ниже приведен характерный график зависимости коэффициента трения от времени для образца с покрытием а-С:H:W толщиной 2,5 мкм (Рис. 5).

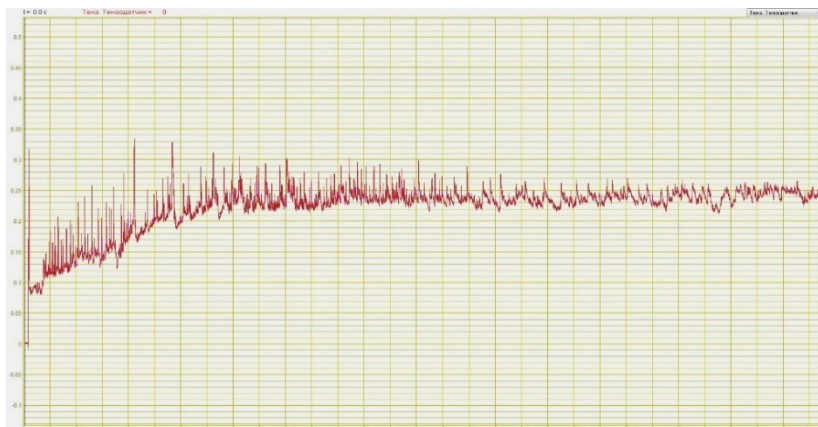


Рис. 5 График зависимости коэффициента трения от времени для покрытия а-С:H:W толщиной 2,5 мкм

Результаты испытаний для всех образцов имели сходный характер: вначале наблюдалось повышение коэффициента трения, затем он стабилизировался, но при этом наблюдались существенные локальные скачки коэффициента трения (КТ). Среднее значение КТ на стабильном участке примерно равно 0,22. Возможно, такой высокий коэффициент трения обусловлен образованием в покрытии абразивных оксидов вольфрама (WO_3 , WO_2).

Испытания покрытий а-С:H:W с нанесенным приработочным слоем MoS_2 осуществлялись на таких же режимах (Рис. 6)..



Рис. 6 График зависимости коэффициента трения от времени для покрытия а-С:Н:W+MoS₂

По результатам испытания приработочный слой покрытия MoS₂ толщиной 0,8 мкм на начальной стадии трения обеспечивал существенное снижение коэффициента трения до значения 0,03, который оставался стабильным на протяжении дистанции около 260 м. Далее произошло разрушение покрытия MoS₂ и трение контртела по твердому покрытию а-С:Н:W осуществлялось при значениях КТ, характерных для этого базового покрытия, но при более высокой нестабильности трения.

За счет нанесенного слоя MoS₂ средний коэффициент трения составил 0,03 (начальный участок с низким трением на Рис. 6). Это значение более чем в 7 раз ниже значения установившегося коэффициента трения (0,22) для покрытия без приработочного слоя (Рис. 5). Данное преимущество создает предпосылки для использования подобной технологии в промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donnet, C. Super-low friction of MoS₂ coatings in various environments / J. M. Martin, Th. Le Mogne and M. Belin // Tribology International – 1996 – №29 – С.123 - 128
2. Балдаев Н. Алмазоподобные углеродные Покрытия dlc. Варианты и применение // Ритм машиностроения – 2022 – № 4 – С.38 - 42
3. Novak, R. Tribological analysis of thin films by pin-on-disc: Evaluation of friction and wear measurement uncertainty / T. Polcar // Tribology International – 2014 – №74 – С.154 – 163

НАНЕСЕНИЕ ПРИРАБОТОЧНОГО СЛОЯ MoS_2 НА АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОЦЕНКА ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В настоящее время наноструктурированные покрытия, в частности материалы класса DLC (diamond-like carbon), находят широкое применение в науке и технике благодаря их исключительным характеристикам и широким возможностям использования в промышленности, включая механическую обработку и транспортное машиностроение. Изучение и создание углеродных покрытий является важным направлением современных исследований, открывающим перспективы для разработки инновационных технологий и оптимизации производственных процессов.

Следует отметить, что при определённых эксплуатационных условиях, таких как вакуумная среда или экстремальные механические нагрузки, может наблюдаться увеличение коэффициента трения DLC-покрытий. Это обуславливает необходимость применения дополнительных антифрикционных слоёв для улучшения трибологических характеристик. В качестве эффективного модификатора поверхности DLC-покрытий рассматривается дисульфид молибдена (MoS_2) – соединение со слоистой кристаллической решёткой, демонстрирующее выдающиеся смазывающие свойства благодаря своей гексагональной структуре.

В ходе исследования наносилось композитное покрытие WC/C, объединяющее высокую износостойкость карбида вольфрама (WC) и низкое трение аморфного углеродного слоя (C). Процесс осаждения проводился на контрольных образцах (Рис. 1, а), изготовленных из стали AISI 1045. Технология нанесения включала сочетанное испарение мишеней из WC, размещённых внутри вакуумной камеры, и ионизацию газообразного ацетилена (C_2H_2). На мишени подается положительный потенциал, а на изделие — отрицательный. Электрическим полем испаренный карбид вольфрама переносится на изделия, туда же притягиваются и ионы углерода, частично с водородом. Таким образом формируется композиция из указанных элементов, обладающая высокой твердостью, износостойкостью и низким коэффициентом

трения [1].

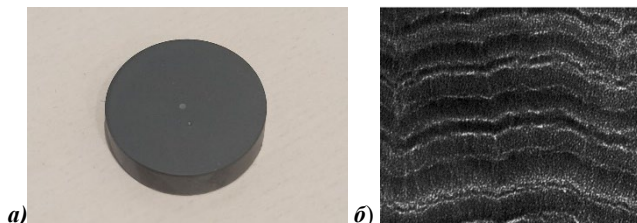


Рис. 1 Покрытие а-С:Н:W:

а – образец с покрытием; *б* – наноструктура покрытия

Темные полосы на фотографии наноструктуры (Рис. 1, б) такого покрытия — это зоны с повышенным содержанием углерода, а относительно светлые — с повышенным содержанием карбида вольфрама [1].

После нанесения функционального слоя, необходимо нанести фрикционно-оптимизирующий слой. Он устраняет главный парадокс DLC - сочетание высокой твердости с нестабильным трением. В промышленности это позволяет увеличить ресурс узлов трения в 5–10 раз и снизить энергопотребление механизмов на 15–20%.

Этот слой MoS_2 в эксперименте наносился методом магнетронного распыления в аргоновой плазме (PVD). Для лучших трибологических свойств и минимальной неравномерности проводился подбор параметров (Рис. 2). Результат моделирования и компоновка представлен ниже (Рис. 3). Моделирование проведено при помощи ПО TFDepositionR.

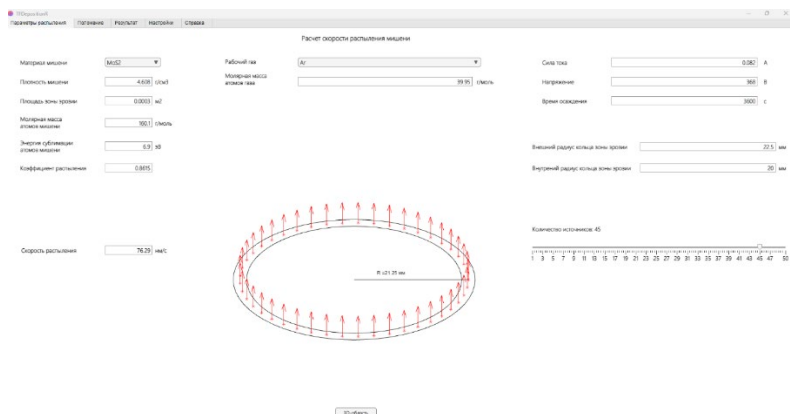


Рис. 2 Параметры нанесения слоя MoS₂

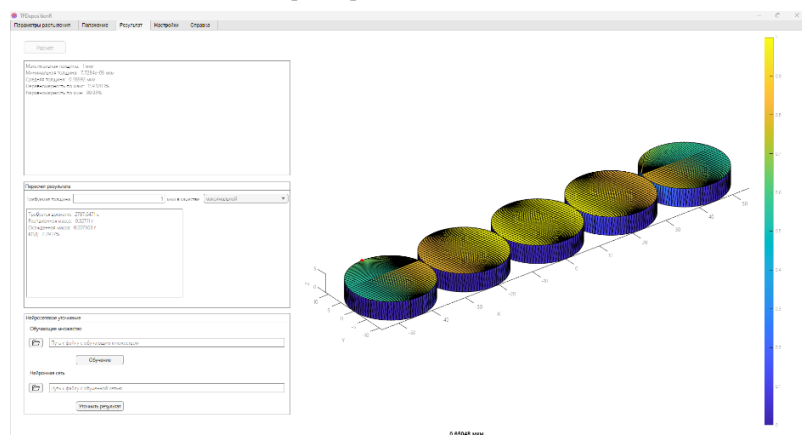


Рис. 3 Результаты моделирования

Параметры нанесения: сила тока - 0,082А, напряжение – 368 В, время осаждения – 3600 с, скорость осаждения – 76,29 нм/с. По результатам нанесения: при расстоянии 80 мм от мишени до образцов неравномерность составила около 120% (Была оценка на профилометре).

После нанесения всех слоев покрытия проводились испытания на трибометре по схеме pin-on-disc (Рис. 4).

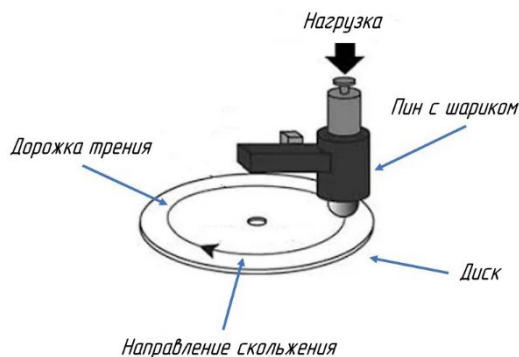


Рис. 4 Трибومتر типа pin-on-disc

Трибومتر предназначен для обеспечения моделирования трения в контролируемых условиях. Он применяется для проведения триботехнических испытаний, по результатам которых изучаются параметры трения сопряженных элементов «образца» и «контртела». Используется, обычно, в составе стендов (с приводом и измерительной аппаратурой). Трибومتر реализует функции: измерение коэффициента трения (КТ) пары в заданных условиях, измерение характеристик износостойкости и долговечности.

За время эксперимента было испытано пять образцов до нанесения прирабочного слоя, то есть испытанию подвергались образцы с покрытием WC/C. Выход на режим в трибологических испытаниях определяется по дистанции скольжения, для покрытия а-С:H:W (Рис. 5) это около 250 м, что при частоте вращения 5,05 Гц и ради дорожки 2,5 мм составляет около 6000 секунд, это необходимо для формирования контактных поверхностей.

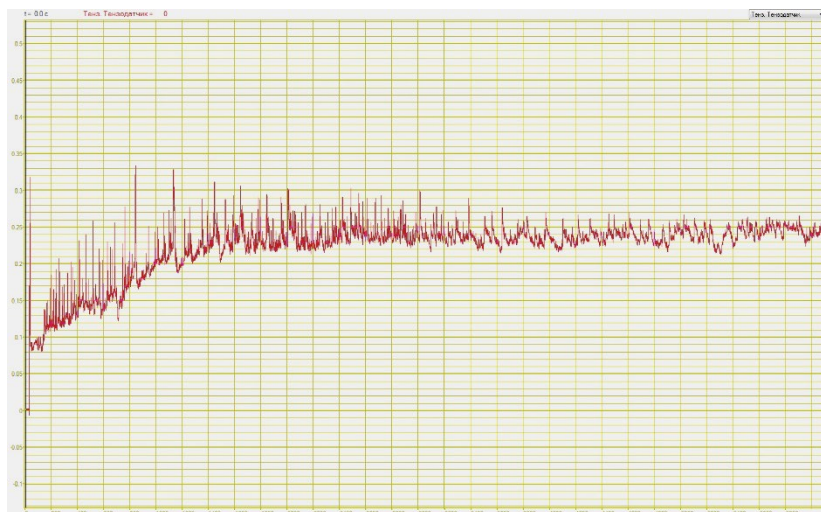


Рис. 5 График зависимости коэффициента трения от времени для покрытия a-C:H:W

За пять измерений среднее значение коэффициента трения равно примерно 0,2. Возможно такой высокий коэффициент трения получился из-за образование абразивных оксидов вольфрама (WO_3 , WO_2) и разрушение углеродной матрицы, так как образцы долгое время лежали на воздухе.

Для испытаний, проводившихся после нанесения прирабочного слоя (Рис. 6) режим оставляем неизменным. Это необходимо для дальнейшего корректного сравнения.

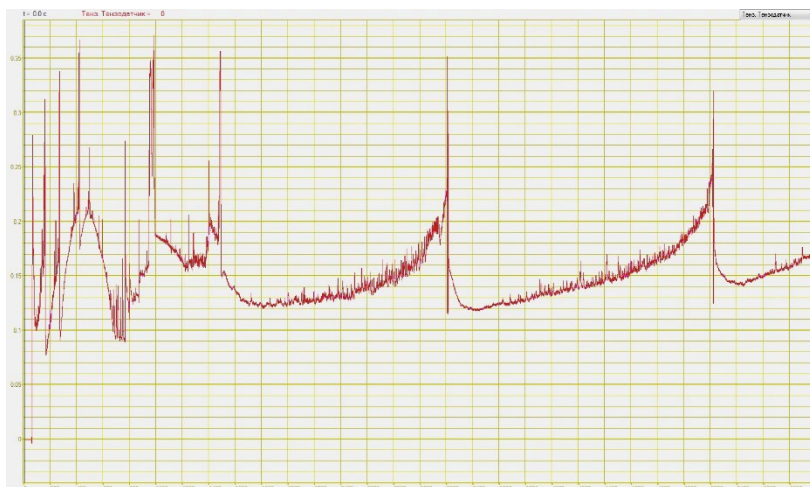


Рис. 6 График зависимости коэффициента трения от времени для покрытия a-C:H:W:MoS₂

Время выхода на режим не изменилось, однако средний коэффициент трения снизился с 0,23 до 0,17, иначе на 26%. Исходя из графика испытания после нанесения, можно предположить, что такие резкие пики связаны с налипанием частиц серы на индентор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николай Балдаев алмазоподобные углеродные покрытия dlc. варианты и применение // Ритм машиностроения. — 2022. — № 4. — Страницы 38-42.
2. Петров С.А., Иванов В.В. Исследование трибологических свойств DLC-покрытий в условиях сухого трения // Поверхностная инженерия. — 2021. — № 2. — С. 45–50.
3. Кузнецов А.Н., Орлов Д.В. Особенности нанесения алмазоподобных покрытий на режущий инструмент // Технология металлов. — 2020. — № 5. — С. 31–35.

АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ ДОЛОМИТА И ГАББРО- ДИАБАЗА

Минеральная вата является одним из самых востребованных, современных, теплоизоляционных утеплителем, получаемый на основе горных пород доломита и габбро-диабазы [1].

Важным этапом при производстве каменной ваты являются подготовка сырьевых материалов и приготовление шихты. Высокие требования, предъявляемые к шихте такие, как однородность химического состава, постоянство гранулометрического состава компонентов, пыления и улетучивания компонентов шихты на всех этапах транспортировки и варки, часто делают процесс ее подготовки определяющим при изготовлении минеральных волокон и минеральной ваты высокого качества [2].

Сегодня многие производители базальтовых волокон и минеральной ваты используют для получения расплавов материала с гораздо большим размером частиц, чем в производстве стеклянных волокон.

Так, например, частиц кварцевого песка для стекольной промышленности [2,3] определяется диапазоном 0,1–0,8 мм с максимальным содержанием фракции 0,3–0,4 мм и минимальным содержанием фракций >0,8 мм и <0,1 мм. Контрольный просев полевошпатового сырья осуществляется через контрольную сетку 0,063 мм, а количество фракции, задержавшейся на ней, не должно превышать 5% [4]. При этом, многие производители минеральной ваты для получения расплавов в печах-вагранках, традиционно используют кусковые материалы, что связано с технологическими возможностями стабильной работы таких печей [5]. Вместе с тем, минеральные расплавы можно получать не только в вагранках, но и в газовых, газозлектрических ваннах печах и других термических агрегатах [5,6].

