

Научно-практический сетевой журнал
Выходит 2 раза в год

Учредитель и издатель
Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:
В.А. Береговой (главный редактор)
Б.М. Гришин (заместитель
главного редактора)
И.Ю. Шитова (ответственный секретарь)

Адрес редакции:
440028, г.Пенза, ул.Германа Титова, 28,
ПГУАС
Тел/факс 8412 420501
E-mail: techbeton@pguas.ru
www.vestnikpguas.ru

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

Дизайн обложки **Л.А. Васин**

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС77-61513 от 24 апреля 2015 г.

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.
Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

ВЕСТНИК ПГУАС: СТРОИТЕЛЬСТВО, НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

2(21)/2025

Содержание

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА..... 3

Береговой В.А., Капустин А.Е., Шурыгин И.С.
НЕАВТОКЛАВНЫЙ ГАЗОБЕТОН
НА ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТНОЙ
МАТРИЦЕ, АРМИРОВАННЫЙ
СВЕТОПРОПУСКАЮЩИМИ ВОЛОКНАМИ 3

Береговой В.А., Семилетков А.В.,
Присевка А.С.
ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНЫ НА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ
ВЯЖУЩИХ, АРМИРОВАННЫХ
НАТУРАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ..... 12

Грачева Ю.В., Сафин Р.Б.,
Нарзеева А.В., Ефименко В.А.
ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ 21

Ерошкина Н.А., Харнаев А.В.,
Коровкин М.О., Шульте И.С.
ВЛИЯНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ И ДОБАВКИ
ШЛАКА НА ПРОЧНОСТЬ И ВОДОСТОЙКОСТЬ
ГЕОПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО 27

Колесников Н.В., Арискин М.В.,
Мартышкин Д.О.
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ВКЛЕЕННЫМИ КРЕСТОВЫМИ
СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ 33

Коровкин М.О., Ерошкина Н.А.,
Журавлев С.И., Довгуль Е.Ю.,
Михайлова Е.Д.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И МЕТАКАОЛИНА
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫСОЛООБРАЗОВАНИЯ ... 40

Лавров И.Ю., Семилетков А.В.,
Бортунова В.И., Чекранова А.В.
ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК
НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ
СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ
ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕТОНА..... 46

Мартышкин Д.О., Залилов И.В. ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ СПОСОБОМ ОБКЛЕЙКИ КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	53	Меркушов А.В., Аriskин М.В. МОНТАЖНЫЕ УЗЛЫ НЕСУЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШАЙБ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБОЙ.....	67
Махамбетова К.Н., Мошкова Е.А., Сухова Н.В. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	61	Шитова И.Ю., Теплова В.Р. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ ЛЬНЯНЫМ МАСЛОМ НА ЕЁ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА...	74

Contents

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE ...	3	Lavrov I.Yu., Semiletkov A.V., Bortunova V.I., Chekranova A.V. THE INFLUENCE OF MODIFYING ADDITIVES ON THE RHEOLOGICAL AND STRENGTH PROPERTIES OF THE CEMENT MATRIX OF HIGH-FUNCTIONAL CONCRETE.....	46
Beregovoy V.A., Kapustin A.E., Shurygin I.S. NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE ON A HIGH-STRENGTH CEMENT MATRIX, REINFORCED WITH LIGHT- TRANSMITTING FIBERS	3	Martyshkin D.O., Zalilov I.V. INCREASING THE BEARING CAPACITY OF JOINTS OF WOODEN STRUCTURES ON GLUED FIBERGLASS WASHERS BY GLUING THE INNER SURFACE OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH COMPOSITE MATERIAL.....	53
Beregovoy V.A., Semiletkov A.V., Prisevka A.S. TEXTILE CONCRETES BASED ON MAGNESIA BINDERS REINFORCED WITH NATURAL FIBERS	12	Makhambetova K.N., Moschkova E.A., Sukhova N.V. QUALITY ASSESSMENT OF LOCAL CLAY RAW MATERIALS USED FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC WALL MATERIALS	61
Gracheva Yu.V., Safin R.B., Narzyaeva A.V., Efimenko V.A. REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING SOIL COMPRESSIBILITY	21	Merkushov A.V., Ariskin M.V. MOUNTING UNITS OF LOAD-BEARING WOODEN STRUCTURES USING WASHERS WITH INTERNAL THREAD.....	67
Eroshkina N.A., Kharnaev A.V., Korovkin M.O., Shulte I.S. INFLUENCE OF ROCK AND SLAG ADDITIVES ON THE STRENGTH AND WATER RESISTANCE OF GEOPOLYMER BINDER.....	27	Shitova I.Yu., Teplova V.R. STUDYING THE EFFECT OF THE DURATION OF WOOD IMPREGNATION WITH LINSEED OIL ON ITS PHYSICAL, MECHANICAL, AND OPERATIONAL PROPERTIES.....	74
Kolesnikov N.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O. STRESS-STRAIN STATE OF NODAL JOINTS OF WOODEN STRUCTURES WITH GLUED STEEL CROSS PLATES	33		
Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Zhuravlev S.I., Dovgul E.Yu., Mikhailova E.D. STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF MICROSILICA AND METAKAOLIN FOR REDUCING THE EFFLORESCENCE.....	40		

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

УДК 691.327.332

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Капустин Андрей Егорович,
ассистент

Шурыгин Илья Сергеевич,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»

Kapustin Andrey Egorovich,
Assistant

Shurygin Ilya Sergeevich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

НЕАВТОКЛАВНЫЙ ГАЗОБЕТОН НА ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЕ, АРМИРОВАННЫЙ СВЕТОПРОПУСКАЮЩИМИ ВОЛОКНАМИ

В.А. Береговой, А.Е. Капустин, И.С. Шурыгин

Проведен анализ работ в области получения светопрозрачных цементных бетонов. Рассмотрены схемы установки оптических волокон при изготовлении газобетонов по технологии вибрационного вспенивания. Разработаны составы порошкового бетона для их применения в качестве матричного материала в светопрозрачных композитах ячеистой структуры. Исследовано влияние вида цемента и добавок на скорость и полноту протекания процесса выделения водорода, определяющего параметры порового пространства.

Ключевые слова: светопроводящие газобетоны, армирование, оптические волокна, компонентный состав, процессы газообразования

NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE ON A HIGH-STRENGTH CEMENT MATRIX, REINFORCED WITH LIGHT-TRANSMITTING FIBERS

V.A. Beregovoy, A.E. Kapustin, I.S. Shurygin

The article analyzes the work in the field of obtaining translucent cement concretes. The schemes of installation of optical fibers in the manufacture of aerated concrete using the technology of vibration foaming are considered. The compositions of powder concrete for their application as a

matrix material in translucent composites of a cellular structure are developed. The influence of the type of cement and additives on the speed and completeness of the process of hydrogen release, which determines the parameters of the pore space, is investigated.

Keywords: light-conducting aerated concretes, reinforcement, optical fibers, component composition, gas formation processes

Стремление конструкторов и архитекторов к созданию уникальных зданий с выраженной индивидуальностью и наделенных «умными» функциями требует от материаловедов разработки композитов с необычным набором эксплуатационных и потребительских качеств. В бетоноведении такие разработки концентрируются в рамках технологии метабетонов – умных материалов, обладающих уникальными способностями («самозалечивание» дефектов, очищение поверхности, поглощение CO₂, выработка электрического тока, светопропускание, демпфирование). Создание метабетона предполагает инкорпорирование в его структуру заполнителей или армирующих компонентов, проявляющих свою целевую функцию при возникновении внешнего триггера (свет, вибрация, повышение содержания воды, кислорода и т.д.).

В данной статье рассматривается проблематика разработок, относящихся к светопропускающим метабетонам, имеющим широкие перспективы применения в архитектуре зданий и дизайне помещений.

На протяжении двух веков цементный бетон является основным видом материала для изготовления несущих и ограждающих конструкций зданий. Этому способствует его технологичность – способность при бетонировании заполнять опалубку сложной геометрии в сочетании с высокой прочностью и жесткостью после отвердевания. При этом бетонные смеси новых рецептур чрезвычайно отзывчивы к процедурам модификации составов инновационными компонентами без потери показателей свойств.

Непрозрачность традиционного бетона является препятствием на пути светового потока, что не позволяет организовывать зоны естественного освещения внутри строительных объектов и формирует многочасовые теневые зоны на северной стороне объектов при строительстве в умеренных широтах. Это увеличивает энергопотребление, негативно влияет на здоровье человека и увеличивает выбросы CO₂. В настоящее время естественное освещение обеспечивается светопропускающими конструкциями, к которым относятся изделия из строительного стекла, а также световоды – системы, улавливающие солнечный свет и передающие его в закрытое пространство, посредством полых конструкций с внутренним отражающим покрытием.

Особенность восприятия человеком светового потока заключается в повышении кажущейся интенсивности освещения в случае более равномерного его распределения. Для технической реализации такого оптического эффекта применяют анидольные системы освещения, улавливающие и передающие рассеянный солнечный свет во внутренние помещения.

Сегодня наблюдается своеобразный ренессанс анидольного освещения с использованием световодов, обусловленный началом активной реализации «зеленого» перехода в строительстве. Рассматривая этапы развития и становления технологий получения светопрозрачных стеновых материалов, можно отметить, что, по-видимому, наиболее удачное решение принадлежит Арону Лозонци, который в 2002 году запатентовал бетон «LiTraCon» (англ. light transmitting concrete). Разработанный бетон способен перенаправлять наружный свет с угла падения на направление, определяемое месторасположением световодов [1]. При его создании изобретатель основывался на работах предшественников. Впервые идея создания светопропускающего бетона, оформленная в виде патента, датируется 1922 годом (США). Разработка Пола Лиза описывает технологические решения, связанные с изготовлением полупрозрачных строительных блоков для конструкций стен и потолков.

Если рассматривать данное направление как обеспечение естественного освещения в каменных зданиях за счет кладки из светопрозрачных блоков, то необходимо упомянуть компанию «Luxfer Prism Company» (США), основанную Джеймсом Ж. Пенникуиком в 1886 г. Данная фирма считается родоначальником всех современных

строительных стеклоблоков, а запатентованная инновация заключалась в формировании на задней стороне квадратных стеклянных плиток призм, которые перенаправляли солнечный свет из окон вглубь комнаты, одновременно повышая его равномерность.

В 1965 году Джеймс Н. Лоу (Англия) усовершенствовал процесс изготовления светопрозрачных бетонных панелей, используемых в качестве витражей, собранных из фрагментов мозаики, стекла или полупрозрачного керамического материала, распределенных в теле бетона. В начале 1990-х годов были разработаны формы светопропускающего бетона в зависимости от рисунка расположения волокон, размера волокон и размера структуры [2].

Современные изделия марки LiTraCon имеют следующие показатели свойств: средняя плотность – $2150 \pm 100 \text{ кг/м}^3$; прочность на сжатие – $40 \pm 10 \text{ МПа}$; прочность на осевое растяжение – $5 \pm 2 \text{ МПа}$; коэффициент теплопроводности – $1,2 \pm 0,1 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

По прочности на ударные нагрузки и местный нагрев LiTraCon-бетон превосходит строительное стекло, однако неконкурентоспособная стоимость является его главным сдерживающим фактором: 1 м^2 стены стоит от 50 до 100 тыс. рублей [3].

Обобщая данные исследований по тематике светопрозрачных бетонов, можно сформулировать основные особенности их структуры и технологии изготовления. Диаметр применяемых оптических волокон варьируется в диапазоне от 2 мкм до 2 мм. В качестве основы для их изготовления используют как минеральные, так и полимерные стекла (рис. 1). Их укладывают в мелкозернистую бетонную матрицу в количестве, обеспечивающем требуемую степень светопропускания (4-5 %), отдельными слоями параллельно друг другу или способом равномерного распределения стекловолокна в смеси [4].



Рис. 1. Образец материала и стена из светопрозрачного метабетона [3]

Способность изменения степени светопропускания волокон и геометрии светового луча под воздействием механических или физических факторов дает возможность расширения «умных» функций светопрозрачных бетонов, когда оптические волокна становятся датчиками деформаций или температуры. В таком аспекте прозрачный бетон можно рассматривать не только как энергосберегающий материал, соответствующий «зеленым» строительным решениям, но и как интеллектуальный элемент конструкций для долгосрочного мониторинга их состояния. Указанное сочетание функциональных качеств существенно повышает перспективы применения метабетонов в гражданской инфраструктуре и нивелирует ограничения, обусловленные высокой стоимостью оптических волокон.

Применительно к практической реализации возможности мониторинга состояния конструкций под нагрузкой важно связать показатели деформации и светопропускания световодов $\tau_{\text{св}}$ в теле бетона. Зависимость величины $\tau_{\text{св}}$ от числа отражений N и длины хода луча d имеет вид

$$\tau_{\text{св}} = 0,95^2 \cdot 0,9999N \cdot 0,997d . \quad (1)$$

При наличии механической нагрузки изменение светопропускания деформированного световода корректируются критериями подобия [5]:

$$\tau_{\text{св}} = \tau_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{отр}} \cdot \tau_{\text{ф}} \cdot \tau_{\text{кр}} , \quad (2)$$

где τ_i – коэффициенты подобия (τ_n – поглощение излучения материалом; $\tau_{отр}$ – внутреннее отражение лучей; τ_ϕ – френелевские отражения от торцов; $\tau_{кр}$ – краевой эффект).

При работе материала в упругой стадии изменение показателя преломления пропорционально величине напряжений и для одностороннего растяжения или сжатия описывается выражениями

$$n_0 - n_{||} = \Delta n_{||} = \mp C_1 \sigma_p; \quad n_0 - n_{\perp} = \Delta n_{\perp} = \mp C_2 \sigma_{сж}, \quad (3)$$

где n_0 – показатель преломления материала до нагружения; C_1 и C_2 – фотоупругие постоянные для необыкновенного и обыкновенного лучей соответственно; $\sigma_{p(сж)}$ – нормальные напряжения растяжения (сжатия).

Для обычных световодов зависимость апертуры от отношения входного и выходного диаметров имеет монотонно убывающий характер [5]. При одностороннем сжатии $\tau_{деф} = \frac{A}{A_0}$, где A_0 и A – начальная и текущая апертуры соответственно, при этом соблюдаются следующие соотношения между геометрическими параметрами:

$$\Delta y \approx \frac{d_c \sigma}{2E}; \quad \Delta x \approx \mu \frac{d_c \sigma}{2E}, \quad (4)$$

где d_c – диаметр световода; μ – коэффициент Пуассона для материала световода.

Уравнения (1)-(4) позволяют установить зависимость величины светопропускания от апертуры волокна и ряда других дополнительных потерь, обусловленных эффектами, вызванными механическим нагружением.

В работе [6] исследовалось влияние температуры на светопропускающую способность полимерных (РММА) световодов. Общие светопотери проводника рассчитывались по зависимости

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{I_0}{I}, \quad (5)$$

где I_0 и I – мощность излучения на входе и выходе из волокна длиной L .

Авторами установлено, что нагревание волокна до 70...100 °С сопровождается расстеклованием структуры полимера и сопровождается ростом светопотерь, достигающих 1,6 дБ/м [7].

В настоящей работе исследовалась возможность применения стекловолокон в качестве многофункционального элемента в структуре композита, выполняющего помимо целевых (обеспечение светопрозрачности, мониторинг состояния), также армирующие и стабилизирующие функции. Для ячеистых видов метабетона это особенно актуально, т.к. повышает его сопротивляемость к изгибающим и растягивающим усилиям, снижает усадку при твердении и уменьшает осадку вспененной массы.

Используемые материалы. В качестве светопрозрачных элементов использовалось оптическое волокно из различных материалов (рис. 2). *Вариант 1* – стержни РММА (Ø0,75 и Ø2 мм) с температурой эксплуатации от -20 до +98 °С и оптическими потерями до 0,650 дБ/м. *Вариант 2* – стеклянные стержни из боросиликатного стекла (Ø6 мм).



Рис. 2. Общий вид светового волокна и процесс укладки перед бетонированием

Изготовление образцов осуществлялось следующим образом. Сначала в форму устанавливали пластиковые монтажные пластины с отверстиями, в которые закрепляли концы светопроводящих стрижней. Отдельно приготавливался раствор сырьевой смеси для изготовления газобетона (табл. 3). Подготовленную форму устанавливали на площадку и заливали в нее смесь, которую вибрировали в течение 5-8 минут для поднятия газобетонной смеси до установленной отметки согласно средней плотности материала. Такое решение обеспечивает эффективное вспенивание и быстрое схватывание системы после прекращения управляющего воздействия. После этого форму оставляли до момента окончательного схватывания цементной матрицы, а затем извлекали образцы ячеистого бетона размерами 10×10×10 см. Боковые плоскости готовых изделий шлифовали для выхода концов оптических волокон на поверхность.

Основная часть. На этапах заливки и вспучивания качественно подобранная ячеистая смесь должна обеспечивать однородность пористой структуры по всей высоте сечения. Для этого важно обеспечить правильное соотношение между размерами частиц и вязкостью массы до момента начала схватывания. В первом приближении расслаиваемость газобетонной массы оценивалась по уравнению Стокса

$$v_{\text{осажд(вспл)}} = \left| \frac{2R_{\text{част(газ)}}^2 g (\rho_{\text{част(газ)}} - \rho_{\text{р-ра}})}{9\mu_{\text{р-ра}}} \right|, \quad (6)$$

где $R_{\text{част(газ)}}$ – радиус частицы (пузырька), м; $\rho_{\text{част(газ)}}$ – плотность частицы (пузырька), кг/м³; $\mu_{\text{р-ра}}$ – динамическая вязкость, Па·с.