При получении минеральных расплавов в ваннах печах традиционно используют сырьевые материалы с размером частиц в диапазоне 0,5 – 2,0 мм. Для отделения частиц меньших размеров они отсеиваются и, по сути дела, представляют собой отходы, которые

могут эффективно использоваться в случае их компактирования известными методами – прессованием, окатыванием или экструзией [7,8]. На сегодняшний день, согласно «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ № 84-р от 25.01.2018 г. [9] решение задач в направлении снижения расход кондиционного сырья, топливно-энергетических ресурсов, совершенствованию экологической безопасности, разработке экологических проектов собственного рециклинга отходов предприятия является актуальным и своевременным.

В настоящее время накоплен значительный научный и практический опыт в области уплотнения различных дисперсных материалов. Но в практике производства минеральной ваты уплотнение порошков отсева алюмосиликатных горных пород и карбонатных пород системных исследований не проводилось и, наряду, с кажущейся простотой задачи получения компактов на их основе, нет сведений о склонности к уплотнению вещественных составов шихт из различных видов сырья, отличающихся по химическому и минералогическому составу, необходимости предварительной подготовки, а также оптимальным параметрам и способу уплотнения.

Из практики уплотнения стекольных шихт известно [9], что критерием оценки склонности смесей к уплотнению является модуль их формуемости, M_{ϕ} , определение которого производится по следующей формуле:

$$M_{\phi} = 0,01[\text{SiO}_2 - (\text{ГСК} + \text{ПК})], \quad (1)$$

где: SiO_2 – содержание кварцевого песка или других кварцсодержащих материалов; ГСК – содержание гигроскопичных компонентов; ПК – содержание пластичных компонентов

Анализ этой формулы показывает то, что она не может быть использована для определения склонности к уплотнению сырьевых смесей, используемых в технологии минеральной ваты, т.к. неполностью отвечает наличию в них приведенных в ней компонентов, поскольку и алюмосиликатные горные породы, и карбонатное сырье без дополнительной подготовки не могут быть отнесены ни к гигроскопичным, ни к пластичным компонентам, следовательно одним из возможных решений для получения компактов на основе указанного сырья может быть либо использование вяжущих материалов, либо их предварительная обработка с увеличением реакционной способности и формированию у них вяжущих свойств.

На первом этапе экспериментальных исследований запланировано проведение исследований, которые позволят дать ответ на вопрос получения компактированных смесей с минимальными экономическими затратами, предусматривающими разработку приемов получения вначале тонких порошков, эффективности измельчения при изучении кинетики помола и достижения заданной удельной поверхности. На втором этапе будут проведены исследования по определению эффективного технологического связующего неорганической или органической природы и установление его оптимальных концентраций.

Для выполнения этих исследований и постановки эксперимента были оценены свойства планируемых к использованию в работе материалов (Табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические свойства карбонатной и алюмосиликатной горной породы, используемые при проведении исследований

Свойство, ед. измерения	Вид материала	
	Карбонатная порода	Алюмосиликатная порода
Прочность, МПа	10-20	100-190
Насыпная плотность, кг/м ³	2500-2700	2800-3200
Предел прочности при сжатии, МПа	100-250	150-300
Водопоглощение, %	5	0,15
Влажность, %	8-11%	0,75%
Твердость, по шкале Мооса	3,5-4 ед.	6-7 ед.
Теплопроводность, Вт/(м·К)	5,29	2,15

Из таблицы видно, что твердость и прочность доломит меньше габбро-диабазы. Исследование дробимости габбро-диабазы показало, что он очень твердый и хрупкий, что затрудняет его обработку.

Этот факт является основанием для изучения кинетики измельчения различных материалов с применением различных методов измельчения – ударно-истирательного или истирательного действия, а также определения эффективности раздельного или совместного помола отсевов. Конкретизация и выбор эффективных условий измельчения связан с тем, что в случае совместного отсева доломита будет измельчаться быстрее и, возможно «блокировать» действия шаров мельницы, т. е. мешать удару шаров по частицам габбро-диабазы.

Исходя из этого, необходимо предусмотреть раздельное измельчение с доломитом.

На втором этапе планируется проведение работ, направленных на определение рационального способа уплотнения и наиболее эффективных параметров процесса.

Планируется выполнить исследования процессов уплотнения с применением лабораторного пресса и турболопастного гранулятора. Конечно же, указанные способы уплотнения и оборудование позволяет получать компакты с различными свойствами, поэтому оценка и выявление наиболее эффективного способа и его параметров будет производиться путем оценки свойств расплавов, которые будут получены в лабораторных условиях путем плавки сырьевых смесей в корундовых тиглях вместимостью 250 мл в электрической печи сопротивления с карбидкремниевыми электронагревателями.

Критериями оценки при проведении исследований выбраны следующие:

- температуры начала пластической деформации компактов под действием собственного веса;

- поведение компактов в результате политермической обработки и фиксацией интенсивности стеклования в интервале температур силикато- и стеклообразования [10];

- оценка интенсивности стеклования компактах при политермической обработке методом оптической микроскопии;

- оценка эффективности массообмена в компактах при политермической обработке методом электронной микроскопии;

- получение расплавов и визуальная оценка их качества по динамике дегазации и методом нити на качество «провара».

Такой блок экспериментальных исследований позволит установить преимущества использования уплотненного отсева доломита и габбро-диабаз вследствие:

- длительное сохранение однородности;

- устранение пыления при транспортировке и загрузке;

- облегчение твердофазного взаимодействия компонентов на стадии силикатообразования;

- ускорение стеклообразования на стадии жидкофазных массообменных процессов;

- уменьшение затрат тепла на варку и расхода топлива;

- улучшение условий службы огнеупоров вблизи загрузочных карманов печи;

- возможность модернизации вещественного состава компактов с активизацией процессов твердофазного и жидкофазного

взаимодействия добавлять в компакт: образующийся технологический отход, при производстве минеральной ваты; металлургический шлак; ускорители плавления; доломитовую муку; использование различных видов связующего; строительный мусор, в виде обрезков минеральной ваты со строительных площадок.

Таким образом, применение отсевов доломита и габбро-диабазы при производстве минеральной ваты представляет собой перспективное направление переработки отсевов производства при производстве теплоизоляционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 416 с.
2. Контроль производства и качества листового стекла и стеклоизделий: учеб. пособие/В.И. Онищук, Н.Ф. Жерновая, Н.И. Минько. - 2-е изд., стер. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008.165 с.
3. ГОСТ 22551-2019 Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия. Москва. Стандартиформ. 2019. 8 с.
4. ГОСТ 13451–77 Материалы полевошпатовые и кварцполевошпатовые для стекольной промышленности. Технические условия. ИПК Издательство стандартов. Москва. 5с.
5. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 416 с.
6. Исокжонов Ш. С. Особенности использования плавильных агрегатов для получения минерального расплава / Ш. С. Исокжонов, В. И. Матюхин, А. В. Матюхина. — Текст : непосредственный // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2024) с международным участием (Екатеринбург, 16–17 мая 2024 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2024. — С. 46-52.
7. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
8. Техника уплотнения стекольных шихт / В. И. Назаров, Р. Г. Мелконян, В. Г. Калыгин; Под общ. ред. О. С. Чехова. - Москва: Легпромбытиздат, 1985. - 126 с.
9. Распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 N 84-р (ред. от 13.10.2022) "Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и

потребления на период до 2030 года". – 2018. – 25 января.

10. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна//Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №5. С. 71-81.

УДК 667.6

Повишок Т.О.

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, Беларусь*

ПРИРОДНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ДЛЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

- Одним из методов получения нанодисперсных силикат углеродных частиц является высокотемпературная обработка органического сырья, который заключается в нагреве исходного сырья до заданной температуры, выдержки в течение определенного времени и за счет протекающих термодеструкционных процессов формирование наночастиц различной природы и активности. Достоинством данного метода является простота оборудования, необходимое сырье для получения наноразмерных частиц не требует сложной подготовки, возможность получения широкого спектра нанообъектов, отличающихся как по химическому составу, так и структуре и габитусу, что сказывается на активности наночастиц [1].

- С помощью метода термостимулированной деполяризации исследовали нанодисперсные частицы SiC, полученные из растительного сырья методом термолиза при высоких температурах (рисунок 1). Для оценки зарядового состояния применяли установку для измерения термостимулированных токов ST-1 [2].

•

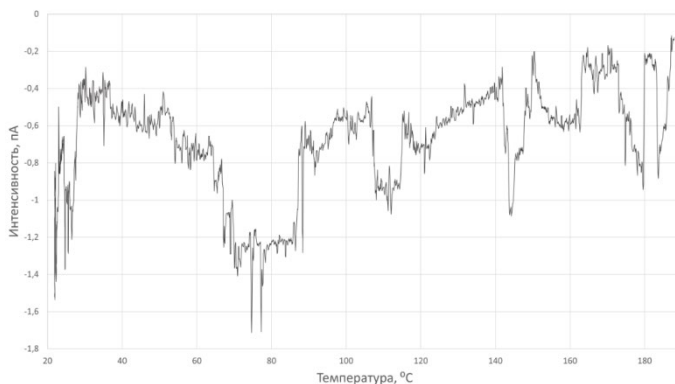


Рис. 1 – ТСТ-спектр наночастиц SiC, полученных методом термоллиза из природного сырья

Наличие пиков до 100 °С, предположительно, связано с удалением влаги, содержащейся в следствии адсорбции из окружающей среды. Появление нескольких интенсивных пиков в области 110–190 °С связано с появлением дополнительных носителей зарядов из-за высвобождения их из структурных ловушек, что говорит об высокой зарядовой активности исследуемых наночастиц SiC.

Ввиду высокой зарядовой активности исследуемых наночастиц SiC, смогли предположить, что данные наночастицы могут выступать в качестве модификатора лакокрасочных покрытий.

В камере порошковой окраски в соответствии с ГОСТ 9.401-2018 на стальные пластины (размером 60x150 мм) марки 08кп наносили полиэфирную порошковую краску с добавлением различных концентраций наномодификатора SiC.

• С помощью ножа-адгезиметра НА-1 Альфа-НДТ определяли адгезию лакокрасочного покрытия методом решетчатого надреза (рисунок 3) в соответствии с ГОСТ 31149-2014.

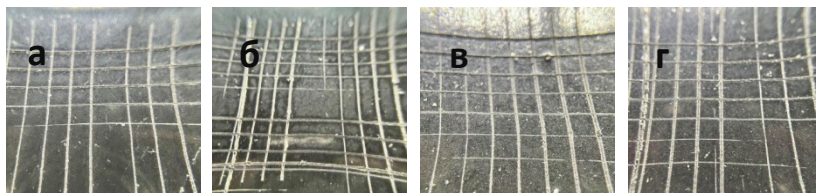


Рис. 3 – Макроснимки лакокрасочных покрытий, модифицированных наночастицами SiC с различными концентрациями: а – 0,5 % SiC; б – 1 % SiC; в – 2 % SiC; г – 5 % SiC

Оценку адгезии проводили визуально по степени повреждения покрытия, используя шкалу оценки испытаний лакокрасочных покрытий. Все опытные пластины оценили в 1 балл, т.е. с минимальным отслоением лакокрасочного покрытия, что свидетельствует о хорошей адгезии, которая является ключевым фактором, определяющим долговечность и защитные свойства лакокрасочного покрытия.

С помощью твердомера Durometer Shore A проводили испытания на твердость лакокрасочного покрытия в соответствии с ГОСТ 23273-78. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Твердость по Шору лакокрасочных покрытий, модифицированных наночастицами SiC с различными концентрациями

Концентрация наномодификатора SiC в лакокрасочном покрытии	0,5 %	1 %	2 %	5 %
Твердость по Шору (шкала А), кгс	93	92	94	85
	92	91	94	90
	93	92	92	88
	94	93	93	88
	93	92	91	92
	93	92	92	92
	91	93	92	91
	94	94	94	89
	92	88	93	90
	93	92	92	91
Среднее значение	93	92	92	89

Используя шкалы оценки твердости, по шкале А в диапазоне 80-90 кгс все опытные пластины можно отнести к твердым материалам. Но наибольшую твердость среди опытных пластин имеет лакокрасочное покрытие с концентрацией наномодификатора SiC 0,5 %.

Полученные данные указывают на перспективность исследований в области изучения свойств нанодисперсных частиц SiC природного происхождения в качестве модификаторов различного типа материалов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант №Т25МП-026).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Структура и морфологические особенности кремний углеродных частиц природного происхождения / Т. О. Повшок [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 2 кн. Кн. 1. Материаловедение: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2024. – С. 166-175.

2. Повшок, Т. О. Зарядовая активность содержащих кремний наночастиц, предназначенных для модифицирования полимерных матриц / Т. О. Повшок, С. А. Ядыкин // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке : материалы респуб. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 24 ноября 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: А. М. Малярович (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 348–350.

3. Структура и морфологические особенности кремний углеродных частиц природного происхождения / Т. О. Повшок [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 2 кн. Кн. 1. Материаловедение: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2024. – С. 166-175.

УДК666.945.6

Романюк А.М., Шпак Д.А., Сиволгин В.И.

Научный руководитель: Черкасов А.В., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АНГИДРИТА ПРИ ПОМОЛЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА

В условиях ужесточающихся требований к качеству строительных материалов особую актуальность приобретает поиск эффективных методов оптимизации технологий производства цемента. Значительный потенциал в этом направлении имеет применение минеральных добавок, вводимых при помоле клинкера, среди которых ангидрит (CaSO_4) представляет особый интерес как перспективный модификатор,

способный регулировать процессы твердения и формировать требуемые эксплуатационные характеристики цементного камня.

Отличительной особенностью ангидрита по сравнению с широко применяемым гипсом ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) является его пониженная растворимость, что обеспечивает более контролируемое воздействие на гидратацию основных клинкерных минералов. Включение данной добавки в состав цементной смеси существенно влияет на процесс структурообразования. Несмотря на очевидные технологические преимущества, вопросы влияния ангидрита на комплекс свойств цемента остаются недостаточно изученными, особенно в аспекте сравнительного анализа с другими сульфатсодержащими модификаторами.

В представленной работе проведено комплексное исследование влияния ангидритной добавки, вводимой при помоле цементного клинкера, на ключевые характеристики цемента: реологические свойства и механические показатели.

Цель данной научно-исследовательской работы состоит в изучении возможностей использования ангидрита для получения цементов.

Во время помола цемента, в цементной мельнице, необходимо исключить возможность образования полугидрата, образуемого из природного двуводного гипса, который при температуре 120°C переходит в полуводный, в готовом продукте. Для предотвращения данного эффекта тщательно контролируется температура в цементной мельнице. При помоле в промышленной мельнице температура не превышала 96°C , тем самым исключается образование полугидрата.

Дисперсность получаемого цемента в ходе эксперимента находилась в удовлетворительных пределах и не превышала допустимые значения, установленные ГОСТ. Это свидетельствует о том, что процесс помола был проведен корректно, а цементный порошок обладает оптимальной тонкостью помола, необходимой для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик. Соответствие дисперсности нормативным требованиям подтверждает качество цемента и его пригодность для использования в строительных работах. Данные по удельной поверхности представлены на рисунке 1.



Рис. 1 Дисперсность цемента

Химический состав цемента после помола в мельнице соответствует норме и представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав цемента после помола

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	N ₂ O
Ед. изм.	%	%	%	%	%	%	%	%
Помол	19,17	4,69	3,18	64,58	1,19	0,08	2,56	0,58
Отгрузка	19,12	4,66	3,19	64,61	1,19	0,08	2,53	0,58

Изменение содержания гипса, полугидрата, ангидрита на стадиях помола и отгрузки представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Изменение содержания веществ на стадии помола-отгрузки

	Гипс	Полугидрат	Ангидрит
Ед. изм.	%	%	%
Помол	0,9	0,46	2,12
Отгрузка	0,2	1,1	2,11

Химический состав цемента после отгрузки представлен в табл. 1. В момент отгрузки не было обнаружено признаков агрегирования цемента, что свидетельствует о его хорошей сыпучести и отсутствии комкования. Погрузка осуществлялась без задержек.

После помола цемента, была отобрана серия проб цемента, из которых готовились образцы для анализа на сжатие и сроки схватывания.

Прочностные характеристики цементных образцов соответствуют марочной прочности на 28 сутки. Данные представлены на рис. 2.

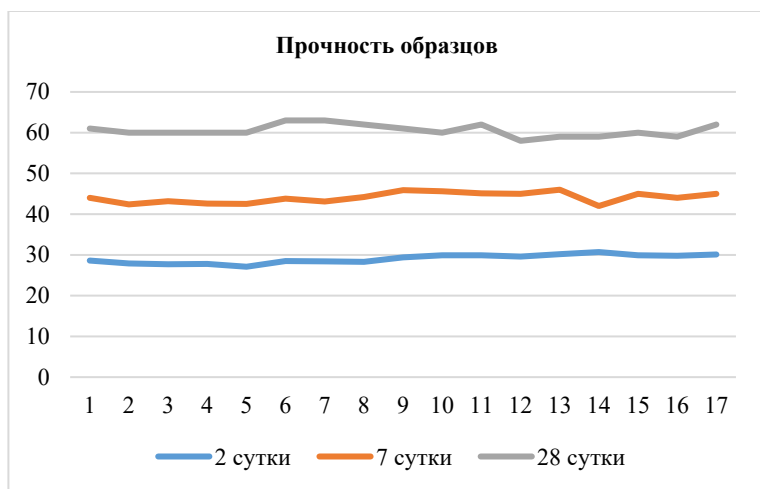


Рис. 2 Прочностные характеристики

Сроки схватывания и нормальная густота представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Нормальная густота и сроки схватывания

Контрольный образец с гипсом		Цемент/ ангидрит, %		
		95/5	95/5	95/5
Кол-во воды для затворения	25,1%	28,1%	27,9%	28,8%
Начало схватывания (ч-мин)	2-10	1-55	2-0	2-15
Конец схватывания (ч-мин)	3-15	3-0	2-50	3-20

Усредненные данные прочностных характеристик балочек представлены на рис.3.

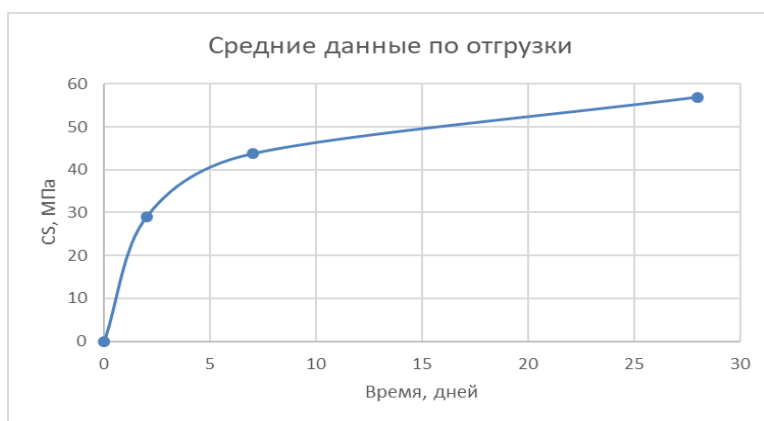


Рис. 3 Усредненные данные по прочности

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

Контроль параметров помола: Температура в процессе помола не превышала 96°C, что исключило образование полугидрата и обеспечило оптимальную дисперсность цемента, соответствующую требованиям ГОСТ. Это подтверждает корректность проведенного процесса помола и исключило образование полуводного гипса при помоле.

Химический состав: Содержание SO_3 и других компонентов оставалось в пределах нормы на всех этапах производства. Ангидрит продемонстрировал стабильность в составе цемента, что свидетельствует о его эффективности как добавки.

Реологические и механические свойства: Добавка ангидрита незначительно повлияла на сроки схватывания и нормальную густоту цемента, сохранив их в допустимых пределах. При этом прочностные характеристики цементных образцов соответствовали марочным значениям на 28-е сутки, что подтверждает сохранение высоких эксплуатационных свойств материала.

Технологические преимущества: Использование ангидрита позволило избежать агрегирования цемента при отгрузке, обеспечив его хорошую сыпучесть и удобство в транспортировке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. Учебник для вузов / Под редакцией Тимашева В.В. – М.: Высш. школа, 1980. – 472 с.
2. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента: краткий курс лекций: учеб.пособие. / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.
3. Теория цемента / Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С. и др. / Ред. Пашенко А.А. — К.: БудІвельник, 1991. - 168 с.
4. Шейкин А.Е. Роль сульфатных минерализаторов при помолце цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 56–61.

УДК 666.945.6

Сиволгин В.И., Романюк А.М., Шпак Д.А.

*Научный руководитель: Коновалов В.М. канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ВЛИЯНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

Ископаемое топливо (уголь, нефть, природный газ) до сих пор остаётся основным источником энергии в мире. Если уголь и газ могут применяться практически в природном состоянии, то нефть, сланцы и битуминозные пески нуждаются в переработке перед использованием. Эти ресурсы встречаются в трёх агрегатных состояниях: твёрдом,

жидком и газообразном. Однако их ограниченные запасы, высокая стоимость и, главное, негативное влияние на экологию заставляют искать более устойчивые энергетические альтернативы, особенно для промышленных систем, зависящих от углеводородов.

Переход на альтернативное топливо в цементной промышленности дает значительный экологический эффект. Во-первых, сокращается объем отходов, направляемых на полигоны. Во-вторых, уменьшается потребление традиционных ископаемых энергоресурсов. Например, европейские цементные предприятия за счет использования альтернативного топлива ежегодно экономят около 2,5 миллионов тонн угля. Статистика по странам Европы показывает различную степень внедрения этой технологии - от 1% в Испании до 52,4% во Франции.

Экономические преимущества такого подхода очевидны: альтернативное топливо обычно дешевле традиционного, что снижает себестоимость продукции. Кроме того, сжигание отходов непосредственно в цементных печах позволяет избежать дополнительных выбросов, которые неизбежны при их утилизации на специализированных мусоросжигательных заводах. Это особенно важно в свете ужесточения экологического законодательства и роста штрафов за выбросы углекислого газа.

Таким образом, использование альтернативных видов топлива в цементной промышленности представляет собой удачное сочетание экономической выгоды и экологической ответственности. Этот подход не только снижает производственные затраты, но и вносит существенный вклад в решение проблемы переработки отходов, способствуя развитию экономики замкнутого цикла.

Целью работы является изучение влияния альтернативных топлив на минералообразование при обжиге цементного клинкера, а также установление физико-механических свойств цементного камня на их основе. Дополнительно оцениваются экономический и экологический эффект от использования данных топлив.

Проведенный анализ химического состава показал, что массовая доля щелочных оксидов (R_2O) в исходной сырьевой муке и компонентах не превышает допустимых значений и составляет 0,28% (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав сырьевой муки, %

$$LSF = 99,25 \% \quad SR = 2,51\% \quad |AR = 1,41\%$$

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП	Сумма
13,45	3,14	2,22	42,46	2	0,19	0,28	36,26	100

Однако в зольном остатке (табл. 2), образующемся при сжигании твердых бытовых отходов (ТБО) и донного ила, зафиксировано повышенное содержание щелочных оксидов (2,47% R_2O) и оксида серы (7,26% SO_3). Данный химический состав способствует интенсивному образованию настывлей и кольцевых отложений в рабочем пространстве вращающейся печи, что является технологическим ограничением для применения указанных видов альтернативного топлива в производственном цикле.

Таблица 2. Химический состав золы и калорийность альтернативного топлива

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП	Прочие	Калорийность, КДж/кг
Донный ил	39,02	14,44	6	12,65	3,2	7,26	2,47	5,42	9,54	10600
ТБО	45	10	3	14	2	6,2	2,22	8,4	11,18	15173

В условиях цементного завода был произведен обжиг сырьевой муки с использованием альтернативного топлива, а также его отсутствием. Были сняты технологические параметры для сравнения условий, после чего были получены следующие результаты (рис. 1):

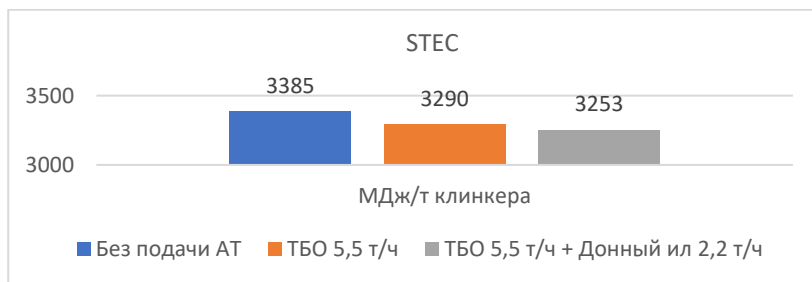


Рис. 1 Удельный расход топлива (СТЕС) при традиционной работе (без АТ) и подаче АТ.

В стандартном режиме работы (без альтернативного топлива) удельный расход составил **3385 МДж на тонну клинкера**. Однако при использовании мусора в количестве **5,5 т/ч** этот показатель снизился до **3290 МДж/т** при аналогичных условиях эксплуатации печи, что дало экономию **95 МДж/т (2,8%)**. Дополнительная подача **2,2 т/ч донного**

ила позволила сократить расход ещё на **37 МДж/т (1,12%)**. В итоге общее снижение энергозатрат достигло **132 МДж/т клинкера (3,92%)**.

Рассмотрим влияние альтернативного с экологической стороны. Во время обжига сырьевой муки с использованием разных альтернативных топлив (технологические параметры обжига при разных условиях представлены выше пункт 3.2) была произведена фиксация поточным газоанализатором, стоящим на трубе, следующих газов:



Рис. 2 Рисунок 3.3.1 Содержание отходящих газов при подаче альтернативных топлив

Использование донного ила и ТБО в цементной печи на фоне природного газа:

- **Снижает углеродный след** (часть CO₂ – биогенная)
- **Резко увеличивает NOx и CO** (критично для соблюдения нормативов)
- **Требует доработок:** очистка газов, оптимизация подачи и более тщательная подготовка альтернативного топлива.

Для промышленного применения нужны дополнительные меры контроля. Использование каталитических фильтров или адсорбентов при необходимости.

В промышленных условиях был проведен помол клинкера с настывшими из загрузочной части циклонного теплообменника (райзер дакт). Затем проводилось затворение цементов водой с В/Ц=0,28, после чего происходило формование для получения образцов-кубиков, имеющих площадь граней 1,41×1,41×1,41 см. На рис. 3 представлены результаты испытаний на прочность с рядовым цементом ЦЕМ I 42,2N:

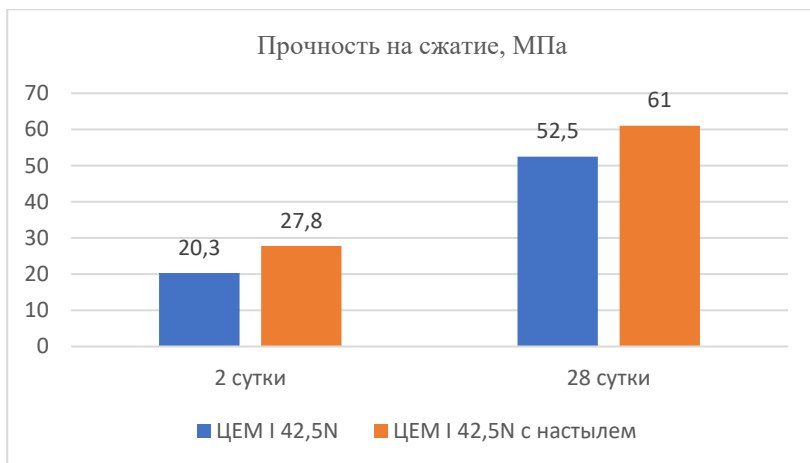


Рис. 3 Прочность на сжатие образцов цемента на 2 и 28 сутки

ЦЕМ I 42,5 N с настылем демонстрирует более высокую прочность на ранних сроках (27,8 МПа через 2 суток) по сравнению с обычным ЦЕМ I 42,5 N (20,3 МПа). На 28 суток ЦЕМ I 42,5 N с настылем показывает лучший результат (61 МПа), чем рядовой цемент ЦЕМ I 42,5 N (52,5 МПа). Это говорит о том, что настыль ускоряет набор прочности в первые дни и показывает больший результат на 28 суток.

В результате работы можно сделать следующие выводы:

1. В составе исходной сырьевой муки и в сырьевых компонентах содержание щелочных оксидов R₂O находится в допустимых значениях 0,28%. Содержание в золе после сгорания ТБО и донного ила содержится повышенное щелочных оксидов R₂O (2,47%) и SO₃ (7,26%), это ограничивает подачу альтернативного топлива из-за образования настылей и колец во вращающейся печи.

2. Использование альтернативного топлива (мусора и донного ила) приводит к снижению удельного расхода топлива при производстве клинкера. При подаче 5,5 т/ч мусора экономия составила **95 МДж/т (2,8%)**, а при дополнительной подаче 2,2 т/ч донного ила — ещё **37 МДж/т (1,12%)**. Общая экономия топлива достигла **132 МДж/т клинкера (3,92%)**, что подтверждает эффективность применения альтернативных видов топлива.

3. Экологический эффект неоднозначен, с одной стороны, использование донного ила и ТБО снижает зависимость от ископаемого топлива и уменьшает углеродный след благодаря биогенной

составляющей CO₂. А с другой – резко возрастают выбросы вредных веществ (NO_x, CO), что требует дополнительных мер по очистке.

4. ЦЕМ I 42,5 N с настилом демонстрирует более высокую прочность на сжатие по сравнению с обычным цементом: 27,8 МПа против 20,3 МПа через 2 суток и 61 МПа против 52,5 МПа через 28 суток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. Учебник для вузов / Под редакцией Тимашева В.В. – М.: Высш. школа, 1980. – 472 с.

2. Теория цемента / Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С. и др. / Ред. Пашенко А.А. — К.: Будівельник, 1991. - 168 с.

3. Малец В., Подлузский Е. Проблемы энергосбережения в производстве строительных материалов. Архитектура и строительство, № 9, 2007 г., стр. 52-54.

4. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента: краткий курс лекций: учеб.пособие. / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.

УДК 666.1.03

Скворцов А.А., Скворцова И.Д.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОКА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

В технологии стеклоизделий ключевую функцию выполняет стекловаренная печь. Так как печь является самым дорогостоящим агрегатом в сравнении с другим технологическим оборудованием, ее правильное проектирование и эксплуатация для предприятий производителей представляют собой первоочередные задачи. В интересах предприятий обеспечивать наиболее длительную кампанию стекловаренной печи [1]. Правильная ее эксплуатация является важной составляющей для продления службы печи, но все-таки гораздо большее влияние на срок ее службы закладывается на этапе проектирования конструкции. При этом важно оптимизировать не только геометрию отдельных узлов и элементов печи, но и грамотно

выбирать огнеупоры и теплоизоляционные материалы, из которых выполняют кладку печи.

Основными уязвимыми местами стекловаренной печи являются: палисад по уровню стекломассы, подпьютовые блоки, на которые опираются секции свода, влеты горелок, проток и косоуры загрузочных карманов. Из перечисленных элементов стекловаренной печи наиболее уязвимой частью является протоки любой конструкции, поскольку скорость движения стекломассы через это разделительное устройство достигает до 15-20 м/ч, а скорость стекломассы осевого потока в бассейне печи составляет всего 3-5 м/ч. Поэтому подбор наиболее эффективной конструкции протока для стекловаренной печи определенной производительности и химического состава навариваемой в ней стекломассы является в стекольной отрасли важной задачей. Все эти места должны тщательно проектироваться, так как наиболее подвержены износу, это связано с тем, что в этих местах происходит движение стекломассы или аэродинамических потоков воздуха [2].

В данной работе приведены результаты анализа известных конструкций протоков, на основании которых предлагается усовершенствованная его версия.

В различных конструкциях протоков используются следующие сырьевые материалы: для самого протока и стакана используются огнеупорные плавленололитые бадделеитокорундовые изделия преимущественно марок БК-37 и БК-41, некоторые заводы используют китайские аналоги AZS-37 и AZS-41. В качестве теплоизоляции для протока используют шамотные или диасовые изделия разных марок, некоторые конструкции обходятся без тепловой изоляции, что обеспечивает более эффективное охлаждение огнеупоров протока.

Геометрические размеры протока рассчитываются индивидуально под каждую стекловаренную печь, так как связаны с такими показателями, как удельный съем (кг стекломассы с метра квадратного в сутки) или максимальная суточная производительность печи по навариваемой стекломассе.

Охлаждение ответственных участков печи (палисад на уровне стекломассы) тоже подбирается в зависимости от условий эксплуатации. Так в начале срока эксплуатации стекловаренной печи многие предприятия используют минимальное охлаждение, для того чтобы избежать большой разницы температур и продлить срок службы протока. Ближе к концу компании объем охлаждения увеличивается, так как стекломасса разъедает огнеупор [3].