В соответствии с масштабным фактором компоненты, применяемые в рецептуре газобетона, подразделяются на фракции: №1 – средняя (0,63...1,25 мм); №2 – мелкая (0,14...0,63 мм); №3 – очень мелкая ($S_{\text{уд}}=320...400$ м²/кг); №4 – пылевидная ($S_{\text{уд}}>450$ м²/кг). Базовые составы приведены в табл. 1, а результаты испытаний – на рис. 3.

Т а б л и ц а 1

Расход компонентов базовых составов (кг на 1м³)

№	Материал	Номер состава смеси					
		1	2	3	4	5	6
4	Портландцемент CemI-42,5 (M500)	408,9	370,2	331,4			
	Белый портландцемент CemI-52,5				408,9	370,2	331,4
	Микрокремнезем МК-85	49,3	44,0	39,9	49,3	44,0	39,9
	Пластиф-р Melflux 2651F (0,7 %)	2,9	2,6	2,3	2,9	2,6	2,3
3	Молотый кварцевый песок	471,9	454,1	433,2	471,9	454,1	433,2
2	Мелкий кварцевый песок	543,2	553,7	562,2	543,2	553,7	562,2
1	Средний кварцевый песок	623,9	675,4	731,0	623,9	675,4	731,0
	В/Ц	0,77	0,68	0,72	0,65	0,65	0,70

Данные рис. 3 показывают, что использование белого цемента обеспечивает рост набора прочности матричного материала в период 1-7 суток твердения. При этом характер влияния снижения удельного расхода ПЦ имеет существенные различия. Для CemI-42,5(M500) – резкое изменение прочности в диапазоне от 408,9 до 421 кг/м³ с последующим плавным снижением показателя (до расхода 411 кг/м³). Очевидно, это связано с активностью белого цемента, обусловленной его повышенной тонкостью помола клинкера и повышенным содержанием алитовой составляющей. Подбор пластификатора, а также варианты замены микрокремнезема приведены в табл. 2.

Влияние вида активной добавки и пластификатора на прочность образцов мелкозернистого бетона представлено на рис. 4.

Опытные данные показывают, что использование Melflux 5581 F обеспечивает прирост прочности цементного камня на 3-4 %.

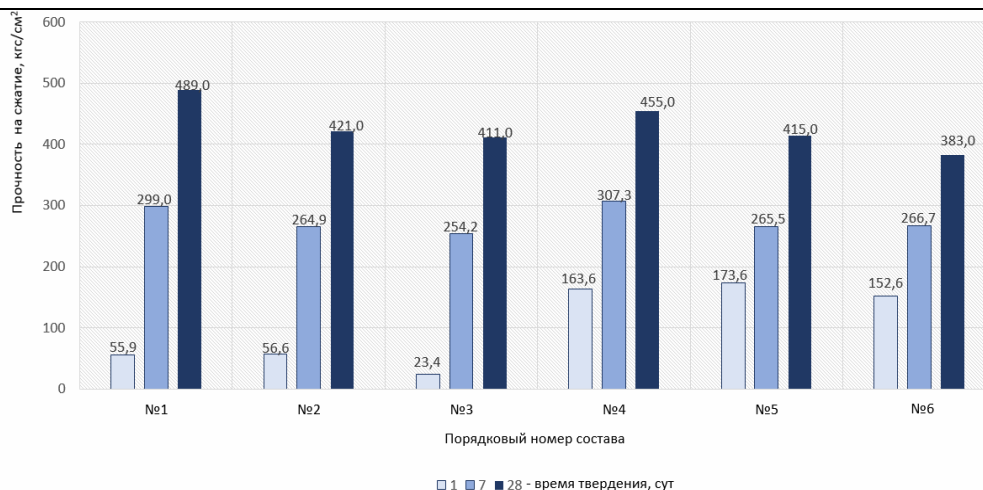


Рис. 3. Влияние состава на прочность матричной части газобетона

Т а б л и ц а 2

Расход компонентов модифицированных составов (кг на 1 м³)

№	Материал	Номер состава смеси					
		1 (баз.)	2	3	4	5	6
4	Белый портландцемент CemI-52,5	370,2	367,0	368,2	370,2	370,4	368,7
	Микрокремнезем МК-85	44,0			44,0	44,1	43,87
	Зола-унос		59,8				
	Метакаолин ВМК-45			54,5			
добавка	Пластификатор (% от массы ПЦ):						
	Melflux 2651 F (0,7)	2,6	2,6	2,6			
	Melflux 5581 F (0,4)					1,5	
	Melflux 5581 F (0,7)				2,6		
	C-3 (3,0)						11,1
3	Молотый кварцевый песок	454,1	451,0	452,1	454,1	454,3	452,3
2	Мелкий кварцевый песок	553,7	549,5	550,7	553,7	554,0	551,5
1	Средний кварцевый песок	675,4	670,1	672,0	675,4	675,7	672,6
	В/Ц	0,64	0,76	0,68	0,64	0,68	0,76

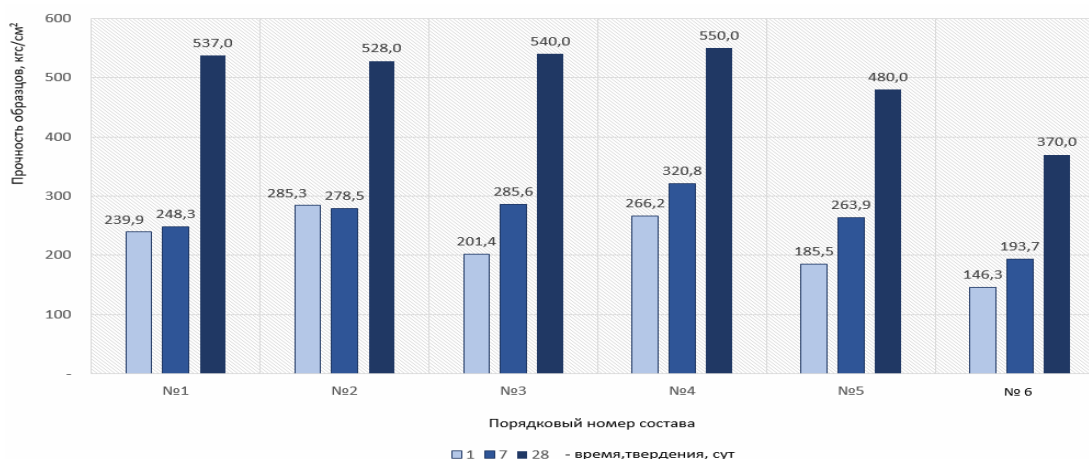


Рис. 4. Влияние добавок на прочность матричной части (нумерация по табл. 2)

С целью снижения затрат и создания эффекта дополнительной пористости определялась возможность частичной замены (до 50 %) молотого кварцевого песка на менее твердые аналоги, в том числе с развитой пористостью (природные опоки и

диатомиты). Составы модифицированных смесей сведены в табл. 3, а результаты испытаний – на рис. 5.



Рис. 5. Влияние вида наполнителя на прочность матрицы (нумерация по табл. 3)

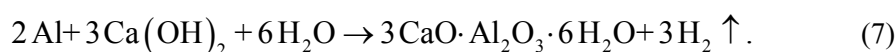
Т а б л и ц а 3

Расход компонентов модифицированных составов (кг на 1 м³)

№ фр.	Материал	Номер состава смеси					
		1	2	3	4	5	6
4	Белый портландцемент CemI-52,5	383,6	408,9	411,0	411,0	408,9	426,8
	Метакаолин ВМК-45	80,7	60,8	60,8	60,8	60,8	63,43
	Гиперпластификатор Melflux 5581 F (0,7 %)	2,7	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0
3*	Молотый кварцевый песок	470,6	235,9	237,0	237,0	235,9	246,2
	Молотое тарное стекло бутылочное		223,4				
	Опока природная			215,0			
	Опока дегидратированная (T=450°C)				215,0		
	Молотое тарное стекло хрустальное					223,4	
	Диатомит дегидратированный (T=450°C)						190,8
2	Мелкий кварцевый песок (0,14...0,63 мм)	540,8	543,2	546,3	546,3	543,2	552,6
1	Средний кварцевый песок (0,63...1,25 мм)	621,5	625,0	627,0	627,0	625,0	635,4
	В/Ц	0,68	0,69	0,69	0,76	0,70	0,76

Таким образом, показана целесообразность замены в составах газобетона до 50 % молотого кварцевого песка на легкий наполнитель в виде измельченной опоки или дегидратированного диатомита. Такое рецептурное решение позволяет сократить продолжительность помола инертных компонентов, снизить плотность газобетона при сохранении его прочностных показателей.

Наряду с гранулометрией минеральной части на качество газобетонной массы влияет корректное сочетание кинетики выделения газа и набора вязкости. В случае алюминиевого газообразователя выделение водорода, формирующего пористую структуру материала, описывается реакцией



Подготовку алюминиевой суспензии производили смешиванием компонентов (мас.ч.): алюминиевая пудра (15), хозяйственное мыло (1), дистиллированная вода (150). Количество щелочного компонента, участвующего в реакции (7), находили

методом титрования. Опыты проводили на негашёной извести, белом и сером портландцементе.

Количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделившееся при гидратации портландцемента, определяли в диапазоне соответствующем средней продолжительности интенсивного вспучивания газобетонной массы (рис. 6).

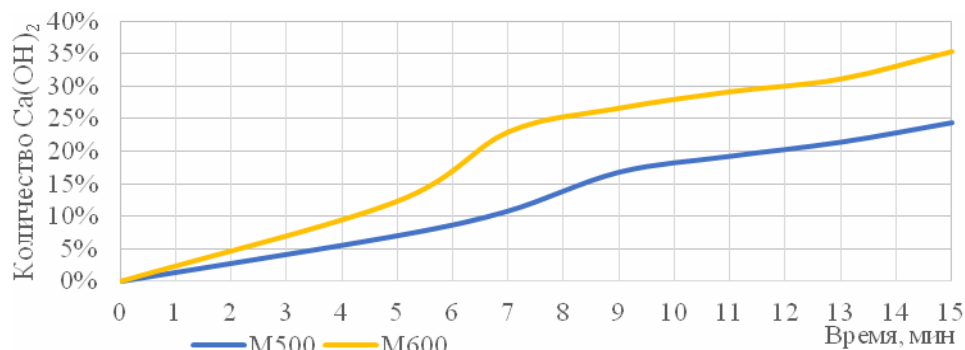


Рис.6. Кинетика выделения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в процессе гидратации ПЦ

Сравнение кривых выделения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ подтверждает сделанный ранее вывод о повышенном содержании алита в белом цементе (M600). С учетом полученных данных исследовали кинетику выделения водорода при введении алюминиевой суспензии в цементный раствор. Портландцемент принимался трех видов: серый бездобавочный марки M500 – (1) и (2), белый бездобавочный марки M600 – (3). Влияние вида цемента на процесс выделения газообразной фазы иллюстрируют графики на рис. 7.

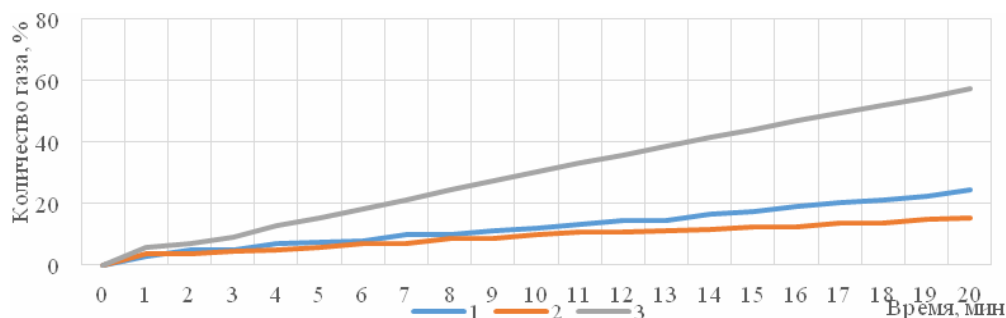


Рис. 7. Выделение газа от вида цемента (% от теоретического значения)

Выделение газа при добавлении суспензии в цементный раствор происходит линейно. Максимальная скорость газообразования наблюдается для состава №3, приготовленного на основе белого портландцемента.

Влияние замещения части портландцемента негашеной известью на процесс выделения водорода показано на рис. 8.

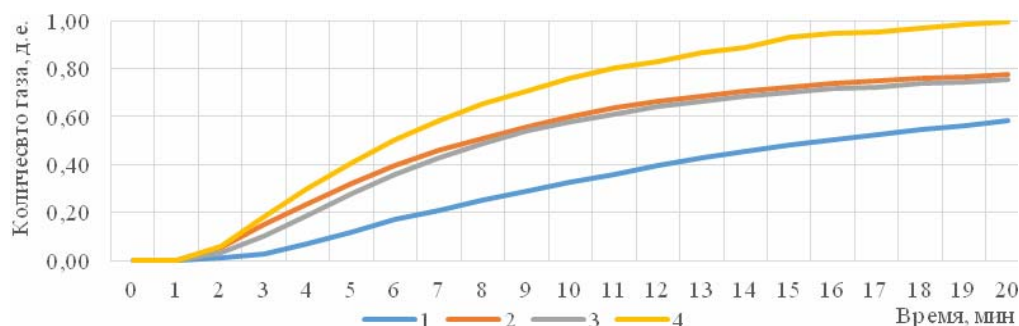


Рис. 8. Влияние добавки извести на количество выделяемого газа

Согласно полученным данным, эффективное выделение газа наблюдается при 15 %-м замещении портландцемента (кривая 4, рис. 8). В таких составах фактическое количество газа приближается к своему теоретическому значению.

Выводы

Показана перспективность применения РММА стрежней в качестве структурного компонента газобетона с несущей матрицей из высокопрочного порошкового бетона. При проведении дополнительных изысканий возможна трансформация светопрозрачного бетона в метабетон путем усиления его функционала «умными» качествами, включающем мониторинг деформаций и термических напряжений.

Скорость выделения газа при добавлении порошка АІ в цементный раствор увеличивается с повышением содержания алита в клинкере.

Замещение в составе сырьевой смеси до 15 % ПЦ на известь сопровождается увеличением количества выделяющегося водорода, которое приближается к своему максимальному теоретическому значению.

Список литературы

1. Танг Ван Лам. Светопропускающие бетоны с использованием золошлаковых и стекольных отходов / Танг Ван Лам, Ле Суан Тхань, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, С.И. Баженова // Нанотехнологии в строительстве. – 2025. – №17(4). – С.475–484.
2. Valambhiya, H.B. History and case study on light transmitting concrete / H.B. Valambhiya [et al.] // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2017. – Vol. 4. – № 1.
3. <https://alldecorpro.com/litracon> (дата обращения: 24.11.2025)
4. Кравцов, А.И. Вяжущее для получения светопроницаемого бетона / А.И. Кравцов, А.А. Макаева, С.А. Дергунов, И.А. Оденбах // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 3.
5. Попов, С.Н. Влияние механических нагрузок на светопропускание волоконных световодов / С.Н. Попов, А.С. Парасына, В.С. Чагулов // Квантовая электроника. – 1979. – № 3. – 6.
6. Хижняк, С.Д. Влияние температуры на светопропускание полимерного оптического волокна / С.Д. Хижняк, П.М. Пахомов, А.И. Зубков // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1996. – Т. 38, №9. – С.1623–1626.
7. Sawant, A.B. Light Transmitting Concrete by using Optical Fiber / A.B. Sawant, R.V. Jugdar, S.G. Sawant // International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES). – 2014. – Vol.3, Is.1.

References

1. Tang Van Lam. Light-transmitting concretes with the use of ash and glass waste / Tang Van Lam, Le Xuan Thanh, B.I. Bulgakov, O.V. Aleksandrova, S.I. Bazhenova // Nanotechnology in construction. – 2025. – №17(4). – P.475–484.
2. Valambhiya, H.B. History and case study on light transmitting concrete / H.B. Valambhiya [et al.] // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2017. – Vol. 4. – № 1.
3. <https://alldecorpro.com/litracon> (accessed on 24.11.2025)
4. Kravtsov, A.I. Binder for obtaining light-permeable concrete / A.I. Kravtsov, A.A. Makayeva, S.A. Dergunov, I.A. Odenbakh // Bulletin of Eurasian Science. – 2024. – Vol. 16, No. 3.
5. Popov, S.N. Influence of mechanical loads on the light transmission of fiber light guides / S.N. Popov, A.S. Parasyina, V.S. Chagulov // Quantum electronics. – 1979. – №. 3. – 6.
6. Khizhnyak, S.D. Effect of temperature on light transmission of polymer optical fiber / S.D. Khizhnyak, P.M. Pakhomov, A.I. Zubkov // High Molecular Weight Compounds. Ser. B. – 1996. – Vol. 38, No. 9. – P. 1623–1626.
7. Sawant, A.B. Light Transmitting Concrete by using Optical Fiber / A.B. Sawant, R.V. Jugdar, S.G. Sawant // International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES). – 2014. – Vol.3, Is.1.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8412) 48-74-77

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Семилетков Александр Викторович,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

Присевка Александр Сергеевич,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»

Semiletkov Aleksandr Viktorovich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

Prisevka Aleksandr Sergeevich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНЫ НА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ, АРМИРОВАННЫХ НАТУРАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

В.А. Береговой, А.В. Семилетков, А.С. Присевка

Проведен анализ свойств и возможностей применения магнезиальных вяжущих в современном строительстве. Рассмотрены их характерные технологические преимущества, включая высокую прочность и хорошую адгезию к различным типам заполнителей. Особое внимание уделено вопросам повышения водостойкости композитов и разработке методов использования местного доломитового сырья. Представлены результаты исследования функциональных возможностей материалов на основе магнезиальных вяжущих для создания радиационно-защитных и архитектурных конструкций. Проанализированы перспективы модификации составов для расширения областей их практического применения.

Ключевые слова: магнезиальные вяжущие, доломитовое сырье, текстиль-бетон, натуральные волокна, водостойкость, радиационная защита, селективный термоллиз, модифицирующие добавки, строительные композиты

TEXTILE CONCRETES BASED ON MAGNESIA BINDERS REINFORCED WITH NATURAL FIBERS

V.A. Beregovoy, A.V. Semiletkov, A.S. Prisevka

The article analyzes the properties and application possibilities of magnesia binders in modern construction. Their characteristic technological advantages, including high strength and good adhesion to various types of aggregates, are considered. Special attention is paid to improving the water resistance of composites and developing methods for using local dolomite raw materials. The functional capabilities of materials based on magnesia binders for the creation of radiation-protective and architectural structures are investigated. The prospects of modification of compositions for expansion of areas of their practical application are analyzed.

Keywords: magnesia binders, dolomite raw materials, textile concrete, natural fibers, water resistance, radiation protection, selective thermolysis, modifying additives, building composites

Введение

Магнезиальные вяжущие характеризуются сочетанием уникальных для современного строительства качеств. К ним относятся: быстрый набор прочности, высокая марочная прочность на сжатие, коррозионная стойкость, износостойкость и твердость,

прочность на изгиб и удар, высокие адгезионные свойства к органическим заполнителям, экологичность. Относительно других высокопрочных минеральных вяжущих технологию их получения отличает энергоэффективность основных процессов, обусловленная пониженными значениями температуры и времени обжига (соответственно 800°C и 1-1,5 часа). Серьезными сдерживающими факторами для широкого распространения магнезиальных бетонов и растворов в повседневной практике строительства являются недостаточная водостойкость и коррозия стальной арматуры.

За рубежом повышение водостойкости достигается путем автоклавной обработки. Австрийская фирма «Heraclit», автоклавируя смеси на основе магнезиального цемента и древесной шерсти, производит фибролитовые плиты повышенной водостойкости. В работе [1] показана эффективность модифицирования вяжущего путем использования тонкодисперсных материалов в виде доменного шлака, микрокремнезема или природных гидросиликатов магния. При этом прочность оптимальных составов достигает 100 МПа, а водостойкость 0,95. По данным, приведенным в работе [2], увеличению водостойкости магнезиального камня способствует использование железосодержащих добавок, ионы которых путем замещения Cl^- в структуре гидратных новообразований, обеспечивают формирование менее растворимых (в сравнении с $5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$) оксигидроферритов магния. На такую возможность указывает распространенная для минералов из ряда кальцита способность образования изоморфных смесей, особенно с участием Mg, Fe и Zn, которые часто замещают друг друга (кальцит CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , сидерит FeCO_3 , родохрозит MnCO_3 , смитсонит ZnCO_3).

С учетом специфики свойств магнезиальные бетоны и растворы применяют для устройства теплых полов, производства штукатурных составов, деталей интерьеров и крупноформатных облицовочных панелей [3]. Наличие в магнезиальном камне значительного количества химически связанной воды позволяет использовать растворы на его основе для защиты от радиационного воздействия [4].

По данным производителей медицинского оборудования при напряжениях на рентгеновской трубке от 75 до 150 кВт, широко используемых в радиологических исследованиях, замена цементно-баритовых на магнезиально-баритовые штукатурные смеси ($\text{BaSO}_4=90\%$) обеспечивает равную по свинцовому эквиваленту защиту от ионизирующего излучения при уменьшении требуемой толщины слоя в 2,5...2,7 раза.

В общем случае степень ослабления ионизирующего излучения зависит от плотности материала и зарядов ядер атомов элементов

$$\mu_{\phi} = 0,089 \lambda^h \rho \frac{Z^{4,1}}{A}, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества поглотителя; Z и A – заряд ядра атома (порядковый номер) и атомная масса элемента; λ – длина волны γ -кванта; h – эмпирический коэффициент.

При расчете минимальной толщины защиты d от нейтронов плотность материала защиты прямо влияет на выбор длины релаксации пучка

$$d = \alpha \ln K_1, \quad (2)$$

где K_1 – необходимая кратность ослабления; α – длина релаксации.

Для обычного конструкционного бетона средней плотностью $2300 \pm 50 \text{ кг/м}^3$ длина релаксации принимается равной 16 см [5], при этом толщину защиты можно уменьшать пропорционально возрастанию плотности применяемого материала $\rho_{\text{пр}}$ [ГОСТ 20426-82].

$$\mu_{\text{пр}} = \mu_{\text{н}} \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{пр}}}. \quad (3)$$

Очевидно, что использование баритового бетона с плотностью более 3500 кг/м^3 обеспечивает уменьшение толщины конструкций и стоимости комплексной защиты от ионизирующего излучения.

Наряду с ограничениями, связанными с воздушным типом твердения и наличием хлора в затвердевшем камне, продвижение магнезиальных бетонов в строительстве сталкивается с проблемой нехватки подходящей минерально-сырьевой базы – природного магнезита. В этой связи проводятся многочисленные исследования, направленные на нахождение способов переработки более распространенных горных пород с пониженным содержанием Mg, например доломитов ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$), для выработки на их основе магнезиальных вяжущих, удовлетворяющих пороговым нормативным требованиям по содержанию оксида магния.

Наряду с MgO , доля которого не превышает 20...22 %, в состав вяжущих, получаемых термолизом низкосортных магнийсодержащих горных пород, входят порошкообразные примеси, проявляющие различную степень активности к процессам гидратации. С учетом химического сродства и способности к формированию изоморфных смесей с продуктами гидратации кальцит, составляющий основу остатка селективного термолиза $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$, формирует подложку для образования и активного роста гидратных фаз, способствующих повышению плотности структуры затвердевшего композита [6].

Учитывая хорошую адгезию магнезиальных вяжущих к поверхности древесных и растительных заполнителей, а также их прочность, доступность, ежегодную возобновляемость представляется перспективным направление, связанное с трансформацией технологий получения магнезиальных фибролитовых бетонов в сторону текстиль-бетонов [7]. Матрица таких композитов формируется в результате твердения мелкозернистого (или порошкового) бетона, а армирование производится тканями или неткаными материалами. Как правило, основу армирующей части составляют высокомодульные волокна, вырабатываемые из дорогих материалов (AR-стекла, кевлар и т.п.) [8]. Применение более доступных полимерных волокон в качестве армирующих компонентов (полипропилен, полиамиды) ограничено низкой адгезионной прочностью и разницей термических деформаций в зоне контакта при перепаде температур.

В связи с заявленным во многих директивных документах переходом к «зеленым» технологиям сейчас наметился ренессанс исследований, связанных с проблематикой использования растительных волокон для армирования бетонов. Высокая щелочность портландцементного камня разрушает целлюлозосодержащие соединения, снижая тем самым долговременную прочность материала. В этой связи применение магнезиальных вяжущих, как материала-основы для изготовления текстиль-бетонов, дает явные преимущества.

Возможность широкого подбора оптимального материала нитей по прочности (табл. 1), схеме и способу плетения, общей геометрии армирующего слоя (рис. 1) расширяет перспективы практического инжиниринга с использованием текстиль-бетонов. При этом метод формовки бетона (залливка, ламинирование, экструзия) и фиксации в его теле отдельных нитей (посредством ткачества, плетения, вязания, склеивания и др.) варьируется в зависимости от назначения бетонного изделия [9].

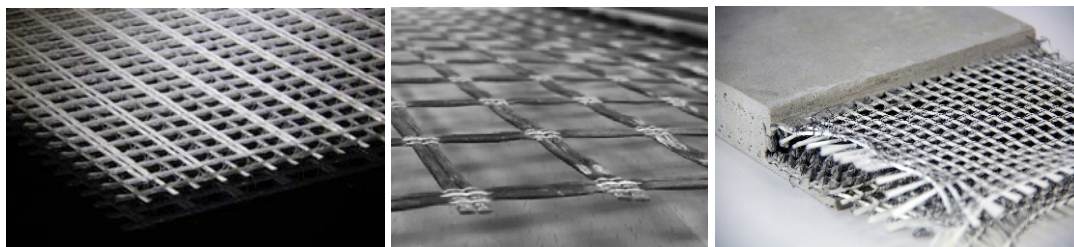


Рис.1. Схемы фиксации нитей в теле текстиль-бетона

Применение способа ламинирования с использованием самоуплотняемой бетонной смеси представляется наиболее перспективным, поскольку он обеспечивает оптимальное послойное распределение материала-основы по опалубке и последующую точную укладку армирующего текстиля в заданном месте сечения изделия с учетом эксплуатационных нагрузок. Дополнительно структурной оптимизации текстиль-

бетона способствует строго контролируемое уплотнение каждого слоя, регулируемое давлением и временем воздействия прижимного устройства, при котором матричная часть полностью продавливается в промежутки между волокнами, формируя надежные контактные зоны.

Т а б л и ц а 1

Механические показатели растительных волокон [9]

Волокно		Прочность $R_{\text{раст}}$, МПа	E , ГПа	Удлинение при разрыве, %	Плотность, г/см ³
Сырье	Название				
Стебли / лубяной материал	Абака	400	12	3-10	1,5
	Лен	345-1035	27.6	2.7-3.2	1,5
	Джут	393-773	26.5	1.5-1.8	1,3
	Конопля	690	70	1.6	1,48
Листья	Сизаль	511-635	9.4-22	2-2.5	1,5
	Курауа	500-1150	11.8	3.7-4.3	1.4
	Ананас	400-627	1.44	14.5	0,8-1,6
Семена/ плоды	Кокосовая койра	175	4-6	30	1,2
	Масличная пальма	248	3.2	25	0,7-1,55

Небольшая толщина конструкций из текстиль-бетона и способность к повышенным обратимым деформациям улучшает архитектурную выразительность строительных объектов, применяемых в арт- и ландшафтном дизайнах (рис. 2).



Рис. 2. Мебель из текстиль-бетона [8]

Разрабатывая технологии получения магнезиальных цементов, необходимо учитывать региональную специфику сырьевой базы и рассматривать перспективы их использования, как более доступного местного вяжущего, обладающего определенными преимуществами при возведении конструкций специального назначения (быстротвердеющие, высокопрочные, огнестойкие и огнеупорные бетоны, тампонажные растворы, безыскровые покрытия, плиточный клей для солевых блоков, искусственной мрамор, стекломagneиные листы).

Исходя из этого был проведен анализ данных о минералогическом составе единственного в Пензенской области промышленного производителя доломитового щебня и доломитовой муки (ООО «Иссинский КСМ»), балансовые запасы которого превышают 27721,3 тыс. м³. Использование Иссинского доломита в качестве заполнителя для конструктивных бетонов проблематично по причине низкой прочности породы (М200-М400), поэтому в настоящее время основной объем вырабатываемого природного сырья расходуется при производстве дорожных материалов. Учитывая минеральный состав местного доломита (45 % CO₂, 30 % CaO и 20 % MgO), а также

существующий технический регламент (ГОСТ Р 70196-2022, ТУ 7266-001-72664728-2014), устанавливающий 20 %-е пороговое содержание оксида магния в составе вяжущего, был сделан предварительный вывод о целесообразности его применения в качестве сырьевого источника для получения магнезиально-доломитового цемента.

Наличие в составе порошка вяжущего остаточной фазы в виде реликтового CaCO_3 обуславливает специфику твердения магнезиально-доломитового цемента (МДЦ). Упрощенно гидратацию такого цемента можно рассматривать как частный случай формирования микробетона, состоящего из магнезиальной матрицы и карбонатного наполнителя.

Особенность магнезиальных вяжущих заключается в использовании растворов солей в качестве среды затворения, что существенно влияет на свойства искусственного камня. В этом качестве чаще используют хлорсодержащие соединения (природный бишофит, MgCl_2 , растворы HCl), реже – сульфаты. Основные продукты твердения магнезиальных цементов – оксихлориды магния, которые являются причиной низкой водостойкости, повышенного сорбционного увлажнения и коррозии стальной арматуры. В этой связи поиск оптимального затворителя остается актуальной задачей (использование сульфатных растворов несколько повышает коэффициент водостойкости).

В литературе описано много способов повышения водостойкости магнезиальных цементов, из которых наиболее распространены добавки соединений фосфора, аморфного кремнезёма, а также объёмная гидрофобизация. Установленная в ходе предыдущих исследований ПГУАС эффективность стеарата цинка в качестве гидрофобизирующей добавки для бетонов [10] обосновывает целесообразность изучения родственного соединения – стеарата магния – для модификации магнезиальных бетонных композитов с целью снижения их водопоглощения.

Описание использованных материалов

Вяжущее промышленного производства – магнезиальный цемент «МАГцемент» в виде композиционной магнезиальной сухой строительной смеси (КМССС). В состав входит магнезиальное вяжущее и затворитель – хлористый магний (водный раствор).

Заполнители (минеральные):

Мелкий заполнитель (песок кварцевый по ГОСТ 8736-2014):

- фракционированный фр. 0-0,63 мм, фр. 0,63-2,5 мм (г. Красноярск);
- Сурского месторождения (Пензенская обл.) $M_k=1,4$;
- Песчанковского месторождения (Саратовская обл.) $M_k=2,33$.

Крупный заполнитель:

- фракция 1,25-2,5 мм, полученная дроблением гранитного щебня М1400.

В качестве растительных заполнителей планируется использовать:

- скоп (рис. 3) – продукт переработки древесины при производстве бумаги, состоящий из волокнистой целлюлозосодержащей (волокно длиной от 0,1 до 1 мм) и порошкообразной минеральной частей (мел, каолин, TiO_2).



Рис. 3. Армирующие волокна из переработанного скопа

Разработка экспериментального вяжущего. Магнезиально-доломитовое вяжущее получали путем тонкого помола природного доломита, предварительно обожженного при различных температурах термолитиза MgCO_3 .

Известно, что оптимальная температура обжига колеблется в пределах 650-760°C и зависит от генезиса доломитов. Так, первичные доломиты имеют равномерную

микрозернистую структуру, а вторичные, как правило, характеризуются крупнокристаллической структурой. В свою очередь, увеличение среднего размера кристаллитной структуры сужает интервал селективной диссоциации до 100-115°C. При постоянной продолжительности обжига содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ в продукте обжига возрастает: у доломита с большой кристалличностью – с 1,5 до 2 %, у доломита с малой кристалличностью – с 8 до 10 %. В результате прочность каустического доломита снижается на 39 % в возрасте 28 суток [11].

Исходя из имеющейся информации, был выбран следующий режим обжига исходного сырья:

- температура обжига 760 °C;
- время 1,5 часа;
- охлаждение в течение 12 часов (вместе с печью);
- для затворения использовался водный раствор MgCl_2 плотностью 1,2 г/см³.

В качестве эталона сравнения использовали коммерческий продукт марки КМССС. Для этого были определены его фактические показатели свойств на различных периодах твердения (рис. 4).

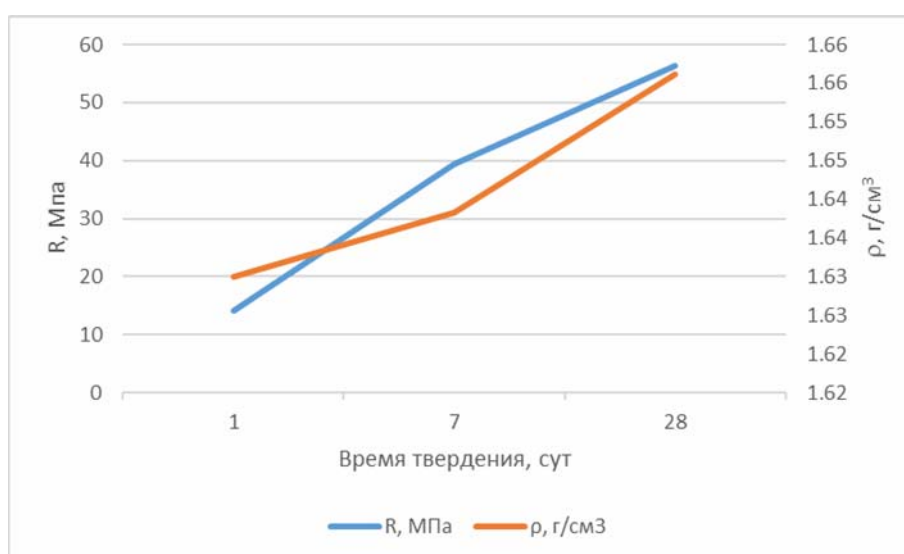


Рис. 4. Зависимость основных физико-механических свойств композита от сроков твердения

Исходя из специфики применения вяжущего, дополнительно определяли динамические характеристики образцов на его основе (рис. 5).