Первая для рассмотрения конструкция, представленная на рисунке 1, достаточно распространена и встречается во многих итальянских и немецких проектах стекловаренных печей

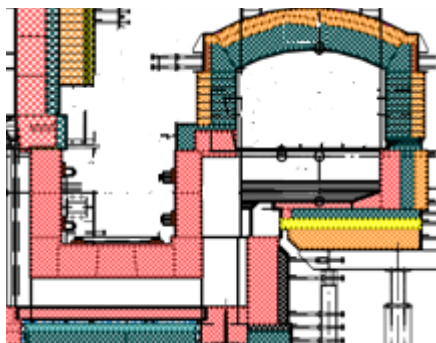


Рис. 1. Первый вариант раскладки

Красным цветом обозначены - плавнелитые бадделеитокорундовые изделия, зеленым высокоглиноземистые, желтым огнеупорный бетон, оранжевым шамотная теплоизоляция.

Конструкция сделана таким образом, что стекломасса находящиеся в бассейне по принципу сообщающихся сосудов через колодец попадает в выработочный канал. Проектная раскладка представляет собой бакоровые бруссы, так как кладка непосредственно контактирует со стекломассой. При такой конструкции основная нагрузка приходится на боковые стены колодца и все кладку протока. Поточное движение стекломассы при данной конструкции не происходит. Этот вариант протока достаточно хорошо себя зарекомендовал и до сих пор используется во многих новых проектах. Но с другой стороны этот вариант конструкции имеет существенный недостаток, его очень неудобно ремонтировать и обслуживать по причине того, что расстояние между бассейном стекловаренной печи и выработочным каналом получается маленьким [4].

Конструкция протока с поднимающимся подом более современная, она массово стала использоваться в стеклоделии не более, чем 15 лет назад (рисунок 2).

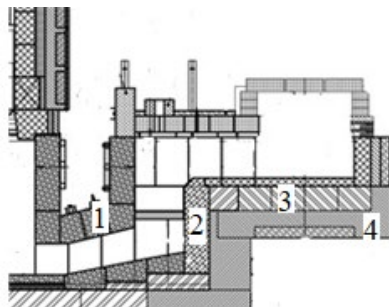


Рис. 2. Второй вариант конструкции

1 – плавленолистые изделия марки БК-37; 2 - плавленолистые изделия марки БК-41; 3 - высокоглиноземистые изделия марки МЛС-62; 4 – шамотная изоляция марки ШСУ-40

В процессе совершенствования конструкций стекловаренных печей был предложен этот вариант. Поскольку из-за изменения формы «стакана» увеличивается его ширина, что позволяет повысить производительность данной конструкции по сравнению с предыдущей [5].

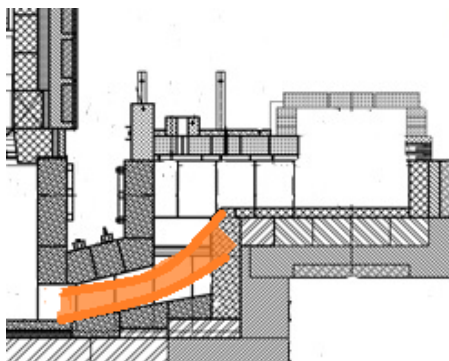


Рис. 3. Распределение потока стекломассы во втором варианте конструкции

Эта конструкция так же состоит из бакоровых брусьев, так как кладка непосредственно контактирует со стекломассой. При таком варианте конструкции, рисунок 3, помимо нагрузки на стены колодца и проток, так же идет дополнительная нагрузка на верхние брусья протока и фасонный брус который установлен в верхней части колодца. Это со временем приводит к разъеданию верхней части протока и фасонного

бруса так как активный поток гораздо быстрее разъедает огнеупорную кладку, чем в первом варианте. Что приводит к необходимости дальнейших ремонтов протока стекловаренной печи, например, установки бакоровой плитки на перекрывные брусья протока и полную замену фасонного бруса [6]. Представленная на рисунке 2 конструкция в целом не является совершенной, так как после деформации фасонного бруса стекломасса попадет под низ бакоровой плитки, выложенной на выработочном канале. Далее происходит разъедание менее устойчивых огнеупоров, чем бакор. Все это может привести к аварийной ситуации, поэтому эту конструкцию желательно усовершенствовать установкой цельного бакорового бруса и дополнительным рядом бакоровой плитки в выработочном канале. (рис 4) [7].

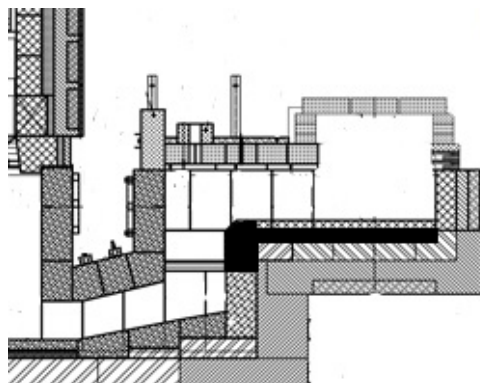


Рис. 4. Предлагаемая усовершенствованная конструкция протока
1 – плавленололитые изделия марки БК-37 ; 2 - плавленололитые изделия марки БК-41; 3 –огнеупорная бетонная смесь БЦ-5; 4 – шамотная изоляция марки ШСУ-40.

Исходя из анализа технических решений конструкций протоков и раскладки огнеупоров предлагаемое усовершенствование конструкции заключается в следующих предложениях:

- во-первых, использовать более качественные марки огнеупора (БК-41) и увеличить толщину фасонного бруса;
- во-вторых, использовать плитку на выстилке выработочного канала толщиной не менее 150 мм;
- в-третьих, заменить высоко глинозёмистый огнеупор на огнеупорную бетонную смесь, которая характеризуется фазовым составом, включающим корунд, муллит, баделлеит и тугоплавкую стеклофазу [8].

Таким образом, в результате проведенного анализа, наилучшей конструкцией для стекловаренных печей с меньшей производительностью наиболее эффективной будет являться первая конструкция, так как она дешевле в стоимости (по причине отсутствия фасонных блоков и огнеупорного корундового цемента) и проще в эксплуатации. Вторая конструкция будет более эффективна в высокопроизводительных печах с большим удельным съёмом. Поскольку температуры стекла до протока достигают порядка 1300-1350 °С, а после протока порядка 1200-1300°С и движение стекломассы очень быстрое, по сравнению с другими местами стекловаренной печи, использование в его конструкции лучших огнеупорных материалов обязательно. Используемые в протоке плавнелитые бадделеитокорундовые изделия должны быть марок БК-41 или AZS-41, желательно полнотелые, без усадочных раковин и шлифованные с обеих сторон. Плитка на выработочном канале должна быть изготовлена из огнеупора БК-37 или БК-41, а огнеупорный корундовый цемент – марки БЦ-5. Вторая конструкция в целом перспективнее особенно с учетом предлагаемых доработок, но при этом более дорогостоящая, так же ее удобнее обслуживать и ремонтировать из-за большего расстояния между торцевой стеной бассейна и выработочным каналом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осипов В. И. Российский рынок производства стекла: проблемы и перспективы развития //Стеклопакет. — 2003. — №9. — С. 1 - 4.
2. Давкина Н. А. Обзор стекловаренных печей //Ответственный редактор. —2022. —С. —117.
3. Яндачек П., Ковач М., Онищук В.И., Зозуля Ю.Г., Костенко С.Е. Моделирование энергоэффективных стекловаренных печей //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. —2014. —№. 5. — С. 169-175.
4. Костенко С. Е., Онищук В. И., Жерновая Н. Ф. Современные стекловаренные печи и пути повышения их технико-экономических показателей //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. —2010. —№. 3. —С. 128-131.
5. Костенко С. Е., Онищук В. И., Жерновая Н. Ф. Теория и практика физического моделирования движения стекломассы в

варочном бассейне печи //Техника и технология силикатов. — 2012. — С. 27.

6. Дзюзер, В. Я. Теплотехника и тепловая работа печей: Учебное пособие / В. Я. Дзюзер. Санкт-Петербург : Издательство "Лань". — 2023. — С. 384.

7. Кличова Ш. А. Особенности современных стекловаренных печей //Вестник науки. — 2023. — Т. 4. №. 10 (67) . — С. 589-593.

8. Ковчур, С. Г. К вопросу о комплексном подходе к повышению эффективности работы стекловаренных печей и улучшению качества стекла / С. Г. Ковчур, А. П. Гайдук // Стекло, ситаллы и силикаты: республиканский межведомственный сборник. Минск : Вышэйшая школа. — 1977. — Вып. 6. — С. 159-164.

УДК 666.1.001.5

Скворцова И.Д., Скворцов А.А.

Научный руководитель: Бондаренко Н.И., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ ОКРАШИВАНИЯ СТЕКЛА ОТ ОВП ШИХТ

В производстве стеклянной тары важным аспектом для производителя является повышение качества производимой продукции без повышения ее цены для предприятия. Так, для изделий из бесцветного стекла важными потребительскими качествами является цвет и прозрачность стекла. Цветные оттенки или низкая светопропускаемость снижают потребительские качества стеклянной тары, а в ряде случаев бывают недопустимы, поэтому в производстве большое внимание уделяют химическому составу применяемого сырья, в том числе содержанию оксидов железа. Так же внимание уделяется процессу обесцвечивания стекломассы, так как стабильность протекания этих процессов оказывает большое влияние на потребительские свойства стеклянной тары [1].

Покупка сырьевых материалов с низким содержанием оксидов железа требует немалых вложений, что значительно повышает стоимость конечной продукции. Однако затрат на покупку такого сырья можно избежать, если качественно обесцвечивать стекломассу, тем самым получая значительную экономию в производстве.

Примеси оксидов железа в сырье дают в зависимости от степени окисления различные цвета от желто-зеленого до сине-зеленого.

Как видно из уравнения реакции, условия равновесия зависят от факторов, повышающих или понижающих количество кислорода в стекломассе. Так, в присутствии окислителей реакция будет сдвигаться в сторону образования оксида железа (III), который наименее интенсивно окрашивает стекло. Соответственно, в данной реакции очень важна роль ионов кислорода, который вводится в расплав стекла за счёт различных окислов [2].

Исходя из современного понимания стекла, его базовые компоненты в процессе стекловарения образуют окислительно-восстановительную среду. Такая среда представляет собой расплав, состоящий из кремне- и алюмокислородных анионов различной степени сложности, катионов щелочных и щёлочноземельных металлов, а также ионов кислорода, которые бывают связаны с ионами кремния или свободными.

В оксидных расплавах именно свободные ионы кислорода выполняют роль доноров электронных пар, что позволяет регулировать соотношение оксида железа (III) и оксида железа (II), через соотношение ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$. Таким образом, выявляется прямая зависимость содержания свободных анионов кислорода, иначе говоря окислительно-восстановительного потенциала стекломассы от содержания в ней оксида железа (II), который дает ей яркий цвет [3]. Соответственно, повышение ОВП стекломассы позволит улучшить ее цветовые характеристики, что значительно повысит качество изделия в глазах конечного потребителя, при этом не повышая затраты на закупку сырьевых материалов с низким содержанием оксида железа (II).

Для повышения окислительно-восстановительного потенциала стекла возможно использовать такие кислородосодержащие соединения как: оксид мышьяка, натриевая или калиевая селитра, а также оксиды церия или марганца.

Но использование селитры для смещения равновесия между ионами $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ нецелесообразно, так как значительная часть кислорода удаляется из нее еще до стадии стеклообразования с печными газами, что делает ее использование в чистом виде нерациональным [4].

Для полноценного использования кислорода селитры в состав стекла добавляют оксид мышьяка. Это объясняется тем, что выделяющийся при сравнительно низких температурах кислород селитры, окисляет As_2O_3 до As_2O_5 , который при высоких температурах диссоциирует с выделением свободного кислорода и As_2O_3 , таким образом сохраняя кислород селитры до необходимого момента. Но не смотря на свою эффективность этот метод практически не применяется из-за ряда нежелательных побочных последствий.

Стекла, содержащие мышьяк, желтеют под действием солнечных лучей, из-за чего теряют свою светопропускаемость даже при кратковременном интенсивном воздействии УФ-излучением.

Кроме того, соединения мышьяка крайне токсичны и их использование требует мер повышенной безопасности при вводе их в шихту. И основным их недостатком является нецелесообразность использования данных соединений, так как при попытке обесцвечивания стекломассы с содержанием железа более 0,07%, количество вводимого оксида мышьяка, необходимого для обесцвечивания, становится настолько большим, что влечет за собой появление большого количества пузырей в стекломассе, удаление которых требует длительного времени [5].

Более эффективным вариантом обесцвечивания стекла через повышение ОВП, является введение в состав шихты оксида церия (IV). Принцип работы данного химического обесцвечивателя примерно такой же, как и оксида мышьяка, однако его применение не дает нежелательных побочных действий. Даже более того, он способствует осветлению стекломассы [6].

Таким образом, окислительно-восстановительный потенциал стекла имеет прямо пропорциональное влияние на химическое обесцвечивание стекла через равновесие между ионами $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$. Повышение окислительно-восстановительного потенциала стекла позволяет сместить равновесие в сторону Fe^{3+} , который в меньшей степени влияет на цвет стекла, чем ион Fe^{2+} . Данное утверждение может быть эмпирически доказано. В частности, был проведён эксперимент по изменению окислительно-восстановительного потенциала стекла, в результате которого были получены зависимости (рис.1 и рис.2).

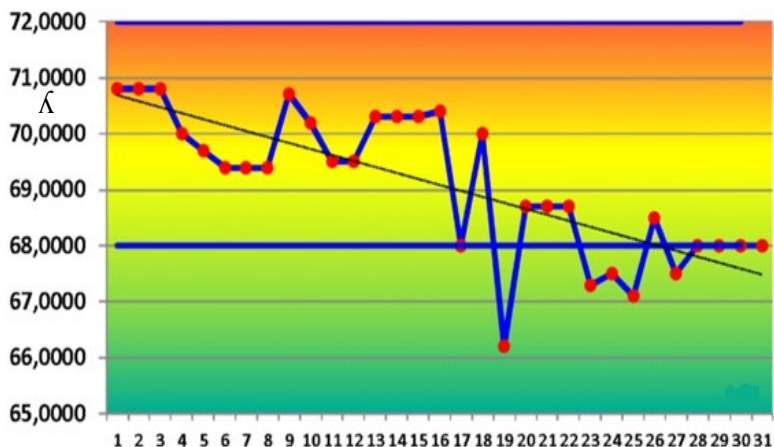


Рис. 1. Изменение длины волны цвета стекла.

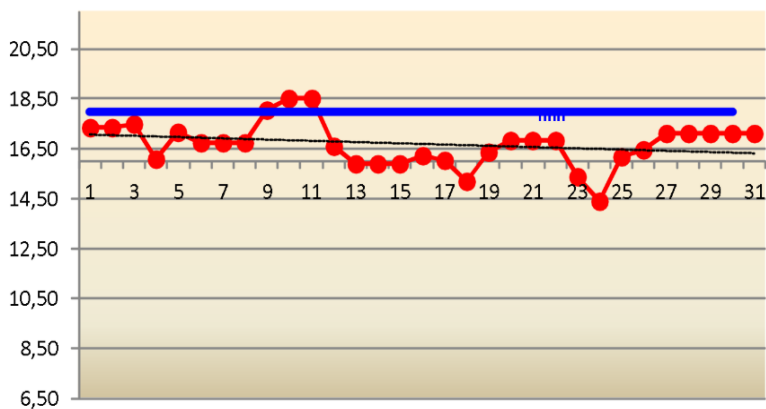


Рис. 2. Изменение ОВП стекла.

На основании анализа рис. 1 и рис. 2, установлена точная зависимость между окислительно-восстановительным потенциалом и окраской стекломассы. Данный вывод позволяет утверждать, что высокая стоимость исходных материалов не всегда гарантирует высокое качество стекла с точки зрения цветовых характеристик. Оптимизация показателя окраски значительно более эффективно осуществляется посредством правильной регулировки окислительно-восстановительного потенциала с учетом свойств применяемого сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власова, С. Г. Основы химической технологии стекла: Учебное пособие / С. Г. Власова. Екатеринбург: Уральский федеральный университет — 2013 — 108 с.
2. Минько, Н. И. Влияние окислительно-восстановительного потенциала шихты на процессы варки и свойства стекол / Н. И. Минько, И. И. Морозова // Стекло и керамика — 2014 — № 7 — С. 8-11.
3. Стабилизация спектральных характеристик и технологии стекла / Н. И. Минько, А. Б. Аткарская, А. А. Мягкая, И. В. Третьяков // Стекло и керамика — 2011 — № 3 — С. 18-21.
4. Гулоян Ю. А. Условия превращений и равновесия оксидов железа при варке стекол // Стекло и керамика. 2004. № 1. С. 3 - 5.
5. Панкова Н. А., Левитин Л. Я., Александрова И. В., Горина И. Н. Методы стабилизации содержания оксидов железа в составе стекла // Стекло и керамика — 1980 — № 1 — С. 4 - 5.
6. Жерновая Н. Ф., Минько Н. И., Онищук В. И., Мельникова Л. И. Влияние окислительно-восстановительных потенциалов шихты и стеклобоя на окраску промышленных составов стекол, содержащих оксиды железа // Стекло и керамика — 2000 — № 3 — С. 11 - 13.