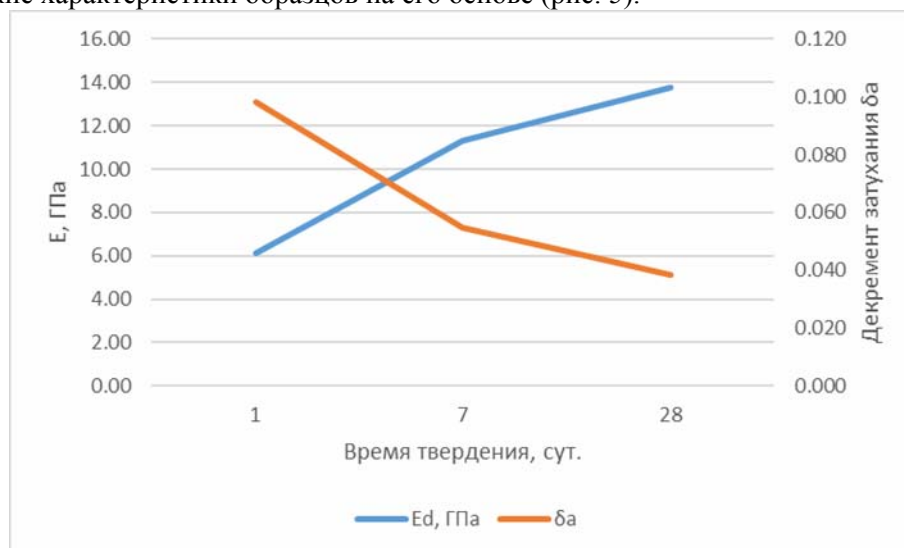


Рис. 5. Динамические показатели искусственного камня на основе магнезиального цемента (КМССС)

Несмотря на то что в документах (ОСТ НКТП 4294 и ТУ 7266-001-72664728-2014) ограничивается содержание MgO (более 20 %) и CaO_{св} (менее 5 %), отдельные исследователи, основываясь на данных собственных экспериментов, по-своему определяют их допустимые содержания. В работе [12] показано, что снижение относительного содержания MgO в диапазоне 21,5...16,3 % сопровождается падением прочности искусственного камня после 28 суток твердения с 112 до 35 МПа. В предельном случае (при MgO=14,5 %) прочность вяжущего остается достаточной для большинства видов строительных растворов и отдельных видов бетонов $R_{сж}=20\pm5$ МПа. Таким образом, устоявшееся мнение о пороговом значении минимального содержания MgO в «низкосортном» магнезиальном сырье нуждается в корректировке, поскольку опровергается экспериментальными данными, свидетельствующими, что совершенствованием технологии (гранулометрия, время и температура обжига, активаторы селективного термоллиза) можно получать местные вяжущие с прочностью на уровне высокопрочных марок гипса и ангидритового цемента [13].

Количественное определение оксида магния в образце доломитовой муки после обжига проводили комбинированным методом, включавшим измерение потери массы при обжиге и последующее титрометрическое определение активности извести. Установленная массовая доля MgO составила 10...14 %. В настоящее время исследования продолжаются, но можно констатировать, что минимальные значения прочности контрольных образцов после твердения в течение 2 суток составляют 3,8 МПа.

Выводы

Проведенное исследование позволяет теоретически обосновать перспективность применения магнезиальных вяжущих в качестве базовой матрицы для специализированных строительных композитов. Установлено, что ключевые физико-химические характеристики данных вяжущих – обусловленная особенностями гидратации новообразований высокая прочность на изгиб и сдвиг, а также выраженная адгезионная активность к полярным поверхностям –предопределяют их эффективное использование в многокомпонентных системах, в частности, в текстиль-бетонах, армированных натуральными волокнами. Низкая щелочность среды затвердевшего магнезиального камня создает теоретические предпосылки для длительной сохранности целлюлозной арматуры, что принципиально отличает данные системы от портландцементных аналогов и открывает путь к созданию долговечных биоармированных композитов.

С позиций ресурсосбережения и импортозамещения теоретически и экспериментально подтверждена возможность синтеза эффективного магнезиального вяжущего на основе низкосортного доломитового сырья. Регулирование параметров селективного термоллиза и введение добавок-интенсификаторов позволяет целенаправленно влиять на фазовый состав и дисперсность продукта обжига, преодолевая ограничения, связанные с пороговым содержанием оксида магния.

Таким образом, совокупность выявленных закономерностей формирует научную основу для целенаправленного проектирования функциональных материалов с заданными свойствами. Полученные результаты расширяют теоретические представления о возможностях применения магнезиальных систем не только в традиционных строительных растворах, но и в качестве ключевого компонента в радиационно-защитных композициях, огнестойких покрытиях и архитектурных текстиль-бетонах, что определяет новое направление в развитии композиционных материалов специального назначения.

Список литературы

1. Крамар, Л.Я. Особенности твердения магнезиального вяжущего / Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, Б.Я. Трофимов / Цемент и его применение. – 2006. – №. 5. – С. 58–61.
2. Зырянова, В.Н. Водостойкие композиционные магнезиальные вяжущие вещества на основе природного и техногенного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В.Н. Зырянова. – Томск, 2010. – 40 с.

3. Фаликман, В.Р. Бетоны на каустическом доломите для полов промышленных зданий / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, Н.Ф. Башлыков, В.А. Смирнов // Бетон и железобетон. – 2004. – № 2. – С. 2–4.
4. Капустина, И.Б. Исследование возможности получения магнезиально-минеральной матрицы на основе доломита для иммобилизации радиоактивных отходов / И.Б. Капустина, В.Н. Соловьев, Г.И. Фокина, А.С. Левчук // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2012. – №. 4. – С. 17–23.
5. Радиационно-защитные баритовые и штукатурные покрытия. – URL: <https://alpha-pol.ru/brochure/radiatsionno-zashhitnye-baritovye-napolnye-i-shtukturnye-pokrytiya.pdf> (дата обращения: 15.11.2025).
6. Орлов, А.А. Сульфатно-магнезиальная композиция и сухие штукатурные смеси на ее основе / А.А. Орлов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – №. 35 (168). – С. 39–42.
7. Scherer, S. Brücken aus Textilbeton. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten / S. Scherer, H. Michler, M. Curbach. – 2014. – S. 118–129.
8. Лесовик, В.С. Текстиль-бетон – эффективный армированный композит будущего / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов, Е.С. Глаголев // Строительные материалы. – 2017. – №3. – С.81–84.
9. Onuaguluchi, Obinna. Plant-based natural fibre reinforced cement composites : A review / Obinna Onuaguluchi, Nemkumar Banthia // Cement & Concrete Composites. – 2016. – Vol. 68. – P. 96–108.
10. Замчалин, М.Н. Повышение характеристик неавтоклавного ячеистого бетона за счёт применения гидрофобизирующих добавок / М.Н. Замчалин, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // Современные научные исследования и инновации. – 2014.
11. Цыремпилов, А.Д. Стеновые материалы на основе магнезиально-доломитового цемента / А.Д. Цыремпилов, Н.В. Архинчеева, М.Ю. Истомин // Строительные материалы. – 1998. – №6. – С. 37–38.
12. Шелихов, Н.С. О расширении интервала пригодности карбонатного сырья для производства доломитового цемента / Н.С. Шелихов // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 2 (16). – С. 251–256.
13. Шелихов, Н.С. Особенности карбонатного сырья Татарстана и его применение для производства местных строительных материалов / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов // Известия КГАСУ. – 2010. – №2. – С. 297–302.

References

1. Kramar, L.Ya. Features of magnesia binder hardening / L.Ya. Kramar, T.N. Chernykh, B. Ya. Trofimov / Cement and its application. – 2006. – No. 5. – pp. 58-61.
2. Zyryanova, V.N. Waterproof composite magnesia binders based on natural and man-made raw materials : abstract of the dissertation ... doctor of Sciences : 05.23.05 / V.N. Zyryanova. – Tomsk, 2010. – 40 p.
3. Falikman, V.R. Caustic dolomite concrete for floors of industrial buildings / V.R. Falikman, Yu.V. Sorokin, N.F. Bashlykov, V.A. Smirnov // Concrete and reinforced concrete. – 2004. – No. 2. – P. 2–4.
4. Kapustina, I.B. Investigation of the possibility of obtaining a magnesia-mineral matrix based on dolomite for the immobilization of radioactive waste / I.B. Kapustina, V.N. Soloviev, G.I. Fokina, A.S. Levchuk // Vesci National Academy of Sciences of Belarus. Gray fiction-tehnichnykh nauk. – 2012. – No. 4. – P. 17–23.
5. Radiation-protective barite and plaster coatings. – URL: <https://alpha-pol.ru/brochure/radiatsionno-zashhitnye-baritovye-napolnye-i-shtukturnye-pokrytiya.pdf> (date of request: 11/15/2025).
6. Orlov, A.A. Sulfate-magnesia composition and dry plaster mixtures based on it / A.A. Orlov, T.N. Chernykh, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. – 2009. – №. 35 (168). – P. 39–42.

-
7. Scherer, S. Brücken aus Textilbeton. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten / S. Scherer, H. Michler, M. Curbach. – 2014. – P. 118–129.
 8. Lesovik, V.S. Textile-concrete – an effective reinforced composite of the future / V.S. Lesovik, D.Y. Popov, E.S. Glagolev // Building Materials. – 2017. – No. 3. – P.81–84.
 9. Onuaguluchi, Obinna. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review / Obinna Onuaguluchi, Nemkumar Banthia. //Cement & Concrete Composites. – 2016. – Vol. 68. – P. 96–108.
 10. Zamchalin, M.N. Improving the characteristics of non-autoclaved cellular concrete through the use of hydrophobic additives / M.N. Zamchalin, M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina // Modern Scientific Research and Innovations. – 2014.
 11. Tsyrempilov, A.D. Wall materials based on magnesia-dolomite cement / A.D. Tsyrempilov, N.V. Arkhincheeva, M.Y. Istomin // Building Materials. – 1998. – No. 6. – P. 37–38.
 12. Shelikhov, N.S. On extending the range of suitability of carbonate raw materials for the production of dolomite cement / N.S. Shelikhov // KazGASU News. – 2011. – № 2 (16). – P. 251–256.
 13. Shelikhov, N.S. Features of carbonate raw materials of Tatarstan and its use for the production of local building materials / N.S. Shelikhov, R.Z. Rakhimov // Izvestiya KGASU. – 2010. – No. 2. – P. 297–302.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Грачева Юлия Вячеславовна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: gracheva_jv@mail.ru

Сафин Роман Борисович,
студент
E-mail: gds@pguas.ru

Нарзяева Алина Владимировна,
студент
E-mail: gds@pguas.ru

Ефименко Виолетта Александровна,
студент
E-mail: gds@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Gracheva Yulia Vyacheslavovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Geotechnics and Road
Construction»
E-mail: gracheva_jv@mail.ru

Safin Roman Borisovich,
Student
E-mail: tnelly77@mail.ru

Narzyaeva Alina Vladimirovna,
Student
E-mail: gds@pguas.ru

Efimenko Violetta Aleksandrovna,
Student
E-mail: gds@pguas.ru

ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ

Ю.В. Грачева, Р.Б. Сафин, А.В. Нарзяева, В.А. Ефименко

Представлен анализ испытания грунтов методом компрессионного сжатия для определения сжимаемости дисперсных грунтов, а также параметров консолидации – коэффициента фильтрационной консолидации и коэффициента вторичной консолидации.

Ключевые слова: дисперсный грунт, сжимаемость, уплотнение, компрессионная кривая, метод компрессионного сжатия, параметры консолидации

REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING SOIL COMPRESSIBILITY

Yu.V. Gracheva, R.B. Safin, A.V. Narzyaeva, V.A. Efimenko

The article presents an analysis of the review of soil testing using the compression method to determine the compressibility of dispersed soils, as well as consolidation parameters – the coefficient of filtration consolidation and the coefficient of secondary consolidation.

Keywords: dispersed soil, compressibility, compaction, compression curve, compression method, consolidation parameters

Сжимаемость грунтов – это уменьшение их в объеме, т.е. способность давать осадку под действием внешней нагрузки. Явления, происходящие при сжатии грунта, зависят от его структуры.

Уплотнение песчаных грунтов происходит в короткие сроки в результате взаимного перемещения частиц независимо от влажности.

Уплотнение глинистых грунтов происходит обусловлено деформированием гидратных оболочек вокруг частиц. При этом скорость уплотнения глинистых грунтов зависит от степени влажности грунта. При полном водонасыщении глинистых грунтов скорость уплотнения определяется их водопроницаемостью и мощностью сжимаемого слоя [1, 2].

При малых значениях коэффициента фильтрации и большой мощности сжимаемого слоя процесс уплотнения может протекать многие годы.

Из-за наличия в грунтах воздуха, имеющего возможность свободно выходить из грунта, сжатие происходит более быстро и не зависит от водопроницаемости. Гидратные оболочки при этом деформируются, но влажность породы остается неизменной.

Многочисленные опыты [1-2], проведенные над грунтами, показали, что каждому давлению, действующему на грунт, соответствуют определенные пористость и влажность.

Графически зависимость пористости от давления изображают компрессионной кривой.

В общем виде компрессионная кривая выражается уравнением

$$e = -A \ln (P + P_c) + C_2, \quad (1)$$

где e – коэффициент пористости; P – давление, соответствующее данному коэффициенту пористости; P_c – постоянная грунта, имеющая измерение давления и соответствующая начальному коэффициенту пористости; C – коэффициент уплотнения грунта; C_1 – постоянная интегрирования.

Если первоначально загруженный грунт постепенно разгружать, то пористость его будет увеличиваться [2]. Это явление, обратное сжатию, носит название набухание.

В ходе исследований были определены сжимаемость и параметры консолидации природного грунта для расчетов усадок и скорости их протекания во времени с применением теории фильтрационной консолидации.

Испытание грунтов для определения компрессионной кривой состоит в том [3-5], что образец грунта, заключенный в металлический цилиндр, подвергается равномерно распределенной нагрузке. Дно и поршень цилиндра оборудованы специальными пористыми прокладками, отводящими выдавливающуюся из образца воду.

При приложении внешней нагрузки на образец происходит изменение его высоты, которая регистрируется измерительными приборами.

Увеличение нагрузки производится после стабилизации деформации грунта под действием предыдущей нагрузки.

Для испытуемого грунта необходимо установить удельный вес, начальную влажность и объемный вес [3], а также приведенную пористость, которой обладал грунт до испытания (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Физические характеристики исследуемого грунта

Природная влажность ω , %	Влажность на границе раскатывания ω_p , %	Влажность на границе текучести ω_L , %	Плотность ρ , г/см ³	Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Пористость n , %	Начальный коэффициент пористости e_0 , д.е.	Число пластичности I_p , д.е.	Показатель текучести I_L , д.е.
17,9	6,6	22,8	1,92	2,70	1,63	39,8	0,66	16,2	0,70
16,1			1,91		1,65	38,9	0,64		0,59

Зная начальную пористость и изменения высоты образца в процессе сжатия, устанавливается пористость при любой нагрузке (рис. 1).

Указанный способ построения компрессионной кривой основан на измерении линейной деформации образца.

Существует способ построения компрессионной кривой по влажности, основанный на учете изменения влажности образца в процессе опыта при различных нагрузках. По этому способу после каждой ступени нагружения производится нагрузка образца и его взвешивание после стабилизации осадки. Опыт проводится при нескольких ступенях давления. По окончании опыта образец высушивается и опреде-

ляется вес скелета грунта. Зная коэффициент пористости грунта при различных давлениях, определяется влажность образца, соответствующая каждому давлению.

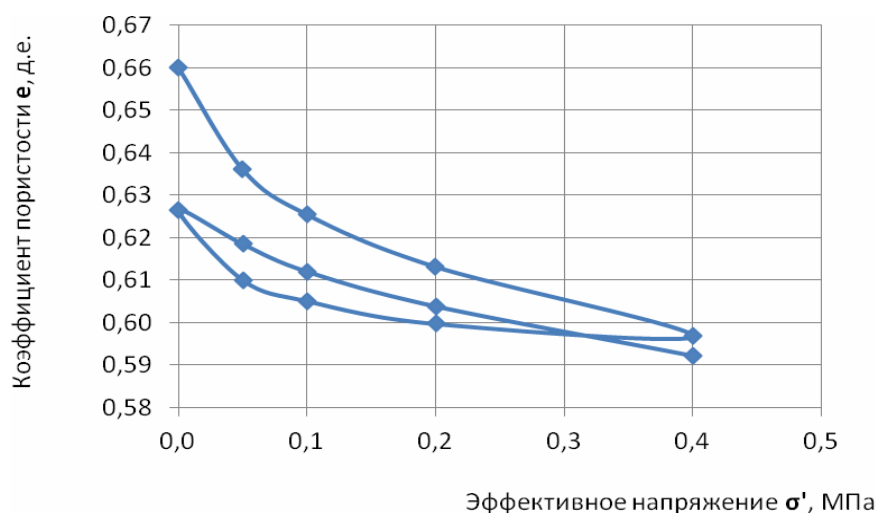


Рис. 1. Компрессионная кривая – сжатие грунта за счет приложения к нему внешней нагрузки

Способ построения компрессионной кривой по изменению влажности применим к грунтам, находящимся в состоянии полного водонасыщения. Кроме того, необходимо заметить, что этот способ несколько сложнее способа, основанного на измерении деформации образца в приборе.

Описание способа построения компрессионной кривой по влажности можно найти в работах [1, 2].

В настоящее время принято вести расчет компрессии по данным непосредственных измерений деформаций образца. Одновременно для контроля необходимо производить определение влажности и пористости исследуемого образца в начале и в конце испытания путем взвешивания всего образца (табл. 1, рис. 1, 2).