УДК 666.792.2

*Смагина А.Р., Дудина Е.И., Пономарева П.С.
Научный руководитель: Трепалина Ю.Н., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЕРАМИЧЕСКОЙ И БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗОК В АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

В абразивной обработке важнейшую роль играет выбор связки шлифовального круга, так как она определяет его механические свойства, износостойкость, теплопроводность и способность сохранять рабочую форму. Среди наиболее распространенных типов связок выделяются керамическая и бакелитовая. Каждая из них обладает своими преимуществами и ограничениями, что определяет их применение в различных технологических процессах.

Керамическая связка изготавливается из смеси огнеупорной глины, полевого шпата, кварца и других сырьевых компонентов. В процессе обжига при температуре 1000–1300 °С связующие

компоненты спекаются, образуя прочную стекловидную структуру [1,2].

Преимущества керамической связки:

Круги на керамической связке медленно изнашиваются и хорошо сохраняют свою форму, что особенно важно при точных шлифовальных операциях.

Пористая структура способствует хорошему отводу тепла, предотвращая перегрев как круга, так и обрабатываемой детали.

Керамические круги устойчивы к большинству охлаждающих жидкостей, включая агрессивные щелочные растворы.

Продолжительный срок службы. За счет высокой износостойкости они оказываются более экономичными при длительном использовании.

Недостатки керамической связки:

Круги на керамической связке чувствительны к ударам и механическим нагрузкам, что повышает риск разрушения.

Технология требует точного соблюдения режимов обжига, что удлиняет процесс изготовления.

Из-за высокой жесткости такие круги не всегда подходят для обработки сложных геометрических форм.

Основные этапы производства:

Подготовка шихты. Включает смешивание абразивного зерна с компонентами связки и увлажнение смеси.

Формование. Используются прессовочные методы с давлением 100–300 кгс/см², обеспечивающие равномерную плотность заготовки.

Сушка. Проводится при 80–150°C для удаления влаги перед обжигом.

Обжиг. При 1000–1300°C происходит спекание компонентов, что формирует окончательную структуру связки.

Финальная обработка. Включает шлифовку, балансировку и контроль качества.

Керамическая связка незаменима в операциях прецизионного шлифования деталей из закаленной стали, чугуна и твердых сплавов. Используется в металлообработке, где критичны стабильность формы круга и высокая точность обработки [3,4].

Бакелитовая связка основана на термореактивных фенольных смолах, которые при нагреве полимеризуются, формируя прочную, но при этом эластичную матрицу.

Преимущества бакелитовой связки:

Круги на бакелитовой связке менее подвержены разрушению при динамических нагрузках, что делает их идеальными для резки и обдирки.

Позволяет изготавливать круги разной толщины и геометрии, включая тонкие прорезные инструменты.

Бакелитовые круги позволяют работать с большими скоростями резания, что сокращает время обработки.

Связка равномерно разрушается, поддерживая стабильную режущую способность круга.

Недостатки бакелитовой связки:

При температурах выше 250–300 °С связка начинает разрушаться, что снижает срок службы круга.

Некоторые виды охлаждающей жидкости могут разлагать фенольную смолу, что приводит к потере прочности.

По сравнению с керамическими, бакелитовые круги изнашиваются быстрее, особенно при тяжелых режимах работы.

Бакелитовые круги широко применяются в операциях резки, грубого обдирочного шлифования и обработки материалов с высокой ударной нагрузкой. Они востребованы в металлорежущей и инструментальной промышленности.

Основные этапы производства:

Подготовка шихты. Абразивные зерна смешиваются с бакелитовой смолой и возможными наполнителями.

Прессование. Выполняется под давлением 50–200 кгс/см² при температуре 150–200°С.

Полимеризация. Проводится при 150–250°С, в результате чего бакелит затвердевает.

Финальная обработка. Включает калибровку, шлифование и возможную пропитку специальными составами.

Сравнительный анализ производства и эксплуатационных характеристик

Производственные процессы керамических и бакелитовых кругов различаются по температурным режимам, временным затратам и конечным свойствам связки.

Таблица 1 - Техническое сравнение связок

Характеристика	Керамическая связка	Бакелитовая связка
Температура обработки	1000–1300°C (обжиг)	150–250°C (полимеризация)
Прессование	100–300 кгс/см ²	50–200 кгс/см ²
Твердость	Высокая	Средняя
Гибкость	Низкая (хрупкость)	Высокая (эластичность)
Износостойкость	Высокая	Средняя
Термостойкость	Высокая	Ограничена 250–300°C
Прочность на удар	Низкая	Высокая
Водостойкость	Высокая	Ограничена (чувствительность к ОЖ)
Скорость изготовления	Дольше (из-за обжига)	Быстрее (из-за термообработки)
Область применения	Точное шлифование, обработка твердых сплавов	Резка, обдирочное шлифование

Керамическая связка требует длительного обжига, но обеспечивает высокую жесткость и термостойкость. Бакелитовая связка менее устойчива к высоким температурам, но производится быстрее и обладает лучшей ударопрочностью. Таким образом, выбор технологии зависит от требований к прочности, термостойкости и долговечности инструмента [5,6].

Выбор связки должен основываться на конкретных требованиях производства. Если важны точность, стабильность формы круга и долговечность, оптимальным вариантом будет керамическая связка. Она идеально подходит для точных шлифовальных операций, особенно в металлообработке и инструментальном производстве.

Если же требуется высокая ударопрочность, гибкость и скорость обработки, бакелитовая связка окажется более подходящим решением. Она лучше справляется с резкой и грубым шлифованием, но быстрее изнашивается.

Обе связки находят широкое применение в промышленности, дополняя друг друга. Керамическая связка обеспечивает долговечность и точность, тогда как бакелитовая связка выигрывает за счет скорости работы и ударопрочности. Важно учитывать не только механические свойства круга, но и его взаимодействие с рабочей средой, температурные нагрузки и требуемую производительность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов В.М., Кузнецов В.В., Лебедев В.А. Технология и оборудование производства абразивных материалов. Москва: Машиностроение, 2005. - 215 с.
2. Производство абразивных материалов / А. С. Полубелова, В. Н. Крылов, В. В. Карлин и др., Под ред. В. Н. Крылова. Л: Машиностроение, 1968. - 296 с.
3. Горбунов А.В., Лебедев В.А., Лебедева Е.В. Абразивные материалы и технологии. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 87 с.
4. Глазовский Б. А., Роиштейн Г. М., Яшин В. А. Контрольно-измерительные приборы и основы автоматизации производства абразивных инструментов. Л.: Машиностроение, 1980. – 72 с.
5. Кузнецов В.В., Лебедев В.А., Лебедева Е.В. Технология и оборудование производства абразивных материалов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 163 с.
6. Бондаренко Д.О., Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Изюфатова Д.И., Дюмина П.С., Волошко Н.И. Энергосберегающая технология получения силикат-глыбы для производства жидкого стекла // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. - С. 111–115.

УДК 666.94

Черных А.А.

Научный руководитель: Ерыгина А.О. асс.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЦЕМЕНТНОГО ЗАВОДА СУХОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА В ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

На данный момент строительство цементных заводов остается одной из наиболее актуальных и значимых задач современной промышленности в Российской Федерации. Результат этого процесса способствует экономическому развитию регионов, но и также играет ключевую роль в удовлетворении потребности растущего спроса на строительные материалы.

В условиях глобальных тенденций к урбанизации и инфраструктурному развитию регионов, цементная промышленность

продолжает оставаться важным элементом в строительной отрасли.

Целью данной работы является исследование возможных перспектив строительства цементного завода, работающего по сухому способу в Иркутской области.

Для рассмотрения возможности строительства цементного завода сухого способа производства в Иркутской области необходимо исследовать и систематизировать информацию о известных месторождениях сырьевых материалов.

По данным книги [2] можно отметить, что Иркутская область обладает запасами нерудного сырья, пригодного для производства всех основных видов строительных материалов и считается обеспеченным регионом Российской Федерации по количеству балансных запасов различных сырьевых материалов.

В пределах области разведано несколько месторождений, сырье которых может быть применимо в производстве цемента. К ним можно отнести следующие месторождения (Табл. 1).

Таблица – Характеристика клинкеров и параметры охлаждения

Наименование месторождения и балансные запасы, млн.тонн				
Венгерское	Слюдянское	Каймановское	Тюменское	Шаманское
313	142	60	18	13,5

Венгерское месторождение известняка и глин располагается в Тайшетском районе, вблизи железнодорожной магистрали Абакан — Тайшет. Балансовые запасы цементного сырья по категориям А+В+С₁ составляют 77 млн. т, по категории С₂ — 236 млн. т. 2.

Слюдянское (Перевальское) месторождение мраморизированного известняка. Находится в 7 км к юго-западу от железнодорожной станции Слюдянка-II. Балансовые запасы цементного сырья по категориям А+В+С₁ и составляют 108 млн. т, по категории С₂ — 34 млн. т. На основе Слюдянского месторождения на данный момент работает горнорудное предприятия «Перевал», которое также является частью Ангарского цементно-горного комбината.

Каймоновское месторождение представлено известняком. Располагается в Усть-Кутском районе, вблизи железнодорожной магистрали Тайшет-Лена (в 1-3 км к востоку от ст. Каймоново). Балансовые запасы цементного сырья составляют 60 млн. т.

Тюменское месторождение представлено цементной глиной. Находится в Усольском районе, в 23 км к северо-западу от Ангарска. Балансовые запасы цементного сырья по категориям А+В+С₁ составляют 13 млн. т, по категории С₂ - 5 млн. т.

Для получения цемента также необходимо рассмотреть

возможность поставок гипса. В целом геологические ресурсы гипса в Иркутской области приблизительно составляют 1,5 млрд. т., что позволяет обеспечивать им предприятия Иркутской области и поставлять его в другие регионы. На данный момент разведаны мощные пласты гипса на левом берегу Ангары (Усть-Шалотское месторождение, но это месторождение попало в зону затопления Братской ГЭС). Также известны месторождения гипса в ближайших районах Иркутской области вблизи пос. Култук, возле ст. Половина, по рр. Илим и Илге в Тайшетском районе [2].

Предполагаем, что предприятие ПАО «Коршуновский ГОК» может обеспечивать поставку сталеплавильного шлака в качестве железосодержащей добавки.

Большая часть рассмотренных месторождений находятся вблизи транспортных магистралей и крупных населенных пунктов и доступны для разработки открытым способом.

Разведанные регионы позволяют производить разработку карьеров и обеспечить строительство цементного завода по сухому способу производства. Дополнительным положительным эффектом в строительстве нового цементного завода является «разгрузка» железнодорожных путей путем оптимизации поставок на короткие расстояния.

На данный момент проектирование и строительство цементных заводов, работающих по сухому способу, имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с заводами, работающими по мокрому способу. Эти преимущества обусловлены как экономическими, так и экологическими факторами, и делают этот способ наиболее предпочтительным и актуальным. Можно выделить следующие преимущества сухого способа производства:

1. Экономические преимущества. Заключаются в снижении энергозатрат, так как в сухом способе сырьевая смесь подается во вращающуюся печь в виде сухой муки, содержащей минимальное количество влаги (около 1%). Это позволяет значительно снизить затраты сжигаемого топлива, необходимое для испарения воды, по сравнению с мокрым способом, где сырьевая смесь представляет собой шлам с высоким содержанием воды (до 40%). Также возможность высокой степени автоматизации делает производство цемента более стабильным и экономически выгодным в долгосрочной перспективе.

Сухой способ производства позволяет достичь более высокой производительности и снизить капитальные затраты.

Можно выделить следующие экологические преимущества:

1. Снижение выбросов CO_2 за счет более эффективного

использования топлива;

2. Сокращение потребления воды. Сухой способ требует значительно меньше воды, чем мокрый.

3. Возможность использования отходов в технологии. Сухой способ позволяет использовать различные промышленные отходы в качестве добавок при производстве цемента, что способствует утилизации отходов и снижению потребления природных ресурсов [1].

Для строительства цементного завода в Иркутской области наиболее подходящим вариантом является близкое расположение к Венгерскому месторождению (приблизительные координаты расположения месторождения 55.796016, 97.376968), которое обеспечивает добычу известняка и глины в пределах двух близлежащих карьеров. Более точное местоположение карьеров представлено на (Рис.1).

Запасы месторождения подсчитаны по категории В+С₁+С₂. Балансные запасы известняка составляют 313 млн. тонн и 54 млн. тонн глины [3].

Рядом с ним расположена железнодорожная линия Абакан-Тайшет, которая может быть использована для доставки сырьевых материалов из карьеров.

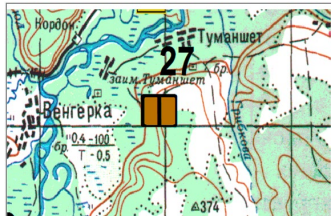


Рис. 1 Расположение Южного и Северного карьеров месторождения

Проводя анализ рынка, можно отметить, что, учитывая низкую общую производительность в 1,3 млн.т клинкера в год единственного цементного завода АО «Ангарскцемент» есть необходимость в развитии Иркутской области в соответствии с [4].

Подводя итог, отметим, что Иркутская область обладает значительными запасами сырьевых материалов, которые могут быть использованы в качестве сырья для производства цемента.

Наличие таких ресурсов делает Иркутскую область перспективной для развития цементной промышленности и ввиду наличия балансных запасов, разработка которых целесообразна при современном уровне развития техники и экономики, строительство цементного завода

является экономически выгодным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен, В.К. Технология и оптимизация цемента / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. – 298 с.
2. Винокуров М.А. Минерально-сырьевая база строительной индустрии / Винокуров М.А., Суходолов А.П. // Экономика Иркутской области - Изд-во Иркутская государственная экономическая академия. - 1999. - 275 с.
3. Кадастр месторождений полезных ископаемых / [Электронный ресурс] // GeologyScience.ru: [сайт]. — URL: <https://reports.geologyscience.ru> (дата обращения: 26.05.2025).
4. Кобзев И.И. Стратегия социально-экономического развития Иркутской области на период до 2036 года / Кобзев И.И. [Электронный ресурс] // Министерство экономического развития и промышленности Иркутской области. Утвержден Законом № 15-ОЗ: [сайт]. — URL: <https://irkobl.ru> (дата обращения: 26.05.2025).

УДК 666.198

Шабалин С.И., Биргалин А.М.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ПРОБЛЕМАТИКА СМАЧИВАНИЯ ШТАПЕЛЬНОГО ВОЛОКНА ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ

Изделия из минеральной ваты имеют самое большое распространение как в Российской Федерации, так и за ее границами. Наиболее популярными продуктами, получившими широкое распространение в строительной отрасли, являются изделия, полученные из штапельного волокна. За период существования промышленности волокнистых изоляционных материалов для производства штапельного волокна были разработаны различные способы волокнообразования [1-3]. Наиболее эффективным способом, зарекомендовавшим себя наилучшим образом, является центробежно-валковый способ [1,4].

Количество номенклатур, производимых минераловатных изделий достигает сотни марок. Они отличаются как по плотности и структуре самих изделий, и включают:

– прошивные маты в обкладках (из металлической или стеклосетки, стеклоткани или крафт-бумаги) с одной или с двух сторон или без них;

- плиты (лёгкие, мягкие, полужёсткие и жёсткие);
- изделия из стеклянного штапельного волокна;
- изделия из супертонких стеклянных и базальтовых волокон с применением различных связующих и без них;
- ламельные маты;
- ковры из набивной ваты;
- цилиндры и полуцилиндры, и другие.

Такая широкая номенклатура обусловлена назначением конкретных марок продукции и соответствию определенным значениям показателей ее физико-механических свойств и структуры. Эти свойства, в свою очередь, определяют показатели их качества, надежности и долговечности. Надежность и долговечность минераловатных изделий зависит от ряда факторов:

- оптимального химического состава как получаемого расплава, так и исходных сырьевых материалов композиции шихты;
- оптимальных режимах плавления и подготовки расплава, а именно, полного проплавления всех минералов, достижения нужной вязкости с полной гомогенизацией и дегазацией;
- оптимальных режимах волокнообразования и смачивания связующим;
- применением оптимального, для конкретного вида продукции, связующего вещества,
- требуемых для конкретного вида продукции технологических режимов сжатия-гофрирования, определяющих баланс между показателем прочности на сжатие и теплопроводностью материала.
- правильно подобранными режимами термической обработки связующего вещества;
- правильно подобранными режимами охлаждения минераловатного ковра, после термического воздействия в камере полимеризации [2].