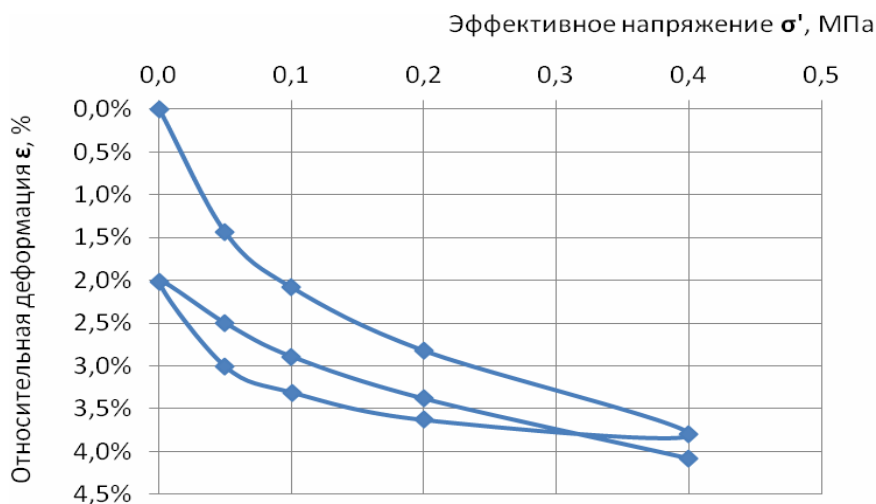


Рис. 2. Зависимость относительной вертикальной деформации от равномерно распределенной нагрузки

Параметры деформируемости исследуемого грунта

Полное давление σ , МПа	Абсолютная деформация h , мм	Относительная деформация ε , %	Коэффициент пористости e , д.е.	Коэффициент сжимаемости m_0 , 1/МПа	Секундный модуль E_{oed} , МПа	Модуль повторного нагружения E_{ur} , МПа	Касательный одометрический модуль E_{oed}^k , МПа
0,00	0,00	0,00	0,660	0	0,00	12,42	7,81
0,05	0,36	1,44	0,636	0,479	3,47		
0,10	0,52	2,08	0,625	0,213	7,80		
0,20	0,71	2,82	0,613	0,123	13,50		
0,40	0,95	3,80	0,597	0,081	20,45		
0,20	0,91	3,63	0,600	0,014	117,71		
0,10	0,83	3,31	0,605	0,053	31,13		
0,05	0,75	3,01	0,610	0,099	16,77		
0,00	0,50	2,02	0,626	0,329	5,04		
0,05	0,63	2,50	0,618	0,160	10,40		
0,10	0,72	2,89	0,612	0,129	12,85		
0,20	0,84	3,38	0,604	0,082	20,37		
0,40	1,02	4,08	0,592	0,058	28,56		

Уплотнение грунтов во времени под действием внешней нагрузки приводит к их уменьшению в объеме, т.е. к сжатию. Консолидация грунтов во времени описывается фильтрационной теорией консолидации Терцаги – Герсеванова – Флорина [1, 2]. Внешнее давление, прикладываемое к поверхности грунта в начальный момент времени, полностью передается на поровую воду, создавая напор, под действием которого и происходит фильтрация, т.е. выжимание воды из пор грунта. Кроме того, для глинистых грунтов фильтрация воды возможна лишь после того, как будет преодолено вязкое сопротивление сдвигу слоев связанной воды [1, 2], обуславливающее явление начального градиента напора.

Для оценки скорости уплотнения грунта во времени при нагрузке $\sigma=0,5$ МПа за счет выжимания воды из порового пространства, а также ползучести испытали полностью водонасыщенный глинистый грунт в компрессионном приборе [3, 4].

Консолидацию провели в одну ступень до полного завершения фильтрационной консолидации. В процессе консолидации фиксировали изменения относительной вертикальной деформации образца во времени.

Результаты испытания, обработанные методом квадратного корня из времени и логарифмическим методом, приведены в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 3

Обработка кривой консолидации методом квадратного корня из времени

Давление σ , МПа	Относит. деформация за ступень ε_i , д.е.	Корень квадратный из времени	Время 90 %-й фильтрационной консолидации t_{90} , мин	Время 100 %-й фильтрационной консолидации t_{100} , мин	Коэффициент фильтрационной консолидации
		$\sqrt{t_{90}}$, мин			c_v , см ² /мин
		$\sqrt{t_{100}}$, мин			c_v , см ² /год
0,5	19,9372	13,000	169,0	625,0	0,009016
		25,000			4739,0

Обработка кривой консолидации логарифмическим методом

Давление σ , МПа	Деформация 50 %-го уплотнения ε_{50} , д.е.	Время 50 %-го уплотнения t_{50} , мин	Коэффициент фильтрационной консолидации	Дефор- мация	Время	Коэффициент вторичной консолидации c_{α} , д.е.
			c_v , см ² /мин	$\varepsilon(t_1)$	$\lg(t_1)$	
			c_v , см ² /год	$\varepsilon(t_2)$	$\lg(t_2)$	
0,5	0,10015	27,5	0,012852	0,146	2,687	0,003717
			6755,2	0,147	2,956	

Обработка результатов методом квадратного корня из времени позволила вычислить числовое значение коэффициента фильтрационной консолидации, характеризующего скорость уплотнения грунта при заданной нагрузке за счет фильтрации воды (табл. 3), и время завершения 100 %-й фильтрационной консолидации ($t_{100} = 625$ мин). По завершению 100 %-й фильтрационной консолидации времени t_{100} вся свободно и рыхлосвязанная вода полностью отжалась из пор, процесс фильтрации воды в порах завершился, осадка грунта стабилизировалась.

Обработка результатов логарифмическим методом позволила вычислить числовое значение коэффициента фильтрационной консолидации ($c_v = 0,012852$ см²/мин) и коэффициента вторичной консолидации ($c_{\alpha} = 0,003717$). Числовое значение коэффициента вторичной консолидации показывает, с какой скоростью уплотняется грунт при заданной нагрузке за счет ползучести.

Авторами рассмотрены методы определения сжимаемости грунтов. Наиболее распространенным из-за простоты проведения испытания является метод определения сжимаемости грунта за счет приложения к нему равномерно распределенной нагрузки при невозможности боковых деформаций, с оттоком выдавливающейся из образца воды, что позволяет определить сжимаемость испытуемого образца в диапазонах напряжений 0-50 кПа, 50-100 кПа, 100-200 кПа, 200-400 кПа через коэффициент сжимаемости, секущий модуль деформации и касательный одометрический модуль деформации.

Данные, полученные в ходе проведенных исследований, необходимы при расчетах осадок и скорости их протекания во времени с применением теории фильтрационной консолидации.

Список литературы

1. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010 : монография / Г.Г. Болдырев. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва : ООО «Прондо», 2014. – 812 с.
2. Механика грунтов и основания зданий и сооружений : моногр. / В.Т. Ерофеев, А.Г. Булгаков, В.П. Дыба, Т.М. Скибин, Е.В. Завалишин, И.Т. Мирсаяпов, Д.В. Черкасов, А.И. Харченко. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2023. – 380 с.
3. Лабораторный практикум по грунтоведению : учеб. пособие / под ред. В.А. Королёва, В.Н. Широкова, В.В. Шаниной. – Москва : КДУ, Добросвет, 2019. – 240 с.
4. Грачева, Ю.В. Исследование механических свойств грунтов для строительства методами компрессионного сжатия и одноплоскостного среза в лабораторных условиях / Ю.В. Грачева, К.Н. Махамбетова, А.А. Хаванский // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2024. – №2(283). – С. 24–28.

References

1. Boldyrev, G.G. Methods for determining the mechanical properties of soils with comments to GOST 12248-2010 : monograph / G.G. Boldyrev. – 2nd ed., add. and ispr. – Moscow : LLC «Prondo», 2014. – 812 p.

-
2. Soil Mechanics and Foundations of Buildings and Structures : monograph / V.T. Erofeev, A.G. Bulgakov, V.P. Dyba, T. M. Skibin, E.V. Zavalishin, I.T. Mirsayapov, D.V. Cherkasov, A.I. Kharchenko. – Saransk : National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev, 2023. – 380 p.
 3. Laboratory Workshop on Soil Science : Textbook / Ed. by V.A. Korolev, V.N. Shirokov, V. V. Shanina. – Moscow : KDU, Dobrosvet, 2019. – 240 p.
 4. Gracheva, Yu.V. Investigation of mechanical properties of soils for construction by methods of compression compression and single-plane section in laboratory conditions / Yu.V. Gracheva, K.N. Makhambetova, A.A. Khavansky // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2024. – №2(283). – P. 24–28.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Ерошкина Надежда Александровна,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Харнаев Андрей Вячеславович,

аспирант
E-mail: spectr_321@mail.ru

Коровкин Марк Олимпиевич,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Шульте Ирина Сергеевна,

магистрант
E-mail: irina13122000@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Kharnaev Andrey Vyacheslavovich,

Postgraduate
E-mail: spectr_321@mail.ru

Korovkin Mark Olympievich,

Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Shulte Irina Sergeevna,

Master's degree student
E-mail: irina13122000@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ И ДОБАВКИ ШЛАКА НА ПРОЧНОСТЬ И ВОДОСТОЙКОСТЬ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО

Н.А. Ерошкина, А.В. Харнаев, М.О. Коровкин, И.С. Шульте

Исследовано влияние различных представителей магматических горных пород на прочность и водостойкость геополимерного вяжущего без добавки и с добавкой доменного гранулированного шлака. Установлено, что вяжущее без добавки этого материала не обладает водостойкостью и несмотря на достаточно высокую прочность (40-80 МПа) не может быть использовано для производства строительных материалов. Между соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в исследованных горных породах и прочностью вяжущего отмечается корреляционная зависимость, однако влияние этого фактора на прочность невелико.

Ключевые слова: магматическая горная порода, пылевидная фракция отсева дробления, доменный гранулированный шлак, геополимерное вяжущее, прочность, водостойкость

INFLUENCE OF ROCK AND SLAG ADDITIVES ON THE STRENGTH AND WATER RESISTANCE OF GEOPOLYMER BINDER

N.A. Eroshkina, A.V. Kharnaev, M.O. Korovkin, I.S. Shulte

The influence of various representatives of igneous rocks on the strength and water resistance of geopolymer binders without and with the addition of blast-furnace granulated slag has been studied. It has been established that binders without the addition of this material do not have water resistance and, despite their relatively high strength (40-80 MPa), cannot be used for the production of construction materials. There is a correlation between the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio in the studied rocks and the strength of the binder, but the influence of this factor on strength is not significant.

Keywords: igneous rock, dusty fraction of crushing rejects, blast-furnace granulated slag, geopolymer binder, strength, and water resistance

Цементная отрасль оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду. По данным [1] производство цемента является причиной 7-8 % всех промышленных выбросов углекислого газа в мире. В качестве более экологичной замены портландцемента предлагается использование геополимерных вяжущих [2]. Основным компонентом таких вяжущих является не природное сырье, а материалы техногенного происхождения (промышленные отходы) – шлаки и золы, а также некоторые природные материалы алюмосиликатного состава. Другим важным преимуществом геополимерных вяжущих является отсутствие в технологии большинства видов таких вяжущих операции обжига. В связи с этим производство требует значительно меньше энергии, чем портландцемент и сопровождается минимальными выбросами углекислого газа в атмосферу [3].

Процесс твердения геополимерных вяжущих, несмотря на довольно большое число исследований, изучен еще недостаточно. Это связано с рядом причин, к числу которых относится большое разнообразие состава и свойств сырьевых материалов. Отсутствие кристаллических фаз в продуктах, образующихся при твердении, не позволяет использовать один из наиболее информативных методов, традиционно применяемых в исследовании структурообразования вяжущих – рентгеноструктурный анализ.

Особую группу геополимеров составляют вяжущие на основе измельченных магматических горных пород с добавкой 15-40 % доменного гранулированного шлака [2, 3]. Основным сырьем для этого вида геополимерного бетона служат пылевидные фракции отходов камнеобработки или отсева дробления щебня из гранита, габбро, диабазы [4] и других магматических пород, таких как андезит [5], пегматит [6], базальт [7]. Содержание частиц менее 0,16 мм в отсевах дробления может колебаться по данным [8] от 7-10 до 25-30 %. Расчеты, произведенные по данным в статье [8], показывают, что ежегодные объемы образования этих фракций при дроблении щебня из изверженных пород составляют приблизительно 1 млн т.

Процесс твердения геополимерного вяжущего происходит за счет его щелочной активации гидроксидом и силикатом натрия, что приводит к формированию прочной трехмерной полимерной структуры [2]. Молярное отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в минеральном сырье оказывает значительное влияние на прочность геополимерного вяжущего и формирование трехмерной полимерной структуры, образующей жесткий каркас вяжущего [2]. При низком соотношении $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (менее 1,5) структура оказывается плотной и более связанной, что обеспечивает высокую прочность и низкое водопоглощение геополимерного вяжущего. Геополимеры с такой структурой имеют высокую термо- и химическую стойкость. При увеличении соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ выше 2 прочность материала снижается за счет увеличения количества силикатных цепей и меньшей связанности, что повышает пористость и водопоглощение вяжущего. Оптимальное соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, при котором достигается наибольшая прочность, долговечность и химическая стойкость, находится в интервале 1,5-2. Кроме того, указанное соотношение влияет на скорость и полноту полимеризации, способствует формированию более стабильных и прочных гидросиликатных и алюмосиликатных соединений. Результаты исследований показывают, что отклонения от оптимального соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ влияют на микроструктуру, термическую стойкость и прочность геополимерного вяжущего.

В качестве активаторов твердения геополимерных вяжущих используются щелочи – обычно NaOH или низкомодульное натриевое жидкое стекло [4]. Щелочные активаторы по-разному влияют на прочность и долговечность геополимеров. При повышении дозировки активатора ускоряется твердение вяжущего, но при высоких расходах щелочи на поверхности образуются высолы, а долговечность геополимера снижается [9]. Оптимальное содержание щелочных металлов в жидком стекле позволяет получить высокие прочностные показатели и обеспечивает формирование стабильной структуры геополимерного камня. При использовании только NaOH или высокомодульного жидкого стекла образуется по данным [2] более рыхлая структура, что сказывается на конечной прочности и стойкости геополимеров к агрессивным средам. Введение в состав геополимерного вяжущего гидроксида кальция позволяет значительно ускорить схватывание, но конечная прочность при этом снижается [10].

Несмотря на то что многие общие закономерности влияния состава геополимерных вяжущих на их свойства уже установлены, в ряде случаев отмечаются значительные отклонения от этих закономерностей. Это свидетельствует о недостаточной изученности геополимерных вяжущих, особенно геополимеров на основе дисперсных отходов переработки магматических горных пород.

Результаты исследований геополимерных вяжущих на основе этого сырья показывают [4], что добавка доменного гранулированного шлака позволяет получить гидравлические вяжущие с прочностью до 80 МПа. При этом вяжущие, не содержащие добавку шлака, несмотря на высокие прочностные характеристики, имеют очень низкую водостойкость, что ограничивает область их применения.

Для внедрения геополимерных вяжущих на основе магматических пород в практику производства строительных материалов необходимо накопление достаточного для теоретического обобщения количества экспериментальных данных о влиянии состава сырья и активатора твердения на основные свойства геополимера. Это позволит прогнозировать прочностные и эксплуатационные свойства материала.

Целью исследования является изучение влияния отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в минеральном сырье, состава активатора для получения геополимерного вяжущего повышенной прочности. В качестве основного компонента геополимерного вяжущего использовались шесть видов гранита, базальт и перидотит, а в качестве минеральной добавки – доменный гранулированный шлак в количестве 25 % от массы вяжущего.

Минеральные компоненты вяжущего и шлак отдельно измельчались в лабораторной шаровой мельнице до тонкости помола $350 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для активации процесса твердения вяжущих использовалось натриевое жидкое стекло с силикатным модулем (M) 2,5 и гидроксид натрия. Силикатный модуль активатора твердения варьировался за счет введения в жидкое стекло расчетного количества NaOH .

Вяжущее твердело по режиму: выдержка – 20 ч, подъем температуры до 80°C – 3 ч, изотермическая выдержка – 8 ч, остывание в камере тепловой обработки до температуры 30°C – 12 ч. Вяжущие без добавки шлака твердели в условиях сухого прогрева, а с добавкой шлака – во влажных условиях, исключающих высыхание образцов.

В связи с очень низкой водостойкостью геополимерных вяжущих без добавки шлака (табл. 1) применение таких вяжущих для производства строительных материалов нецелесообразно, несмотря на то что их прочность сопоставима с прочностью вяжущих с добавкой шлака.

Т а б л и ц а 1

Влияние вида горной породы, расхода активатора и его силикатного модуля на прочность вяжущего без добавки шлака

Горная порода	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Расход активатора, %	$\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$	M	$R_{\text{сжк}}$ МПа	K_p
Гранит Павловский	4,75	5	1:1,5	1,25	55,2	0,22
		7	1:2	1,43	65,1	0,3
Гранит Хребетский	4,8	5	1:1,5	1,25	51,5	0,19
		7	1:2	1,43	63,3	0,26
Перидотит	4	6	—*	—	38,5	0,09
		7	—*	—	51,2	0,16
Базальт	3,1	6	1:1,5	1,25	43,6	0,12
		9	1:2	1,43	55,4	0,24
Розовый гранит	5,2	5	1:1,5	1,25	55,1	0,15
		7	1:2	1,43	67,7	0,2
Гранит с роговой обманкой	4,55	5	1:1,5	1,25	48,2	0,12
		7	1:2	1,43	61,1	0,19
Гранит биотитовый	4,85	5	1:1,5	1,25	51,7	0,12
		7	1:2	1,43	63,4	0,23
Гранит плагиоклазовый	5	5	1:1,5	1,25	47,2	0,11
		7	1:2	1,43	60,9	0,19

* В качестве активатора использован NaOH .

Анализ графиков на рис. 1, построенных по данным табл. 2, показывает, что между соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и прочностью вяжущего наблюдается корреляционная зависимость. Это свидетельствует о том, что в исследованном вяжущем измельченная горная порода является активным компонентом, несмотря на установившееся мнение о значительной инертности магматических пород. В то же время влияние соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ на прочность вяжущего незначительно – оно не превышает 10 %.

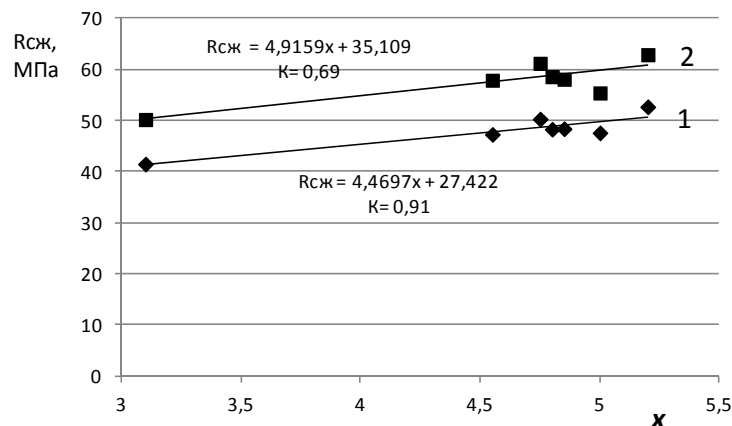


Рис. 1. Зависимость прочности $R_{сж}$ от соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (x) для составов с силикатным модулем активатора твердения 1,25 (1) и 1,43 (2)

Т а б л и ц а 2

Влияние вида горной породы, расхода активатора и его силикатного модуля на прочность вяжущего с добавкой шлака

Горная порода	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Расход активатора, %	$\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$	M	$R_{сж}$, МПа	K_p
Гранит Павловский	4,75	5	1:1,5	1,25	50,3	0,99
		7	1:2	1,43	61,2	1,0
Гранит Хребетский	4,8	5	1:1,5	1,25	48,3	0,99
		7	1:2	1,43	58,6	1,0
Перидотит	4	6	—*	—	35,4	0,89
		7	—*	—	45,3	0,96
Базальт	3,1	6	1:1,5	1,25	41,5	0,98
		9	1:2	1,43	50,2	1,0
Розовый гранит	5,2	5	1:1,5	1,25	52,7	0,96
		7	1:2	1,43	62,9	1,0
Гранит с роговой обманкой	4,55	5	1:1,5	1,25	47,3	0,95
		7	1:2	1,43	57,9	1,0
Гранит биотитовый	4,85	5	1:1,5	1,25	48,4	0,92
		7	1:2	1,43	58,1	0,98
Гранит плагиоклазовый	5	5	1:1,5	1,25	47,6	0,98
		7	1:2	1,43	55,4	1,0
Шлак	1,95	7	1:1,5	1,25	70,6	0,99
		10	1:2	1,43	81,9	1,0

* В качестве активатора использован NaOH.

Выводы

Исследования показали, что использование измельченных магматических пород с комплексным активатором твердения на основе гидроксида и силиката натрия позволяет получать геополимерные вяжущие с прочностью от 40 до 80 МПа. Геополимерное вяжущее без добавки шлака характеризуется низкой водостойкостью – его коэффициент находится в интервале 0,1-0,3. В связи с чем такое вяжущее, несмотря на достаточно высокую прочность, не может быть использовано в производстве строительных материалов.

Введение в состав вяжущего доменного гранулированного шлака позволяет получить водостойкое геополимерное вяжущее, сопоставимое по своим прочностным характеристикам с портландцементом. Между соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в исследованных горных породах и прочностью вяжущего отмечается корреляционная зависимость. Однако влияние этого фактора, также как и повышение силикатного модуля активатора в исследованном интервале на прочность невелико.

Список литературы

1. Хегде, С.Б. Цементная промышленность стремится к углеродной нейтральности / С.Б. Хегде // Цемент и его применение. – 2023. – № 1. – С. 66–69.
2. Davidovits, J. Geopolymer. Chemistry and applications / J. Davidovits. – Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2015. – 644 pp.
3. McLellan, B. C. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement / B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G.D. Corder // Journal of cleaner production. – 2011. – Vol. 19, №. 9–10. – P. 1080–1090.
4. Ерошкина, Н.А. Ресурсосберегающие технологии геополимерных вяжущих и бетонов на основе отходов добычи и переработки магматических горных пород : моногр. / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 152 с.
5. Çelikten, S. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymer mortars / S. Çelikten., M. Saridemir, M. Sologlu // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 422. – P. 135857.
6. Nana, A. Effect of milled pegmatite quarry wastes powders on structure, micro-structure and mechanical properties of pegmatite-based geopolymers / A. Nana, E.N. Sakue, P. Venyite, S.C.D. Anensong, N. Epey [et al.] //Materialia. – 2024. – Vol. 33. – P. 102022.
7. Rashad, A.M. Basalt powder as a promising candidate material for improving the properties of fly ash geopolymer cement / A.M. Rashad, R.A.E. Mohamed, S.R. Zeedan, A.A. El-Gamal // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 435. – P. 136805.
8. Повышение эффективности использования отсеков дробления скальных горных пород / Ф.Л. Капустин, В.А. Перепелицын, В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 103–107.
9. Mokhtari, P. Investigation of geopolymer efflorescence durability problems: Causes and possible solutions / P. Mokhtari, A. Ozer, R.A. de Sá Ribeiro, D. Samuel, W.M. Kriven // Journal of the American Ceramic Society. – 2024. – Vol. 107, №. 8. – P. 5364–5382.
10. Влияние состава геополимерного вяжущего на сроки схватывания, кинетику тепловыделения и вспучивание ячеистого бетона / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, С.М. Саденко, А.В. Харнаев // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2023. – № 2(17). – С. 31–37.

References

1. Hegde, S.B. Cement industry striving for carbon neutrality / S.B. Hegde // Cement and its Applications. – 2023. – № 1. – P. 66–69.
2. Davidovits, J. Geopolymer. Chemistry and applications / J. Davidovits. – Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2015. – 644 pp.

-
3. McLellan, B.C. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement / B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G.D. Corder // *Journal of cleaner production*. – 2011. – Vol. 19, №. 9–10. – P. 1080–1090.
 4. Eroshkina, N.A. Resource-saving technologies of geopolymer binders and concretes based on waste from the extraction and processing of igneous rocks: monograph / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin. – Penza : PGUAS, 2013. – 152 p.
 5. Çelikten, S. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymer mortars / S. Çelikten, M. Sarıdemir, M. Sologlu // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 422. – P. 135857.
 6. Nana, A. Effect of milled pegmatite quarry wastes powders on structure, microstructure and mechanical properties of pegmatite-based geopolymers / A. Nana, E.N. Sakue, P. Venyite, S.C.D. Anensong, N. Epey [et al.] // *Materialia*. – 2024. – Vol. 33. – P. 102022.
 7. Rashad, A.M. Basalt powder as a promising candidate material for improving the properties of fly ash geopolymer cement / A.M. Rashad, R.A.E. Mohamed, S.R. Zeedan, A.A. El-Gamal // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 435. – P. 136805.
 8. Increasing the efficiency of using rock crushing screenings / F.L. Kapustin, V.A. Perepelitsyn, V.B. Ponomarev, A.B. Loshkarev // *Physical and technical problems of mineral development*. – 2017. – No. 3. – P. 103–107.
 9. Mokhtari, P. Investigation of geopolymer efflorescence durability problems: Causes and possible solutions / P. Mokhtari, A. Ozer, R.A. de Sá Ribeiro, D. Samuel, W.M. Kriven // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2024. – Vol. 107, №. 8. – P. 5364–5382.
 10. Influence of geopolymer binder composition on the setting time, heat release kinetics, and expansion of cellular concrete / N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, S.M. Sadenko, A.V. Kharnaev // *Vestnik PGUAS: Construction, Science, and Education*. – 2023. – No. 2(17). – P. 31–37.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Колесников Никита Викторович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Строительные конструкции»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Мартышкин Даниил Олегович,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: historical95@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Kolesnikov Nikita Viktorovich,
Postgraduate of the Department «Building
Structures»

E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Ariskin Maxim Vasilevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the
Department «Building Structures»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Martyshkin Daniil Olegovich,
Assistant of the Department «Building Structures»

E-mail: historical95@mail.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЕЕННЫМИ КРЕСТОВЫМИ СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Н.В. Колесников, М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин

Рассматривается напряженно-деформированное состояние узловых соединений деревянных конструкций с клееными крестовыми стальными пластинами. Определена несущая способность ригеля на действие изгибающего момента. Выполнено моделирование и расчет узлового соединения в программном комплексе (ПК) ANSYS и ЛИРА-САПР с учетом ортотропных свойств древесины. Представлены результаты расчета.

Ключевые слова: деревянные конструкции, узловые соединения, клеенные крестовые стальные пластины, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, моделирование, ЛИРА-САПР, ANSYS

STRESS-STRAIN STATE OF NODAL JOINTS OF WOODEN STRUCTURES WITH GLUED STEEL CROSS PLATES

N.V. Kolesnikov, M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin

The stress-strain state of nodal joints of wooden structures with glued steel cross plates is considered. The load-bearing capacity of the cross-section bolt for the action of the bending moment is determined. The modeling and calculation of the nodal connection in the ANSYS and LIRA-CAD software package (PC) has been performed, taking into account the orthotropic properties of wood. The calculation results are presented.

Keywords: wooden structures, nodal joints, glued cross steel plates, stress-strain state, bearing capacity, modeling, LIRA-CAD, ANSYS

Соединения деревянных конструкций играют ключевую роль в обеспечении общей прочности и устойчивости сооружений. В настоящее время в строительстве широко применяются шиповые, шпоночные соединения, нагели, болты и металлические пластины. При этом для повышения надежности и снижения концентрации напряжений в узлах все чаще используются клеенные элементы, которые обеспечивают

равномерное распределение нагрузок и минимизируют ослабление сечения. Вклеенные стальные пластины позволяют комбинировать высокую прочность металла с экологичностью, легкостью, естественной красотой, химической и огнестойкостью древесины.

Рассмотрено напряжённо-деформированное состояние узловых соединений деревянных конструкций с вклеенными стальными пластинами (рис. 1а). Цель проведенного исследования – сравнительное моделирование соединения в программных комплексах (ПК) ANSYS и ЛИРА-САПР для определения несущей способности элементов, анализа распределения напряжений и деформаций для дальнейшего натурного испытания узлового соединения.

Расчетная схема узла представляет собой пересечение двух ригелей и стойки с квадратным сечением бруса 100×100 мм. В торцы бруса вклеена стальная вертикальная пластина толщиной 6 мм с двумя поперечным рёбрами для увеличения площади склеивания (рис. 1а).

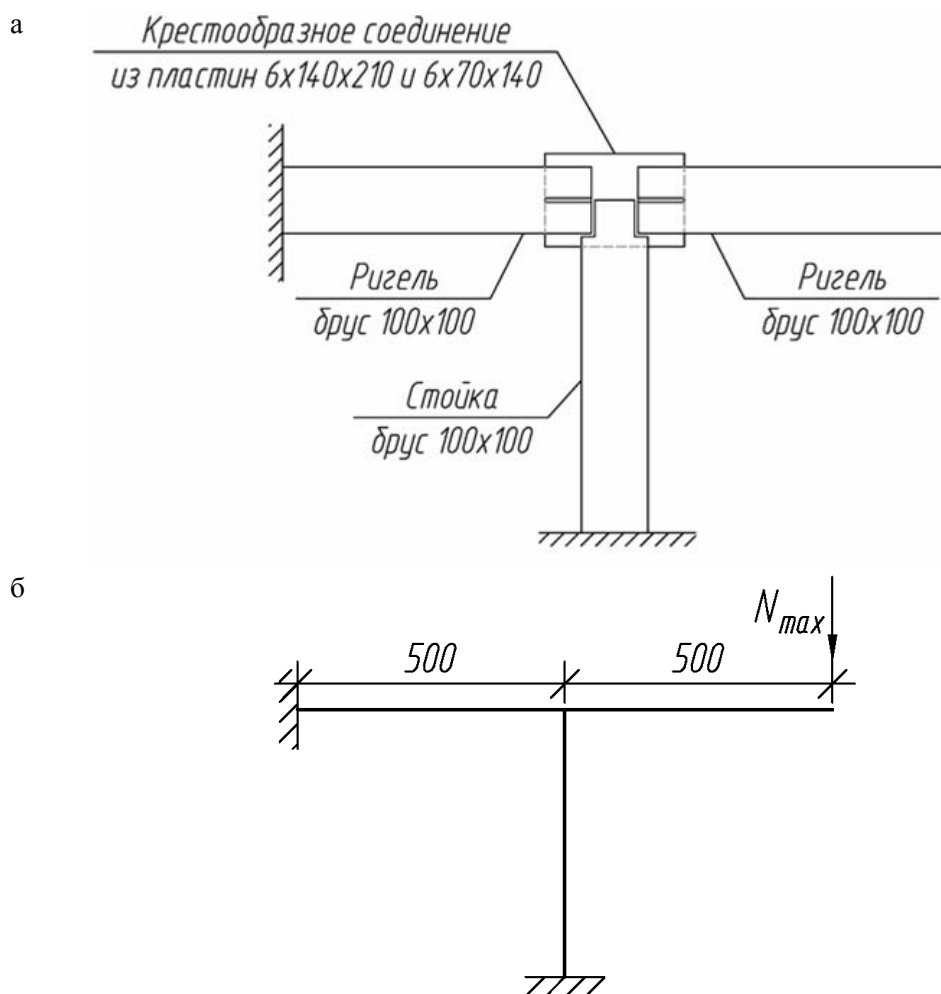


Рис. 1. Общий вид узлового соединения (а); расчетная схема (б)

Согласно СП 64.13330.2017 (п. 6.1), определим несущую способность деревянного бруса. Расчетное сопротивление древесины на изгиб рассчитывается по формуле

$$R_u^p = R_u^A m_{дл} \prod m_i, \quad (1)$$

где $R_u^A = 19,5$ МПа – расчетное сопротивление древесины 2-го сорта на изгиб (табл. 3 СП 64.13330.2017); $m_{дл} = 1$ – коэффициент длительной прочности (табл. 4 СП 64.13330.2017);

$\prod m_i$ – произведение коэффициентов условий работы, равное:

$$\prod m_i = m_b m_t m_o m_a m_{cl} m_{гн} m_{с.с} m_{см} = 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,72,$$

где $m_b = 0,9$ – коэффициент различных условий эксплуатации (табл. 9 СП 64.13330.2017); $m_t = 1$ – коэффициент конструкций, эксплуатируемых при установившейся температуре воздуха ниже $+35$ °С; $m_o = 1$ – коэффициент для изгибаемых, внецентренно сжатых, сжато-изгибаемых и сжатых клееных элементов прямоугольного сечения высотой менее 50 см (табл. 10 СП 64.13330.2017); $m_a = 0,8$ – коэффициент растянутых элементов с ослаблением в расчетном сечении; $m_{cl} = 1$ – коэффициент для элементов, подвергнутых глубокой пропитке антипиренами под давлением; $m_{гн} = 1$ – коэффициент для изгибаемых, внецентренно сжатых, сжато-изгибаемых и сжатых клееных деревянных элементов (табл. 11 СП 64.13330.2017); $m_{с.с} = 1$ – коэффициент для гнутых элементов конструкций (табл. 12 СП 64.13330.2017); $m_{см} = 1$ – коэффициент в зависимости от срока службы деревянных конструкций (табл. 13 СП 64.13330.2017); $m_{см} = 1$ – коэффициент смятия поперек волокон при режимах нагружения А (табл. 4 СП 64.13330.2017).

Принимая стандартные значения коэффициентов условий работы для сосны 2-го сорта при температуре ниже $+35$ °С, без глубокой пропитки антипиренами с ослабленным сечением, получаем:

$$R_n^p = 19,5 \cdot 1 \cdot 0,72 = 14,04 \text{ МПа.}$$

Момент сопротивления квадратного сечения:

$$W_{расч}^{100} = \frac{a^3}{6} = \frac{100^3}{6} = 166667 \text{ мм}^3 = 16,67 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Максимальный изгибающий момент для бруса из сосны 2-го сорта сечением 100×100 мм определяем по формуле (п. 7.9 СП 64.13330.2017)

$$\frac{M_{max}^{100}}{W_{расч}^{100}} \leq R_n^p. \quad (2)$$

Из формулы (2) находим:

$$M_{max}^{100} = W_{расч}^{100} R_n^p = 16,67 \cdot 10^{-5} \cdot 14,04 = 0,0023405 \text{ МН} \cdot \text{м} = 2,3405 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для определения мозаики напряжений сжатия и растяжения в деревянном бруске и вертикальных перемещений выполнено моделирование узлового соединения в ПК ЛИРА-САПР и ANSYS

В ПК ЛИРА-САПР узловые элементы замоделированы объемными конечными элементами КЭ типа 36, которым были присвоены характеристики древесины сосны 2-го сорта, учитывающие ортотропию материала в местной системе координат. В качестве опоры стойки и ригеля заданы связи, ограничивающие перемещения и вращения по осям x , y и z (рис. 2б) [1]. Сетка конечно-элементной (КЭ) модели – 10 мм. Для достижения момента эквивалентного максимально-допустимого для данного элемента в торец свободного ригеля приложена сосредоточенная вертикальная сила, равная:

$$N_{max}^{100} = \frac{M_{max}^{100}}{h} = \frac{2,3405}{0,5} = 4,681 \text{ кН}, \quad (3)$$

где h – плечо приложения силы, равное 0,5 м.