Изделия из минеральной ваты, по сути дела представляют собой композитный материал, который состоит из материалов различной химической природы – неорганического (индивидуальные минеральные волокна) и органического (связующее).

Индивидуальные штапельные волокна характеризуются длиной от нескольких десятков миллиметров до нескольких сантиметров, диаметром 3–6 мкм. Отдельно взятые индивидуальные волокна не могут сформировать изделие, обладающее требуемыми для

определенного направления свойствами и характеристиками. Именно для этих целей в технологии минераловатных изоляционных материалах применяют специальные связующие вещества – органические соединения, преимущественно на основе феноло-формальдегидных смол. Индивидуальные волокна, смоченные связующим веществом, после термической обработки образуют омоноиченные соединения «волокно-связующий агент-волокно», где связующий агент представляет собой композицию из сшитого полимера феноло-формальдегидной смолы, аппрета силана или других связующих веществ [5,6].

Наиболее слабым элементом соединения «волокно-связующий агент-волокно» сформированного композита является прочность «сшитого» полимера и прочность связи «волокно – полимер».

Рассмотрим эти два соединения по отдельности.

1. Прочность сшитого полимера зависит от успешности его полимеризации, определяемой временем и режимом термической обработки, и которая может быть проконтролирована величиной степени отверждения связующего.

2. Прочность связи индивидуального волокна и связующего обусловлено адгезией синтетического связующего к минеральному волокну, водородными и ковалентными связями; степень адгезии также зависит и от качества поверхности индивидуальных волокон.

Основной компонент отвечающий за адгезию связующего на поверхности волокна является кремнийорганическое соединение – аппрет силана – SiH_4 . Это соединение образует дополнительные связи способствующие увеличению долговечности полученного в результате термической обработки полимера.

Механизм полимеризации силана включает в себя несколько этапов:

- гидролиз алкоксисилановых групп, проходящий при контакте с водой, приводящий к их гидролизации с образованием органосилоанолов (Si—OH);

- реакция конденсации, в результате которой образуются органосилоксаны, содержащие силоксановые группы (Si—O—Si), т. е. протекает процесс создания трёхмерной пространственной структура, где неорганическая (кремниевая) и органическая (полимерная) фазы соединены ковалентными связями.

В качестве катализаторов реакций гидролиза и конденсации могут служить как кислоты, так и основания [7].

В случае получения минеральной ваты процесс нанесения силана на поверхность формирующихся минеральных волокон протекает

гораздо сложнее, чем в водных растворах. Процесс волокнообразования происходит в онлайн режиме и при этом в момент образования и формирования индивидуального волокна вводится раствор связующего содержащий в своем составе все компоненты, в том числе и силан. В этом случае механизм полимеризации силана на поверхности неорганических материалов заключается в том, что при воздействии температуры или в присутствии катализаторов силаны химически связываются с поверхностью, образуя силоксаны [7].

Исходя из приведенных научных результатов была сформирована рабочая гипотеза для проведения испытаний, связанных с установлением рационального способа нанесения силана и связующего вещества на поверхность индивидуальных волокон, который обеспечит максимально возможную прочность соединения «волокно – связующий полимер».

В благоприятном случае между поверхностью минерального волокна и смолой должен образоваться слой, характеризующийся повышенной гетерофазной адгезией.

Вместе с тем, при выполнении экспериментальной работы потребуется исследование зависимости прочностных характеристик композита, как функции качества распределения силана и связующего по площади поверхности элементарных волокон. На рис. 1 приведены результаты исследование методом оптической микроскопии некачественного распределения микрокапель связующего на поверхности элементарных волокон (Рис. 1,а.) и неплохой их «склейки» (Рис. 1,б)

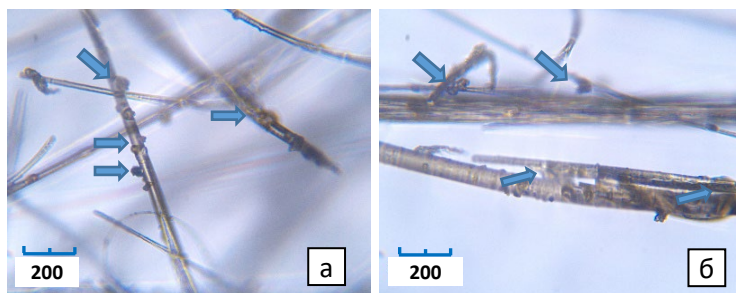


Рис. 1. Характер микрокапельного распределения связующего на индивидуальных волокнах (а) и места их склеивания связующим (б)

На рис. 2 схематически представлен механизм качественной склейки индивидуальных волокон.

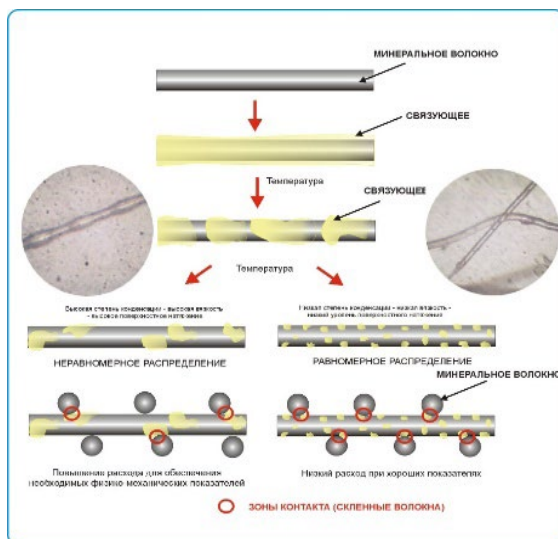


Рис. 2. Схема механизма распределения связующего на индивидуальных минеральных волокнах

Таким образом, анализ причин недостаточно качественного смачивания индивидуальных волокон, как элементарной ячейки композитных минераловатных изделий, показал, что ресурс в оптимизации этого процесса может заключаться в разработке рационального механизма нанесений силанов и связующих либо совместно, но с высоким качества диспергации и их распределения на поверхности волокон, либо путем послойной диспергации, а может даже и создания некоего градиента концентраций, как это реализуется в процессе защиты от коррозии металлических изделий путем нанесений силикатных эмалей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю.Л. Бобров Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 168 с.
2. Горайнов К.Э. Минеральная вата и изделия из нее//Москва: Изд. Министерства строительства и предприятий машиностроений 1950. С. 33–44/
- 3.2. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 416 с.
4. Технология производства минеральной ваты. [Электронный

ресурс] URL: <https://wiki.saint-gobain.ru>. Дата обращения 25.05.2025.

5. Горайнов К.Э, Горайнова С. К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1982. – 376с.

6. Рахимов Р. З., Шелихов Н. С., Смирнова Т. В. Теплоизоляция из каменной ваты: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 312с.

7. Петрунин М. А. Адсорбция органосилонов на поверхности металлов и неорганических материалов. 1. Адсорбция на минеральных поверхностях (М. А. Петрунин, Л. Б. Максаева, Н. А. Гладких, Т. А. Юрасова, В. А. Котенев, А. Ю. Цивадзе)// Физикохимия поверхности и защита материалов, 2021, Т. 57, № 5, стр. 451-468/ DOI: 10.31857/S004418562105020X

УДК 666.1.001.5

Шабалин С.И.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ И СТРУКТУРЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВОЛОКОН

Последние десятилетия на рынках недвижимости возрастает тенденция в увеличении спроса на индивидуальное жилье. Стремление к наличию собственного малоэтажного дома для семьи и индивидуализации личного пространства входит в национальную ментальность жителей современной России.

Малоэтажное строительство в России, на сегодняшний день является одним из самых перспективных и имеющих большой потенциал направлений. По прогнозам Правительства Российской Федерации, доля малоэтажного строительства в общем вводе жилья к 2030 году должна составить не менее 70%. Исследования маркетингового агентства Mega Research, в статье «Обзор и анализ рынка загородной недвижимости» показывают положительную динамику развития ИЖС в России. Малоэтажное строительство использует современные энергосберегающие технологии, где в качестве теплоизоляционных материалов используются изделия из каменной ваты. Теплоизоляция на основе каменной ваты эффективно снижает потери тепла в окружающую среду, сохраняя тепло внутри помещения, тем самым снижает энергопотери на отопление зданий и

сооружений и играет ключевую роль в современном малоэтажном строительстве.

Основным сегментом теплоизоляционных материалов, применяемых в ИЖС, является общестроительная изоляция. Отличительной особенностью данного сегмента является низкая плотность продукции равная 25–35 кг/м³. Низкая плотность продукта влечет за собой необходимость получения высокой прочности индивидуальных волокон [1].

Прочность индивидуальных волокон, в основном зависит от химического состава и наличия дефектов структуры на макро- и микроуровнях.

Оптимальная структура полимерной стеклообразующей сетки, определяемая силой связи сформировавших ее оксидов [2], предопределяет высокую прочность индивидуальных волокон, которая является функцией концентрации в химическом составе стеклообразователей, а показателем прочности косвенно может являться степень связности кремний кислородного каркаса.

Высокая механическая прочность индивидуальных является обязательным требованием для возможности компрессирования плитных изделий из минеральной ваты с целью уменьшения их объема для дальнейшего транспортирования.

Компрессирование, или сжатие минераловатной продукции возможно только при условии наличия волокон, обладающих высокими физико-механическими характеристиками, поэтому, чем выше процент компрессии, чем более качественным и прочным должно быть отдельно взятое волокно. Финальным показателем качественных характеристик компрессионной продукции является полная восстанавливаемость исходного размера и сохранение требуемых физико-механических характеристик. Как степень сжатия, так и степень восстановления индивидуальных волокон определяется не только физико-механическими свойствами их химического состава, но и от качества их структуры, которое закладывается как на этапе получения расплава, так и процесса их формирования [3]. И если знания о связи физико-механических свойств и химического состава расплава давно сформированы [2,3], то дефекты структуры индивидуальных волокон ранее практически не изучались.

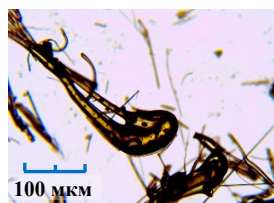
Как известно, дефекты стекла и стеклоизделий, существенно снижающие их физико-механические свойства, подразделяются на поверхностные и объемные. Поверхностные дефекты представлены посечками, трещинами, камнями, открытыми пузырями. Объемные дефекты локализуются в объеме изделий и представлены закрытыми

пузырями, твердыми включениями различной природы, свилиями, шлирами и т. п. [4].

Для изучения различных видов дефектов в индивидуальных волокнах использовали методы оптической и электронной микроскопии.

Объекты исследования были представлены индивидуальными волокнами 4-х российских производителей минеральной ваты, которые для соблюдения коммерческой тайны обозначены как производитель №1 (П1), производитель №2 (П2), производитель №3 (П3) и производитель №4 (П4).

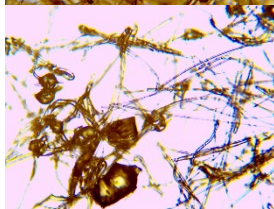
Исследование поверхности индивидуальных волокон производилось в проходящем свете при помощи цифрового микроскопа с фотофиксацией объектов в поле наблюдения. При этом следует отметить, что на микрофотографиях с малым увеличением (Рис. 1) приведены те области поля наблюдения, в которых были зафиксированы наиболее характерные участки дефектов структуры минеральной ваты – несформировавшиеся и разнотолщинные индивидуальные волокна, «корольки» сферической и эллипсоидальной формы.



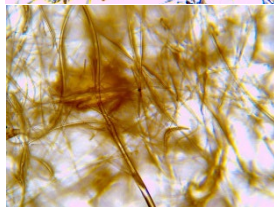
Образец П1. В поле наблюдения сломанные части утолщенного волокна $\varnothing$ 20–50 мкм. В большем количестве представлены “Корольки” $\varnothing$ от 80 до 200 мкм. Волокно в большей части своей представляет собой тонкие нити $\varnothing$ от 10 до 20 мкм.



Образец П4. В поле наблюдения отмечаются разнотолщинные волокна $\varnothing$ <25–30 мкм. В левом верхнем углу виден “корольек” $\varnothing$ 200 мкм. Внутри него отчетливо видны шарообразные и вытянутые эллипсоидные пузырьки газа.



Образец П2. В поле наблюдения сломанные части утолщенного волокна $\varnothing$ 20–50 мкм. В большем количестве представлены “корольки” $\varnothing$ от 80 до 200 мкм. Волокно в большей части своей представляет собой тонкие нити $\varnothing$ от 10 до 20 мкм.

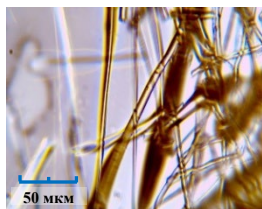


Образец П3. В поле наблюдения волокна $\varnothing$ <30 мкм. Имеют достаточно хорошее качество, видимых дефектов нет.

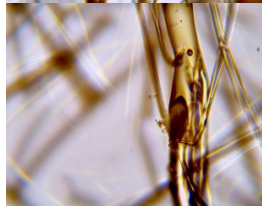
Рис. 1. Изображения индивидуальных волокон минеральной ваты при малом увеличении

Таким образом, рассматривая макроструктуру индивидуальных волокон минеральной ваты различных производителей можно выявить незначительное количество дефектов в виде «корольков», в которых могут иметь место газовые пузыри.

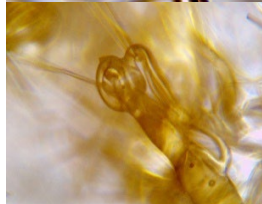
При дополнительном увеличении на микрофотографиях (рисунок 2) более отчетливо видны включения газовых пузырьков, в которых могут содержаться различные газы CO_2 , CO , H_2S , SO_2 и N_2 [5].



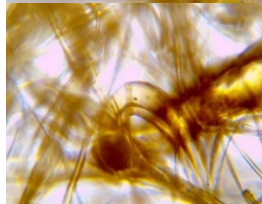
Образец П1 характеризуется определенной разнотолщинностью волокон, диаметром от 5 до 20 мкм. Видны отчетливые пузырьки газов в волокнах большего диаметра



Образец П2 содержит в небольших количествах утолщенные индивидуальные волокна с разнотолщинностью диаметров от 5 до 25 мкм. В волокнах большего диаметра наблюдаются пузырьки газов.



Образец П3. В поле наблюдения волокна малого (<10 мкм) диаметра, но имеются единичные включения не до конца сформировавшихся волокон, имеющих диаметр до 30 мкм. В целом волокна имеют хорошее качество.



Образец П4. В поле наблюдения представлен незначительный дефект в виде изогнутого и утолщенного индивидуального волокна 20–25 мкм. Окружающие дефект волокна имеют хорошее качество.

Рис. 2. Изображения индивидуальных волокон минеральной ваты с большим увеличением

Таким образом, рассматривая макроструктуру индивидуальных волокон минеральной ваты с высокой степенью увеличения, можно сделать вывод о том, что в общей массе минеральной ваты встречается незначительное количество дефектов, характеризуемых несформировавшимися индивидуальными волокнами увеличенного диаметра, в которых локализованы газовые пузырьки различной конфигурации.

Исследование микроструктуры индивидуальных волокон производилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Mira (рис. 3–6).

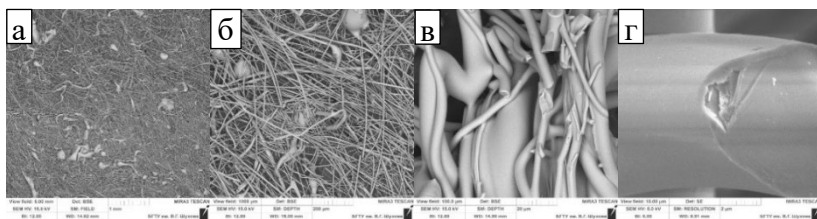


Рис. 3. Микроизображения индивидуальных волокон минеральной ваты производителя П1.

Представленные микрофотографии дают отчетливое представление о том, что в объеме минеральной ваты производителя П1 находится не более 5% неволокнистых включений (а, б), представляющих собой «королек» сферической и вытянутых форм, а также агломераты сплавившихся между собой индивидуальных волокон (в), скол волокна (г) после компрессии, вероятно, является следствием процесса кристаллизации, сопровождающейся возникновением локальных механических напряжений за счет уменьшения объема в точке кристаллизации.