Всего узлов 121, следовательно, нагрузка на каждый узел торца ригеля составит:

$$\frac{N_{\max}^{100}}{121} = 0,0387 \text{ кН.} \quad (4)$$

В ПК ANSYS стальные пластины и деревянные элементы замоделированы через объемные тела (solid) с помощью интерактивной среды для 3D-моделирования ANSYS Discovery, которым были заданы свойства древесины, учитывающие ортотропию материала, и свойства стали. Нижняя грань стойки, а также торец одного ригеля зафиксированы через граничные условия опоры типа fixed support (жесткое защемление) (рис. 2а). Контакт между поверхностями древесины и стальными пластинами определен как bonded (моделирование жесткого клеевого соединения) [1]. Сетка КЭ аналогично моделированию в ПК ЛИРА-САПР – 10 мм. Нагрузка на соединение задана в виде вертикальной сосредоточенной силы, приложенной в торец свободного ригеля, равная $N_{\max}^{100} = 4,681 \text{ кН}$.

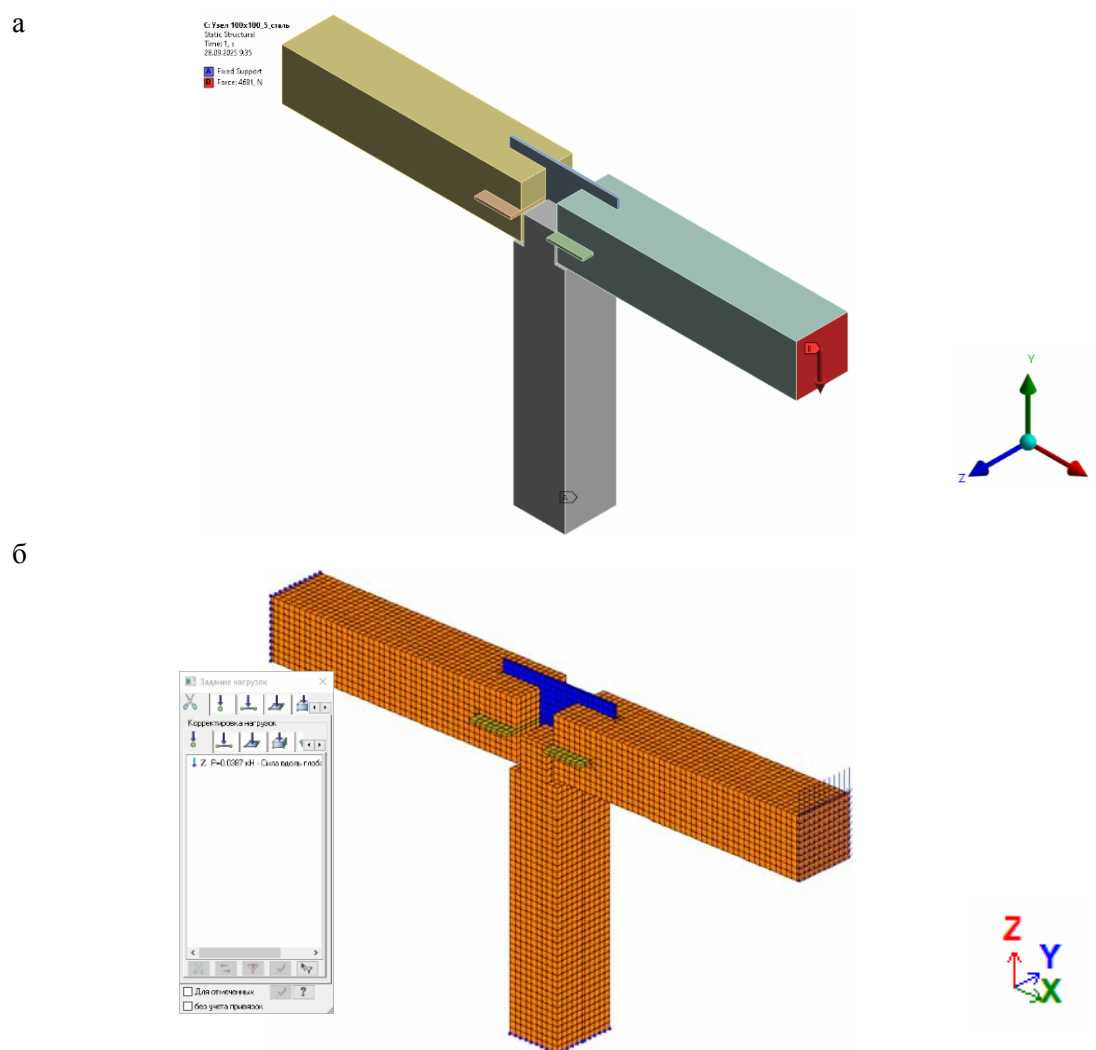
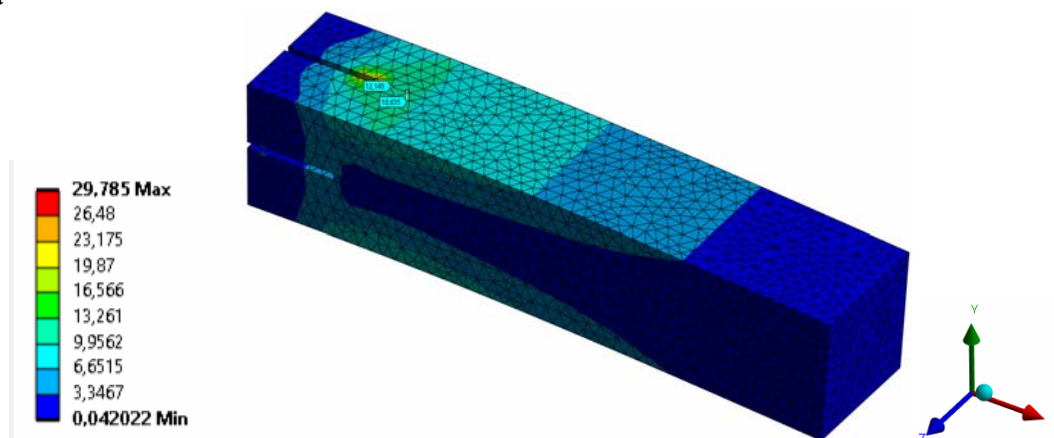


Рис. 2. Объемная конечно-элементная модель узлового соединения:
а – в ПК ANSYS; б – в ПК ЛИРА-САПР

Результаты расчета

Результаты расчета КЭ моделей представлены в виде изополей нормальных напряжений в свободном от защемления деревянном ригеле: на рис. 3а – изополя напряжений для ПК ANSYS, на рис. 3б – мозаика напряжений для ПК ЛИРА-САПР. Изополя вертикальных перемещений узлового соединения представлены на рис. 4.

а



б

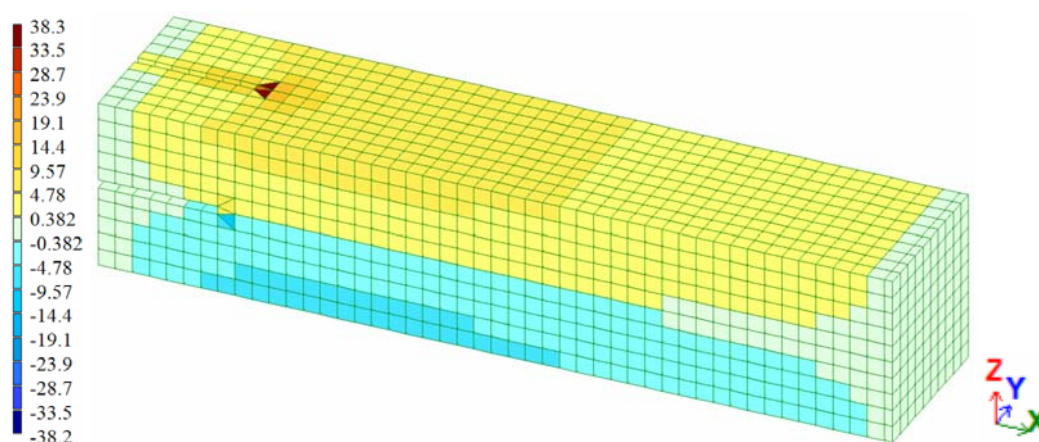


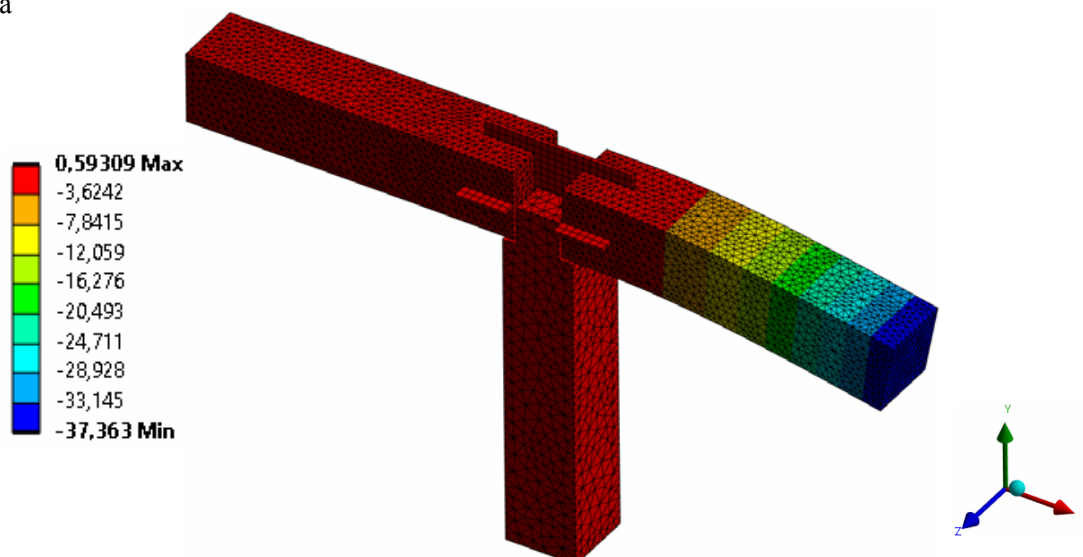
Рис. 3. Изополя нормальных напряжений в деревянном ригеле:
а – в ПК ANSYS; б – в ПК ЛИРА-САПР

Согласно рис. 3, имеется сходимость результатов численного моделирования узлового соединения, разница полученных напряжений составляет не более 5 %. Исключая точки концентрации напряжений в местах врезки пластин из-за неточности в построении сетки конечно-элементной модели, можно сделать вывод, что нормальные напряжения, возникающие в деревянном элементе ($\sim 12,1$ МПа для модели ANSYS и $\sim 11,5$ МПа для модели ЛИРА-САПР), не превышают предел прочности древесины.

Кроме этого, проведено сравнительное моделирование узлового соединения деревянных конструкций с вклеенными стальными пластинами толщиной 6 мм в программных комплексах ЛИРА-САПР и ANSYS с учетом анизотропных свойств материалов и жесткого клеевого контакта. Полученные изополя нормальных напряжений ($\sim 11,5$ – $12,1$ МПа в деревянном элементе) и вертикальных перемещений демонстрируют сходимость результатов (расхождение менее 5 %), подтверждающую надежность выбранных подходов к моделированию.

Таким образом, полученные данные подтверждают эффективность предложенного соединения для повышения надежности узлов деревянных конструкций под действием изгибающих нагрузок. Однако для полной верификации и учета нелинейных эффектов, пластичности или разрушения клея, необходимо проведение натурных испытаний узла на специализированном оборудовании с последующим сравнением экспериментальных и численных результатов.

а



б

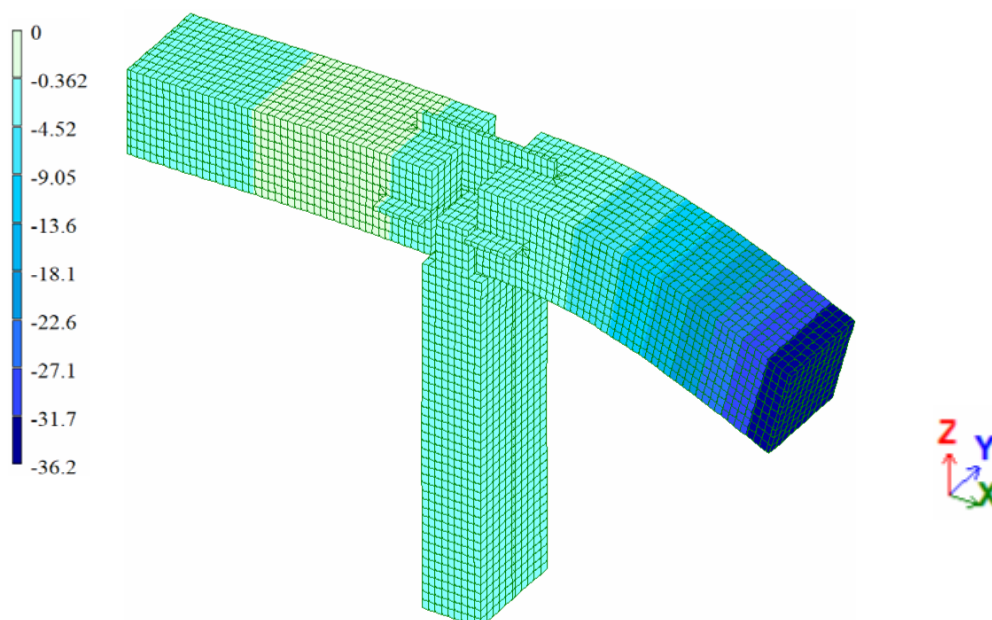


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений узлового соединения:
а – в ПК ANSYS; б – в ПК ЛИРА-САПР

Список литературы

1. Колесников, Н.В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов / Н.В. Колесников, М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, А.В. Меркушов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – № 41(2). – С. 69–78.
2. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Б. Муйземнек, А.С. Шадский. – 2-е изд., испр. – Москва : ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
3. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением вклеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.
4. Данилов, В.М. Возможности программного комплекса ANSYS для решения научно-практических задач в строительстве / В.М. Данилов, А.В. Ерофеев, Т.И. Горохов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (поиск). – Иваново : ИВГПУ, 2021. – № 1. – С. 182–185.

5. Арискин, М.В. Узловые соединения элементов стоечно-балочных систем на стальных пластинах / М.В. Арискин, Н.В. Колесников, Р.Т. Иксанов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сб. ст. 81-й Всероссийской научно-технической конференции. – Самара : СамГТУ, 2024. – С. 134–144.

References

1. Kolesnikov, N.V. Improvement of Calculations for Connections of Anisotropic Structural Materials / N.V. Kolesnikov, M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, A.V. Merkushov // Bulletin of the Research Center «Construction». – 2024. – №41(2). – P. 69–78.
2. Morozov, E.M. ANSYS in the Hands of an Engineer: Fracture Mechanics / E.M. Morozov, A.B. Muizemnek, A.S. Shadsky. – 2nd ed., rev. – Moscow : LENAND, 2010. – 456 p.
3. Rudnev, I.V. Connections of Elements of Wooden Structures Using Glued Steel Plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction. – Novosibirsk, 2014. – No. 4. – P. 5–12.
4. Danilov, V.M. Capabilities of the ANSYS Software Package for Solving Scientific and Practical Problems in Construction / V.M. Danilov, A.V. Erofeev, T.I. Gorokhov // Young Scientists – for the Development of the National Technological Initiative (Search). – Ivanovo : IVGPU, 2021. – No. 1. – P. 182–185.
5. Ariskin, M.V. Nodal Connections of Elements of Post-and-Beam Systems on Steel Plates / M.V. Ariskin, N.V. Kolesnikov, R.T. Iksanov // Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction and Construction Technologies : Collection of Articles from the 81st All-Russian Scientific and Technical Conference. – Samara : SamSTU, 2024. – P. 134–144.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mai.ru

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Журавлев Сергей Игоревич,
студент
E-mail: sergey.zhuravl228@gmail.com

Довгуль Елена Юрьевна,
студент
E-mail: lkassiopeya@mail.ru

Михайлова Елизавета Дмитриевна,
студент
E-mail: em0164782@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Korovkin Mark Olympevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»
E-mail: m_korovkin@mai.ru

Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Materials and
Woodworking Technology»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Zhuravlev Sergey Igorevich,
Student
E-mail: sergey.zhuravl228@gmail.com

Dovgul Elena Yurievna,
Student
E-mail: lkassiopeya@mail.ru

Mikhailova Elizaveta Dmitrievna,
Student
E-mail: em0164782@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И МЕТАКАОЛИНА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫСОЛООБРАЗОВАНИЯ

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, С.И. Журавлев, Е.Ю. Довгуль, Е.Д. Михайлова

Исследовано влияние микрокремнезема и метаксаолина на высолообразование на поверхности объемно-окрашенного бетона. Образование высолов при циклическом насыщении водой и высушивании оценивалось визуально и по изменению цветовых координат в цветовой модели HSB. Установлено, что в качестве критерия количественной оценки высолообразования может быть использовано среднее квадратическое отклонение оттенка. Показано, что высолообразование наиболее эффективно снижает микрокремнезем при дозировке 4,5 %.