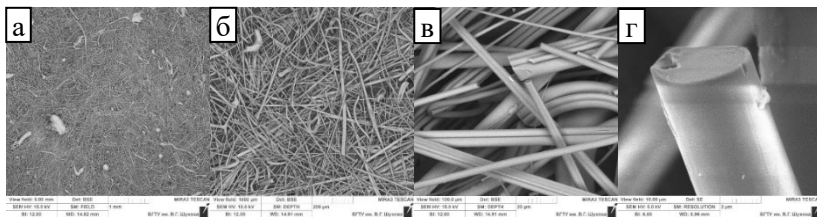


Рис. 4. Микроизображения индивидуальных волокон минеральной ваты производителя П2.

Минеральная вата производителя П2 отличается более высоким качеством, т. к. в поле наблюдения (а, б) неволокнистых включений не более 2%. Незначительным дефектом является частичное сплавливание («сращивание») индивидуальных волокон между собой (в). Разлом индивидуального волокна (г) диаметром 4 мкм в результате компрессии является следствием наличия в нем неоднородности в виде счет газового пузыря, которое, по всей видимости, явилось источником кристаллизации.

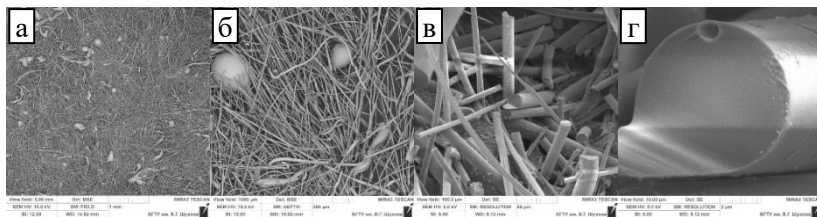


Рис. 5. Микроизображения индивидуальных волокон минеральной ваты производителя ПЗ.

Минеральная вата производителя ПЗ характеризуется содержанием в поле наблюдения неволокнистых включений (а, б) не более 4%. При компрессии индивидуальные волокна в вате производителя ПЗ получили поперечные разломы (в), что вероятно, является не только следствием пониженных физико-механических характеристик, но и наличием в их объеме – газовых включений в виде пузырей.

Подобные дефекты структуры отмечаются в волокнах минеральной ваты производителя П4, которая по качеству идентична минеральной ваты, произведенной производителем П1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Р. З., Шелихов Н. С., Смирнова Т. В. Теплоизоляция из каменной ваты: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 312с.
2. Химическая технология стекла и ситаллов. М. В. Артамонова, М. С. Асланова и др. под ред. М. Н. Павлушкина. - М. Стройиздат, 1983. – 432с.
3. Джигирис Д.Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий - М.: Теплоэнергетик. 2002. – 416с.
4. Контроль производства и качества листового стекла и стеклоизделий: учеб. пособие/В.И. Онищук, Н.Ф. Жерновая, Н. И. Минько. - 2-е изд., стер. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008.165 с.

Костенко С.Е., Шабалин С.И.

Научный руководитель: Онищук В.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет

им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СЫРЬЕВОЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ

В течении последних 10-15 лет главной тенденцией мировой экономики является энерго- и ресурсосбережение, причем с каждым годом актуальность этого направления становится все более существенной. Колоссальная доля в потреблении энергоресурсов принадлежит зданиям, где совокупный потенциал энергосбережения оценивается в 350 млн. т. условного топлива в год [1]. Таким образом создается высокая потребность в качественных, надежных, эффективных и доступных теплоизоляционных материалах, которые на сегодняшний день преимущественно представлены в виде минераловатных изделий.

Минеральная вата представляет собой волокнистый утеплительный материал, производимый из горных пород, обладающий высокой устойчивостью к влаге, огню и механическим нагрузкам.

Наиболее распространенным показателем, определяющим пригодность сырья для производства минерального волокна и его качества, является модуль кислотности, определяемый как соотношение между кислыми и основными оксидами [2-5]:

$$M_k = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}, \quad (1)$$

Модуль кислотности основного сырьевого материала для производства минеральных волокон находится в интервале 1,2–6,5. Чем выше модуль кислотности, тем выше водостойкость, и более долговечным является волокно. Также, в связи с высокой энергоемкостью технологии производства минеральных волокон важную роль играет легкоплавкость сырьевых материалов, определяющая экономическую составляющую производства в целом.

Таким образом получение качественного минерального волокна зависит от правильного подбора рецепта сырьевой смеси из доступных сырьевых материалов.

Для производства минерального волокна в настоящее время используется достаточно большое количество горных и осадочных пород, таких как базальт, габбро-диабаз, порфирит, доломит и др.,

запасы которых в России являются практически неисчерпаемы. Однако число месторождений горных пород, которые полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сырью для производства минеральных волокон и минеральной ваты по химическому составу, является весьма ограниченным [6,7].

Большую роль при выборе сырьевого материала играет комплекс характеристик: стоимость добычи и транспортировки сырья, стабильность химического состава, тугоплавкость, определяющая энергетические затраты на процесс получения расплава, склонность к кристаллизации и др. Поэтому в последние десятилетия вопрос расширения сырьевой базы для производства минеральной ваты является весьма актуальным, что во-многом определяется также и существенным повышением спроса на минеральную вату, которая завоевала себе очень прочное лидерство в линейке эффективных и экономически выгодных теплоизоляционных материалов неорганической природы.

В качестве альтернативного сырьевого материала предлагается использование доступного и сравнительно дешевого материала – шлаков черной металлургии, которые являются техногенными отходами, поэтому вопрос их использования определяет не только технологическую и экономическую целесообразность, но поспособствует снижению объемов их накопления в отвалах, существенно улучшая экологическую обстановку на территории предприятий черной металлургии.

Усредненный химический состав сырьевых компонентов различных месторождений для производства минеральной ваты [8], а также состав самой минеральной ваты представлен в табл. 1:

Таблица 1 – Усредненный химический состав различных сырьевых материалов, используемых в производстве минеральной ваты

Материал	Химический состав, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe _x O _y	K ₂ O	Na ₂ O	ППП
Базальт	48,27	14,93	8,07	5,05	15,83	1,65	2,31	2,49
Порфирит	53,17	15,67	9,05	6,16	12,12	0,38	0,38	2,66
Габбро-диабаз	49,53	15,27	8,6	6,14	11,1	1,87	3,16	2,58
Доломит	1,83	0,51	33,33	21,72	0,45	-	-	42,17
Шлак черной металлургии	40,23	8,62	42,46	7,31	1,42	0,4	0,3	1
Минеральное волокно [9]	41,5	20,0	21,3	6,7	5,5	-	-	-

Как видно из табл. 1, химический состав шлака черной металлургии содержит преимущественно оксиды кремния и алюминия, а также оксиды кальция и магния и, в целом, достаточно сильно схож по составу с минеральным волокном. При этом именно химический состав силикатного расплава, определяет характер изменения вязкости с изменением температуры и оказывает наибольшее влияние на процесс волоконобразования при производстве минеральной ваты.

Для априорной оценки возможности использования шлаков черной металлургии был выполнен ряд расчётов для рецептов шихт с различным содержанием шлака представленных в табл. 2. Расчетные составы шихты, представленные в табл. 3 были смоделированы при условии соблюдения постоянного модуля кислотности как у состава минерального волокна ООО «Роквул Север» г. Выборг и представленного в табл. 1. Расчетная температурно-вязкостная зависимость выбранных составов представлена на рис. 1.

Таблица 2 – Исследуемые рецепты шихты

Рецепт	Содержание компонентов, масс. %		
	Габбро-диабаз	Доломит	Шлак черной металлургии
1	79	21	-
2	75	15	10
3	72	10	18
4	69	5	26
5	66	-	34

Таблица 3 – Обобщенные расчетные показатели

Рецепт	Содержание оксидов, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe _x O _y	K ₂ O	Na ₂ O	Мк
1	39,51	12,17	13,79	9,41	8,86	1,48	2,50	2,23
2	41,45	12,39	15,70	8,59	8,53	1,44	2,40	2,22
3	43,09	12,60	17,17	7,91	8,29	1,42	2,33	2,22
4	44,73	12,80	18,64	7,22	8,05	1,39	2,26	2,22
5	46,37	13,01	20,11	6,54	7,81	1,37	2,19	2,23

Из рис.1 видно, что при увеличении содержания шлака в составе шихты происходит незначительное увеличение вязкости расплава, что может негативно сказаться на затратах энергии при плавлении. Однако, если принять во внимание, что при нагревании доломита происходят эндотермические реакции разложения, газообразные продукты, которые составляют более 40% массы улетучиваются в окружающую среду создавая дополнительные потери тепла, можно сделать вывод о возможном экономии топлива при введении в состав шихты шлака.

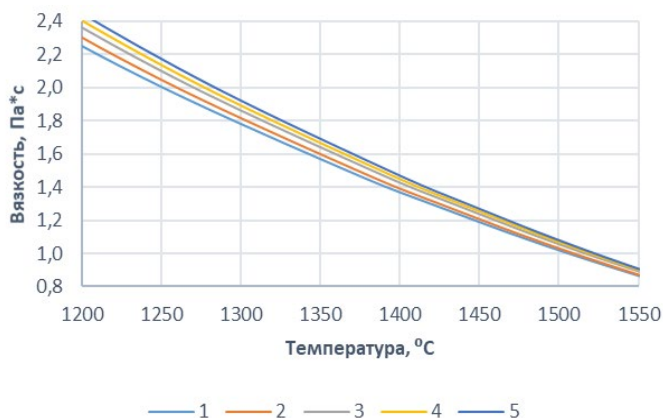


Рис.1. Температурная зависимость вязкости изучаемых составов

Таким образом использование шлаков черной и цветной металлургии в производстве минеральной ваты представляет собой перспективное направление переработки отходов металлургической промышленности для производства высоко востребованных изоляционных материалов на основе минеральной ваты.

К преимуществам использования шлаков черной металлургии в производстве минеральной ваты можно отнести:

- экономия природных ресурсов при замене сложно добываемого в карьерах природного камня отходами черной металлургии;
- экологический эффект при использовании шлаков как отходов металлургической промышленности;
- снижение себестоимости продукции благодаря использованию более дешевого вторичного сырья;
- снижение энергоемкости процесса плавления сырьевой смеси за счет наличия стеклофазы в шлаковом сырье.

Несмотря на очевидные плюсы, также пока существует и ряд вопросов, требующих решения, а именно:

- необходимость кондиционирования шлаков с целью усреднения их химического состава;
- в случае выявления отклонения содержания определенных оксидов сверх допустимых, обеспечивать корректировку технологических параметров производства минеральной ваты;
- использование современного обоганительного оборудования для эффективной подготовки шлаков к использованию в технологическом процессе производства минеральной ваты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения – Иваново: ПресСто, 2016. – 276 с.
2. Джигирис Д. Д., Махова М. Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 416 с.
3. Онищук В.И. Жерновая Н.Ф., Болгов А.М. Комплексная оценка пригодности сырья для производства минеральной ваты//Техника и технология силикатов. 2010. Том 17. №4. С. 5-10
4. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна//Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №5. С. 71-81.
5. ГОСТ 4640-2011 Межгосударственный стандарт. Вата минеральная. Технические условия.
6. ТУ 07508902-140-94. Сырье из горных пород для производства базальтовых волокон. Технические условия. - Бийск, 1994. - 10с.
7. Татаринцева, О. С. Перспективы использования горных пород Северной Осетии в производстве базальтовых волокон / О. С. Татаринцева, Н. Н. Ходакова // Горный журнал. – 2011. – № 7. – С. 74-77. – EDN PBXXED.
8. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч.1. - С.-Пб.: АНО НПО "Мир и Семья", АНО НПО "Профессионал", 2002. - 988 с.
9. Кутьев, С. П. Эффективные двухслойные минераловатные изделия: специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кутьев Сергей Павлович. – Москва, 2007. – 18 с.

*Шпак Д.А., Романюк А.М., Сиволгин В.И.
Научный руководитель: Черкасов А.В. канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШИБЕРА ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА НА КАЧЕСТВО ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Цемент является одним из ключевых строительных материалов, от качества и эффективности производства которого во многом зависят темпы развития строительной отрасли. Процесс помола цемента – один из наиболее энергоемких этапов его изготовления, на который приходится значительная часть затрат электроэнергии. В условиях роста требований к энергоэффективности и экологической безопасности производства актуальной задачей становится поиск и внедрение способов интенсификации процесса помола, позволяющих повысить его производительность, снизить энергопотребление и улучшить качество конечного продукта.

На сегодняшний день известны различные методы интенсификации помола цемента, включающие применение современных мелющих тел, использование химических добавок-интенсификаторов, оптимизацию конструкции мельниц, а также внедрение передовых технологий сепарации и классификации материала. Однако эффективность этих методов зависит от множества факторов, таких как состав сырья, режимы работы оборудования и требования к тонкости помола.

Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения себестоимости цемента без ухудшения его качества, что особенно важно в условиях высокой конкуренции на рынке строительных материалов. Результаты работы могут быть полезны для предприятий цементной промышленности, стремящихся к модернизации производства и повышению его энергоэффективности.

Целью представленной работы является найти новый способ, способствующий интенсифицированию процесса помола, а также уменьшению энергопотребления цеха помола.

Работа предусматривает изучение эффекта изменения положения шибера вторичного воздуха динамического сепаратора 3-го поколения на качество готового продукта.

В данной работе использовалась сырьевая база ООО «Цементум». Последовательность эксперимента:

1) Проводился анализ работы контура шаровой мельницы с полностью открытым шибером вторичного воздуха, с закрытием на 50 % и на 100 % сепаратора 3-го поколения.

2) Когда шибер полностью был открыт, то сразу были отобраны 3 пробы: питание сепаратора, крупка сепаратора и готовый продукт) для определения байпаса сепаратора, Блейна готового цемента и его химического состава.

3) После того, как были отобраны первые пробы, каждые 2 часа брались аналогичные с разным закрытием шибера вторичного воздуха.

4) Эксперимент проводился с 9:00 до 14:00 на одной марке цемента (ЦЕМ I 42,5 R) при постоянных параметрах работы помольного цеха.

Таблица 1. Влияние положения шибера воздуха динамического сепаратора 3-го поколения на тонкость помола продукта

	Положение шибера 0 %	Положение шибера 50 %	Положение шибера 100 %
Питание сепаратора, см ² /г	1493	1601	1417
Крупка, см ² /г	713	721	760
Готовый продукт, см ² /г	3350	3454	3118

На основе полученных данных можно установить, что самым эффективным положением шибера стало закрытие его на 50 %. Данный вывод можно сделать, исходя из того, что удельная поверхность пробы, полученной при открытии 50 %, была больше удельной поверхности проб при полном открытии или полном закрытии.

При закрытии шибера на 50 % получилось снизить очень важный показатель работы сепаратора, как байпас. В изначальном положении, равном нулю, данный показатель составлял 14,3 %. В положении шибера 50 % байпас составлял 11,2 %. Закрытие на 100 % оказалось самым худшим показателем, так как составил 20 %.

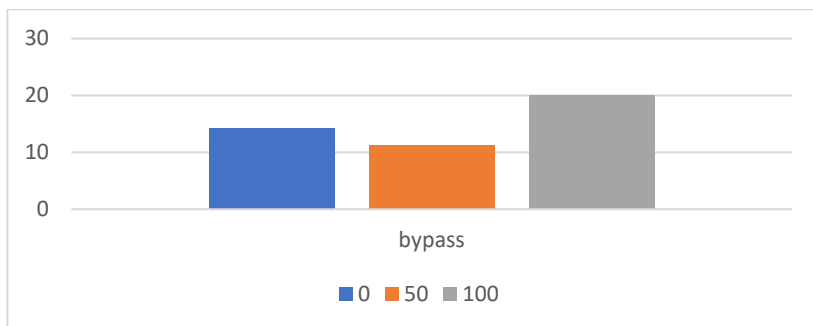


Рис. 2. Показатели байпаса сепаратора при разном закрытии шлибера

В процессе исследования так же была замерена температура готового цемента и во всех пробах она составила меньше температуры образования полугидрата (120 °C): 88 °C у полностью открытого шлибера, 92 °C у закрытого на 50 % и 96 °C у полностью закрытого шлибера вторичного воздуха.

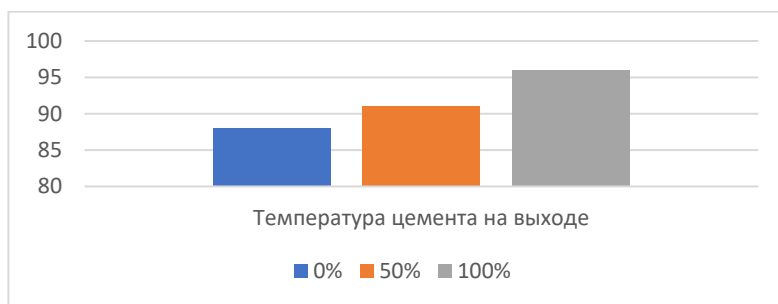


Рис. 3. Температура готового продукта.

Также был проведен химический анализ проб для того, чтобы соответствовать качеству готовой продукции. Для этого необходимо получить результаты количества алита, SO_3 , портландита, полугидрата и свободной извести в пробах готового цемента.

Таблица 2. Минералогический и химический анализ проб

	Алит,%	SO ₃ ,%	Портландид,%	Полугидрат,%	CaОсв,%
0%	64,5	3,2	0,27	0,86	1,3
50%	66	2,8	0,08	0,78	0,9
100%	63,7	3,4	0,34	1,07	1,3

В результате химического анализа можно увидеть, что лучшие показатели у пробы, отобранной при закрытии шибер на 50 %, так все числа входит в пределы, необходимые для качественного цемента:

- 1) Алит > 61 %;
- 2) SO₃ ≤ 3;
- 3) Портландид < 1,5;
- 4) Полугидрат ≤ 1,5;
- 5) CaОсв ≤ 2,0.

При этом можно отметить, что химические показатели проб с полным закрытием и открытием тоже входят в данные диапазоны, исключая только SO₃ у шибер, закрытого на 100 % (здесь наблюдается превышение).

Вывод: установлено, что для данного сепаратора 3-го поколения самым оптимальным положением для шибер вторичного воздуха является его закрытие на 50 %. При такой позиции наблюдаются улучшение в работе сепаратора, а также улучшение в качестве готового цемента:

- уменьшение байпаса сепаратора до 11,2 %;
- увеличение показателя удельной поверхности до 3454 г/см²;
- при закрытии температура не превысила 120 °С (образования полугидрата) и составила 92 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крыхтин Г.С. Интенсификация работ мельниц. – М.: Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 240 с.

2. Левченко П.В. Интенсификация помола цемента: современные методы и оборудование. – СПб.: Профессия, 2015. – 256 с.

3. Смирнов О.П. Оптимизация процесса помола цемента с использованием высокоэффективных сепараторов // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 12. – С. 67–73.

4. Богданов В.С. Основные процессы в производстве строительных материалов: учебник для студентов, обучающихся по направлению 270101 "Строительство"/ В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко; под ред. В. С. Богданова. М.: Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. – 551 с.

УДК 666.94

Шумаков А.А.

*Научный руководитель: Мишин Д.А. канд. техн. наук., доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ИЗУЧЕНИЕ РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ ИЗВЕСТНЯКОВ ДЛИННОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА

В современных условиях появляется необходимость в увеличении производственных мощностей цементных заводов, чтобы количество выпускаемой продукции хватало для собственных нужд и экспорта. Но увеличение производительности не должно оказывать влияние на качество получаемого цемента. Из гидравлических вяжущих материалов: возводят стены, строят дома, дамбы, мосты, тампонируют скважины и т.д. [1].

В данный момент выделяют 3 способа производства цемента: мокрый (при большой влажности исходных сырьевых компонентов), сухой (при низкой влажности сырьевых и компонентов) и комбинированный [2]. На АО «Спасскцемент» реализован сухой способ производства, при котором сырьевые компоненты (известняк, глина, сланец и шлак) тщательно измельчаются, смешиваются и направляются в печь в виде тонкого порошка. Сырьевые компоненты считаются не возобновляемыми ресурсами. Поэтому накопление некондиционного известняка (с большим содержанием SiO_2 и MgO) и его использование в производстве является одной из главных проблем технологической цементной отрасли. Как поведёт себя сырьевая смесь при измельчении её с включениями посторонних пород при использовании некондиционного известняка из Длинногорского месторождения не

изучено. Таким образом целью работы является изучение процесса измельчения известняков Длинногорского месторождения.

В процессе помола сырьевой смеси было установлено, что коэффициент насыщения и модули необходимо постоянно пересчитывать, в связи с колебаниями химического состава подаваемого известняка. В период с 01.09.2024г по 21.05.2025г., оперативно производился химический состав известняков (отработано и обработано 634 пробы). Данные за этот промежуток сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – колебания по химическому составу известняков Длинногорского месторождения

%	Химический анализ известняка, %				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
Сентябрь-октябрь 2024г.					
Максимум	54,81	31,95	7,13	3,30	3,36
Минимум	29,49	0,34	0,10	0,06	0,27
Δ	25,32	31,61	7,03	3,24	3,09
Ноябрь-декабрь 2024г.					
Максимум	54,78	31,81	5,99	2,31	5,76
Минимум	30,71	0,37	0,06	0,05	0,32
Δ	24,07	31,44	5,93	2,26	5,44
Январь-февраль 2025г.					
Максимум	55,10	31,39	8,92	6,85	5,95
Минимум	27,85	0,44	0,05	0,05	0,37
Δ	27,25	30,95	8,87	6,80	5,58
Март-апрель 2025г.					
Максимум	54,97	15,25	3,92	2,03	12,06
Минимум	40,37	0,43	0,02	0,05	0,38
Δ	14,60	14,82	3,90	1,98	11,68
Май 2025г.					
Максимум	55,09	3,12	0,79	0,44	13,87
Минимум	45,05	0,54	0,01	0,04	0,54
Δ	10,04	2,58	0,78	0,40	13,33

На протяжении длительного времени сбора информации, химический состав известняка менялся в широких пределах:

- CaO от 55,10% до 27,85%;
- SiO₂ от 31,81% до 0,37%.

Для исследования были проведены отборы известняка из карьера в пяти точках. Химический состав приведён в Таблице 2, минералогический минералогический в Таблице 3.

Таблица 2 – химический состав проб известняков, отобранных для исследования

Химический состав пробы №1 «Рядовой», %					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Титр
55,89	0,078	0,07	0,28	0,43	100,72
Химический состав пробы №2 «Отвал», %					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Титр
42,67	12,44	2,48	2,52	0,63	77,53
Химический состав пробы №3 «Рядовой-2», %					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Титр
51,41	4,53	0,74	0,7	0,59	93,06
Химический состав пробы №4 «Магний содержащий», %					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Титр
50,19	2,59	0,5	0,65	6,21	102,68
Химический состав пробы №5 «Отвал-2», %					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Титр
40,73	19,61	3,2	2,12	0,84	74,51

Таблица 3 – минералогический состав отобранных для исследования известняков Длинногорского месторождения

Минералогический состав пробы №1 «Рядовой», %						
Кальцит	Доломит	Кварц	Пирит	Иллит	Альбит	Хлорит
99,26	0,05	0,35	-	0,33	-	0,01
Минералогический состав пробы №2 «Отвал», %						
Кальцит	Доломит	Кварц	Пирит	Иллит	Альбит	Хлорит
82,35	1,04	11,46	0,01	4,31	-	0,84
Минералогический состав пробы №3 «Рядовой-2», %						
Кальцит	Доломит	Кварц	Пирит	Иллит	Альбит	Хлорит
94,95	0,24	2,93	-	1,89	-	-

Минералогический состав пробы №4 «Магний содержащий», %						
Кальцит	Доломит	Кварц	Пирит	Иллит	Альбит	Хлорит
69,91	28,46	1,19	0,02	0,33	0,03	0,05
Минералогический состав пробы №5 «Отвал-2», %						
Кальцит	Доломит	Кварц	Пирит	Иллит	Альбит	Хлорит
76,83	0,08	16,55	0,01	6,17	-	0,36

Измельчение известняков проводили в мельнице ($\varnothing 0,5 \times 0,28 \text{ м}$, $V_{\text{кам}} - 0,06 \text{ м}^3$) с шаровой загрузкой. Загрузка материала составила 5 кг, измельчение материала контролировали по проходу через сита (5,0; 2,5; 1,25; 0,63; 0,200; 0,080; проход). Для анализа использовали сито №02, по требованиям технологического регламента АО «Спасскцемент». Сырьевая смесь после шаровой мельницы должна быть измельчена до остатка на сите №02 не более 5%. Поэтому материал измельчали до тех пор, пока остаток на сите не станет меньше 5%. Результаты измельчения представлены на Рисунке 1.

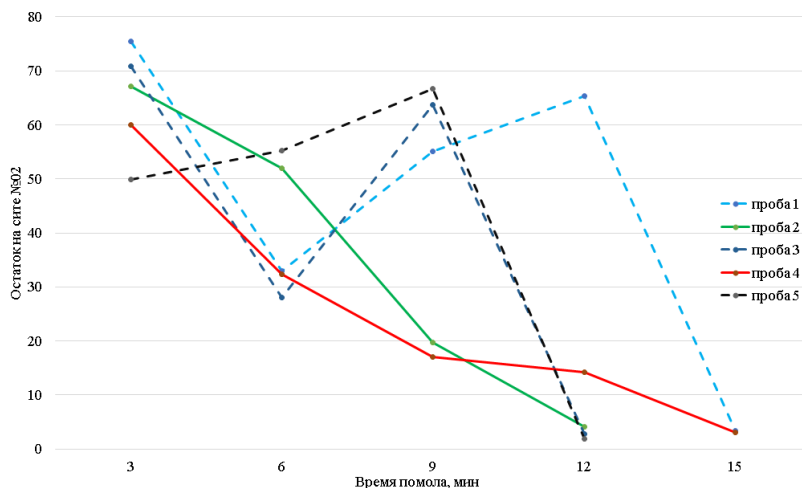


Рис. 1 - изменение во времени остатка на сите №02 при измельчении проб известняка Длинногорского месторождения

По результатам лабораторного помола известняки можно разделить на 2 группы:

І группа - пробы №2 и №4;

ІІ группа - пробы №1, №3 и №5.

К І группе отнесли известняки с равномерным уменьшением остатка на сите №02.

К ІІ группе - известняки с пилообразным характером кривой остатка на сите №02.

Плавный характер кривой измельчения проб известняков І группы определяется наличием значительного количества кварцевых включений (11,46%) и доломита (28,46%), представленные в Таблице 3. Кварц и доломит по твёрдости больше твёрдости известняка, выступая таким образом интенсификаторами измельчения, снижая налипания материала на мелющие тела и бронефутеровку мельницы. У кварца твёрдость по шкале Мооса - 7, доломита - 3,5-4, известняка - 3.

Во ІІ группе известняки или "чистые" или содержат глинистые примеси, способствующие налипанию материала на мелющие тела, снижая интенсивность измельчения, что приводит к пилообразному характеру кривой остатков на сите №02.

Вывод: в пробах известняков (№2 и №4) присутствуют крупные и более твёрдые частицы кварца и доломита способствующие интенсификации процесса измельчения, поэтому известняки из этих геологических блоков наиболее технологически целесообразно использовать при приготовлении сырьевой смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шумаков, А.А., Никитина, М.А. Влияние фазового состава гидравлического вяжущего на прочностные характеристики цементного камня // XV Международный молодёжный форум «Образование. Наука. Производство» - Белгород: Изд-во БГТУ, 2023 – Ч.11. – 43-47с.

2. Классен, В.К. Технология и оптимизация производства цемента: краткий курс лекций: учеб. пособие / В.К. Классен. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.

Оглавление

Алексеев В.Ю., Кривошеин Д.В., Манаа И.

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ
НЕСВЯЗАННОГО ОКСИДА КАЛЬЦИЯ В КЛИНКЕРЕ НА
СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА..... 3

Арепьева С.Д., Таралло З.В.

ВЛИЯНИЕ ТОНКОСТИ ПОМОЛА КАРБОНАТНОГО
КОМПОНЕНТА СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ОБЖИГ КЛИНКЕРА 7

Белоусова Д.А., Таралло З.В.

СИНТЕЗ АЛЮМИНАТНОГО И СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО
ВЯЖУЩЕГО ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ 11

Богданов С.В., Зазыкин Д.А.

ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ
ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ 15

Ваганов М.С.

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА 19

Вакуленко Д.А., Лопарев А.С.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННОГО МАСЛА В
ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА 24

Василенко М.Э., Сильченко Н.А.

СИЛИКАТНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИЯ
ПРОИЗВОДСТВА, СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ..... 27

Гаручава М.Ю.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В
СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНА..... 31

Дудина Е.И., Смагина А.Р., Колесова А.С.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ 35

Евдокимов А.Ю., Пашков Г.А., Погореленко К.А.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ
СЕКТОРЕ («ЗЕЛЕНОЕ» СТРОИТЕЛЬСТВО) 41

Жариков Д.С., Крапивин С.Н., Дюкарева В.И.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА
НИЗКОАЛЮМИНАТНОГО БЕЛОГО КЛИНКЕРА..... 46

Иванов Д.В.

СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ БЕТОНОВ С
ДОБАВЛЕНИЕМ ХРИЗОТИЛА 51

Исаева А.С., Лопарев А.С.

УТИЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ 54

Киященко В.В.

КОМПЬЮТЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ
СИЛИКАТНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С
ОПТИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ..... 58

Корыпаева О.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВОВ СТЕКОЛ ДЛЯ СТЕКЛЯННЫХ
ШАРИКОВ..... 63

Кривошеин Д.В., Литвинова Ю.И., Кужелева А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ
КЛИНКЕРА РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМОМ ОХЛАЖДЕНИЯ 68

Кужелева А.А., Литвинова Ю.И.

РОЛЬ ФОСФОГИПСА В ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 73

Кузнецов Д.В., Кривошеин Д.В., Алексеев В.Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА 76

Лазарова Ю.С.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ ДЛЯ
ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА..... 80

Линец В.В., Лазарова Ю.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕЛЁНОГО
СТЕКЛА МАРКИ ЗТ-1 С КОМБИНАЦИОННЫМ
ОКРАШИВАНИЕМ 87

Лопарев А.С., Вакуленко Д.А., Исаева А.С.

ПОЗОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ,
РАБОТАЮЩЕЙ ПО НОВОМУ СПОСОБУ 92

Малютин Б.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ
АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ПРИ ПОМОЛЕ
ЦЕМЕНТА 97

Меряев А.В., Шабалин С.И.

О ВЛИЯНИИ ВЛАЖНОСТИ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ
ВАГРАНОК НА КАЧЕСТВО МИНЕРАЛЬНОГО РАСПЛАВА И
МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ 104

Миронов В.А., Субботин В.Д.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОМОЛА КЛИНКЕРА 109

Нугманов Р.Р.

НАНЕСЕНИЕ ПРИРАБОТОЧНОГО СЛОЯ MOS_2 НА
АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОЦЕНКА ИХ
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 114

Нугманов Р.Р.

НАНЕСЕНИЕ ПРИРАБОТОЧНОГО СЛОЯ MOS_2 НА
АЛМАЗОПОДОБНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОЦЕНКА ИХ
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 119

Овчинников А.С.

АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ БРИКЕТИРОВАНИЯ
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ ДОЛОМИТА И ГАББРО-
ДИАБАЗА 125

Повшок Т.О.

ПРИРОДНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ДЛЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ
ПОЛИМЕРОВ 130

Романюк А.М., Шпак Д.А., Сиволгин В.И.	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АНГИДРИТА ПРИ ПОМОЛЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТА	133
Сиволгин В.И., Романюк А.М., Шпак Д.А.	
ВЛИЯНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ОБЖИГА КЛИНКЕРА.....	138
Скворцов А.А., Скворцова И.Д.	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОКА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ.....	143
Скворцова И.Д., Скворцов А.А.	
ЗАВИСИМОСТЬ ОКРАШИВАНИЯ СТЕКЛА ОТ ОВП ШИХТ ..	149
Смагина А.Р., Дудина Е.И., Пономарева П.С.	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЕРАМИЧЕСКОЙ И БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗОК В АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ	153
Черных А.А.	
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЦЕМЕНТНОГО ЗАВОДА СУХОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА В ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ	157
Шабалин С.И., Биргалин А.М.	
ПРОБЛЕМАТИКА СМАЧИВАНИЯ ШТАПЕЛЬНОГО ВОЛОКНА ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ	161
Шабалин С.И.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ И СТРУКТУРЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВОЛОКОН	166
Костенко С.Е., Шабалин С.И.	
АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СЫРЬЕВОЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ	173
Шпак Д.А., Романюк А.М., Сиволгин В.И.	
ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШИБЕРА ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА НА КАЧЕСТВО ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ	178

Шумаков А.А.

ИЗУЧЕНИЕ РАЗМОЛОСПОСОБНОСТИ ИЗВЕСТНЯКОВ ДЛИННОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА	182
---	-----