Ключевые слова: цветной декоративный бетон, снижение высолообразования, микрокремнезем, метаксаолин, эффективность

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF MICROSILICA AND METAKAOLIN FOR REDUCING THE EFFLORESCENCE

M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, S.I. Zhuravlev, E.Yu. Dovgul, E.D. Mikhailova

The effect of microsilica and metakaolin on the formation of efflorescence on the surface of a volume-colored product was studied. The formation of efflorescence during cyclic saturation with water and drying was evaluated visually and by changes in color coordinates in the HSB color model. It has been established that the standard deviation of the hue can be used as a quantitative measure of efflorescence. It was shown that microsilica is the most effective in reducing efflorescence at a dosage of 4.5 %.

Keywords: colored decorative concrete, reduction of efflorescence, microsilica, metakaolin, effectiveness

Введение

Востребованность архитектурно-декоративных бетонов постоянно растет. Это связано с повышением требований к внешнему виду зданий и элементов благоустройства. Декоративные бетоны играют важную роль в современных строительных технологиях, реализации различных федеральных и региональных программ строительства жилья и благоустройства городских территорий.

Одной из основных причин, сдерживающих применение объемно-окрашенных архитектурно-декоративных бетонов, является снижение в процессе эксплуатации интенсивности цвета бетонной поверхности. Это, как отмечается в работе [1], в большинстве случаев не связано с воздействиями атмосферных факторов на окрашивающие пигменты или химическими изменениями в них в результате взаимодействия с продуктами гидратации цемента. Многими исследователями установлено, что изменение цвета обусловлено образованием на поверхности бетона высолов, которые ухудшают внешний вид бетонных изделий [2, 3].

Причинами высолообразования являются физико-механические процессы, в результате которых происходит вынос и кристаллизация на поверхности бетона водорастворимых компонентов цементного камня – прежде всего гидролизной извести [3], а также Na_2SO_4 и K_2SO_4 [4]. Эти вещества мигрируют по системе пор цементного камня на поверхность бетона под влиянием градиента влажности [5]. При этом считается [2], что при воздействии атмосферных осадков высолы могут смываться, а первоначальный цвет бетона восстанавливаться. Однако постепенно на поверхности бетона происходит карбонизация гидролизной извести и накапливается практически нерастворимый карбонат кальция, который является причиной стойкого снижения интенсивности цвета декоративного бетона в процессе его эксплуатации. В то же время карбонизация вызывает, как указывается в работе [3], «самоторможение» высолообразования в результате закупорки устьев пор и процесс высолообразования постепенно затухает.

Различают первичные и вторичные высолы [3, 4]. Первичные высолы образуются на этапе производства вследствие неконтролируемых колебаний температуры и влажности среды, окружающей твердеющий бетон. Понижение влагосодержания поверхностного слоя приводит к миграции в него растворенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [4]. Из-за высокой пористости цементного камня на начальных этапах его структурообразования риск появления первичных высолов очень высок. Вторичные высолы образуются в результате попеременного насыщения и высушивания, вызванного изменениями погодных условий или инфильтрации через бетон поверхностных и грунтовых вод.

По данным [3], в цементном камне образуется около 15 % гидроксида кальция. Для предотвращения миграции этого вещества на поверхность бетона необходимо связать его в водонерастворимые соединения. Исходя из уравнения реакции, приведенного в указанной статье, для связывания такого количества гидролизной извести необходимо ввести активную минеральную добавку в количестве 8-15 % от массы цемента (в зависимости от основности образующихся гидросиликатов кальция). В качестве таких минеральных добавок предлагается использовать золу-унос, доменный гранулированный шлак, микрокремнезем, метакраин и др.

Мнения об эффективности этих добавок расходятся. Так, авторы статьи [3] отдают предпочтение микрокремнезему, а в работе [4] экспериментально показана высокая эффективность метакраина.

Целью исследования является анализ эффективности использования добавок микрокремнезема и метакраина для снижения высолообразования на поверхности цветного объемно-окрашенного бетона.

Методы и материалы для исследования

Исследования проводились на цементном растворе, состоящем из белого цемента и кварцевой муки, в соотношении 0,7:0,3 при водоцементном отношении 0,3 и отношении песка к смешанному вяжущему 1,5. В смесь вводился 1,1 % суперпластификатора и 3 % красного железистого пигмента (от массы смешанного вяжущего).

В эксперименте было заформовано 5 составов: контрольный бездобавочной – состав № 1; 2 состава с добавкой микрокремнезема (4,5 и 9 %) – составы № 2 и 3; и 2 состава с добавкой метакеолина (3 и 6 %) – составы № 4 и 5.

Для приготовления смесей использовались следующие материалы:

– портландцемент белый без добавок 1-го сорта ПЦБ 1-500-Д0 производства Cemix Rus;

- молотый пылевидный кварц (кварцевая мука) марки Б;
- метакеолин марки ВМК-45 производства ООО «Синерго»;
- микрокремнезем МК-85 производства ПАО «НЛМК»
- суперпластификатор «Гиппласт термо Тип 1»;
- песок с модулем крупности 2,2.

Из смесей, имевших высокопластичную консистенцию, в пластиковых контейнерах были заформованы образцы с рифленой и гладкой поверхностью, которые после 28 суток твердения в нормальных условиях извлекались из контейнеров и подвергались циклическому насыщению-высушиванию в условиях лаборатории (рис. 1).

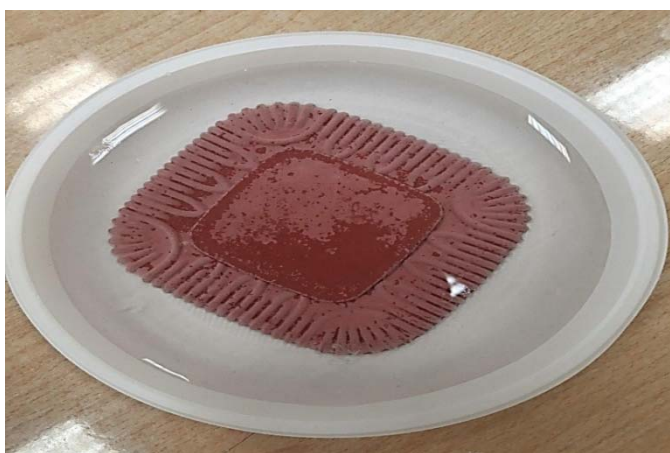


Рис. 1. Насыщение водой образца из цветного мелкозернистого бетона

Для испытания образцы заливались 180 мл воды, которая насыщала испытываемые образцы. Каждый цикл высушивания продолжался 2 недели. На последней стадии высушивания происходила инфильтрация жидкости из-под образца, что способствовало образованию на его поверхности высолов.

После высыхания образцов их поверхность сканировалась с помощью планшетного сканера с разрешением 600 dpi. Полученные изображения гладкой (центральной) части образцов (рис. 2) подвергались анализу с помощью компьютерной программы, которая разбивала цветовые координаты на 30 интервалов и подсчитывала количество точек изображения, входящих в каждый интервал. Для анализа цвета использовалась цветовая модель HSB (англ. Hue, Saturation, Brightness – оттенок (*H*), насыщенность (*S*), яркость (*B*)).

Затем высолы смывались струей воды и снова помещались в воду для проведения следующего цикла насыщения и высушивания.

Результаты и их обсуждение

Анализ поверхности образцов без добавок и с различным количеством микрокремнезема и метакеолина после различного числа циклов (рис. 2) показал, что на их поверхности происходит высолообразование, интенсивность которого мало зависит от состава бетона.

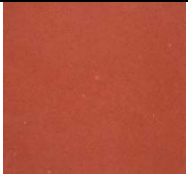




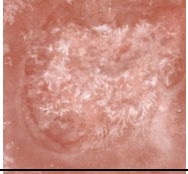

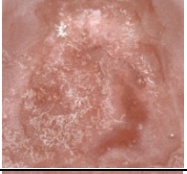
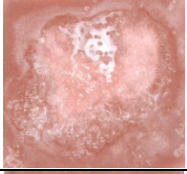
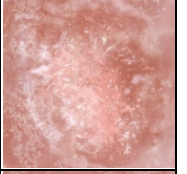




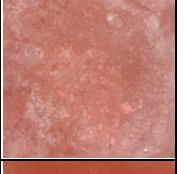
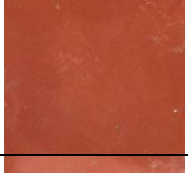
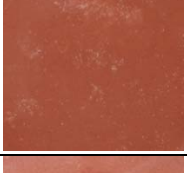
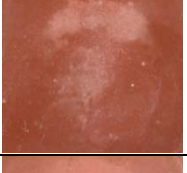

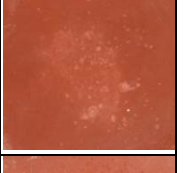




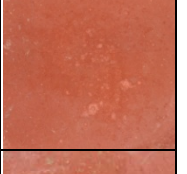


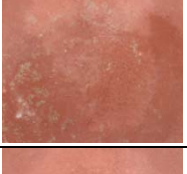
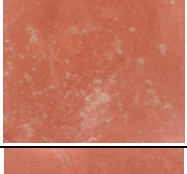
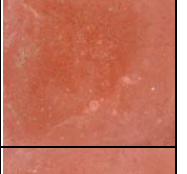


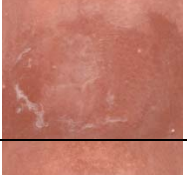

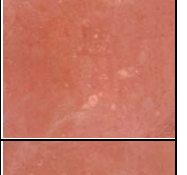




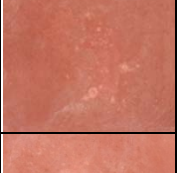




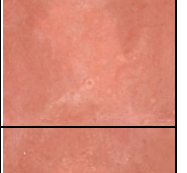
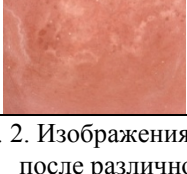


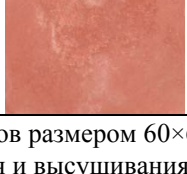

Количество циклов	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3	Состав № 4	Состав № 5
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Рис. 2. Изображения поверхности фрагментов образцов размером 60×60 мм после различного количества циклов насыщения и высушивания

Наиболее интенсивно высолы образуются после первых двух циклов, особенно – после первого цикла (см. рис. 2). Эти высолы можно отнести к первичным. Высокая интенсивность процесса объясняется тем, что за 28 суток в цементном камне накопилось значительное количество гидролизной извести, которая при насыщении и высушивании мигрировала на поверхность. Обращает на себя внимание тот факт, что после третьего цикла цвет контрольного образца восстановился до первоначального, однако в составах с минеральными добавками восстановление цвета произошло не полностью.

Визуально оценивая образцы из составов № 1 и № 2, можно отметить, что высолообразование после 6-9 циклов в составе с 4,5 % микрокремнезема несколько ниже, чем в контрольном составе и составах с более высокой дозировкой этой добавки, а также в составах с метакатионом. В связи с этим в дальнейшем изучались цветовые характеристики только этих двух составов.

Анализ графиков на рис. 3 и данных в табл. 1, которые характеризуют изменение цветовых координат поверхности образцов составов №1 и №2, показывает, что после первых двух циклов, для которых характерно интенсивное высолообразование, расширяется их цветовой диапазон. При этом наблюдается небольшое смещение максимума в сторону больших значений H , характеризующих оттенки.

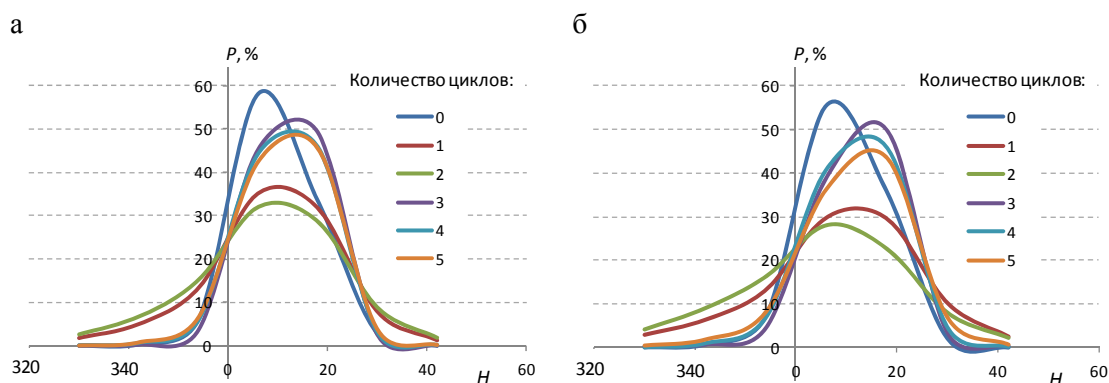


Рис. 3. Вероятность попадания в интервалы оттенков (H) для образцов без минеральной добавки (а) и с добавкой 4,5 % микрокремнезема (б) после различного количества циклов насыщения – высушивания

Т а б л и ц а 1

Цветовые координаты и их доверительные интервалы при различном количестве циклов насыщения – высушивания

Количество циклов	Состав №1						Состав №2					
	Оттенок		Насыщенность		Яркость		Оттенок		Насыщенность		Яркость	
	H_{cp}	δ_H	S_{cp}	δ_S	B_{cp}	δ_B	H_{cp}	δ_H	S_{cp}	δ_S	B_{cp}	δ_B
0	9,8	10,4	6,0	2,1	8,1	2,9	9,3	16,4	5,3	1,9	8,3	3,0
1	8,8	16,8	4,5	1,6	4,3	1,5	9,4	8,7	4,9	1,7	4,4	1,6
2	7,9	16,6	5,0	1,8	5,1	1,8	7,0	7,3	5,5	2,0	5,2	1,9
3	12,0	16,6	6,0	2,1	9,7	3,5	12,2	15,6	6,1	2,2	9,7	3,5
4	11,4	15,7	6,5	2,3	7,6	2,7	11,5	14,9	6,8	2,4	7,6	2,7
5	11,4	15,2	6,4	2,3	7,2	2,6	12,1	13,4	6,3	2,2	7,3	2,6
6	9,7	15,9	5,4	1,9	6,6	2,4	9,5	15,1	7,1	2,5	8,1	2,9
7	10,6	15,6	6,4	2,3	7,2	2,6	10,6	15,0	7,3	2,6	8,3	3,0
8	10,7	15,2	5,2	1,9	7,1	2,5	10,7	14,9	6,1	2,2	8,2	2,9
9	10,7	15,1	4,9	1,8	7,0	2,5	10,8	14,9	5,9	2,1	8,1	2,9

Сопоставление данных в табл. 1 и вид образцов на рис. 2 позволяет сделать вывод о том, что в качестве критерия количественной оценки высолообразования может быть использовано среднеквадратическое отклонение оттенка δ_H (рис. 4). Этот критерий рекомендуется для лабораторной оценки эффективности методов снижения образования высолов.

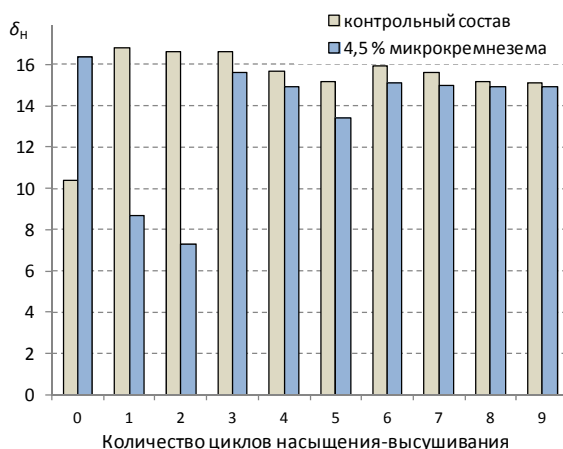


Рис. 4. Влияние насыщения – высушивания на среднеквадратическое отклонение оттенка δ_H

Выводы

Исследования показали, что добавки микрокремнезема и метакеолина, несмотря на сложившееся мнение о возможности использования этих добавок для снижения высолообразования не проявили в цветном бетоне достаточной эффективности. В то же время нужно отметить, что введение в состав бетона 4,5 % микрокремнезема позволило снизить образование вторичных высолов.

Список литературы

1. Херинг, К. Выцветание бетона / К. Херинг // CPI – Международное бетонное производство. – 2010. – № 6. – С. 58–66.
2. Сулейманова, Л.А. Высолы (выцветы) на поверхности бетонных изделий / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 3. – С. 28–31.
3. Михайловский, В.П. Высолообразование в конструкциях строительных объектов / В.П. Михайловский, В.С. Прокопец // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2011. – № 4(22). – С. 30–35.
4. Luo, Y. Study on the efflorescence behavior of concrete by adding metakaolin / Y. Luo, X Gao, D Wang [et al.] / Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 83. – P. 108396.
5. Bolte, G. Efflorescence on concrete products-causes and strategies for avoidance / G. Bolte, W. Dienemann // ZKG INTERNATIONAL. – 2004. – Vol. 57, No. 9. – P. 78–86.

References

1. Hering, K. Concrete Fading / K. Hering // CPI – Concrete Plant International. – 2010. – No. 6. – P. 58–66.
2. Suleymanova, L.A. Efflorescences on the surface of concrete products / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2012. – No. 3. – P. 28–31.
3. Mikhailovsky, V.P. High-temperature formation in construction objects / V.P. Mikhailovsky, V.S. Prokopets // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. – 2011. – No. 4(22). – P. 30–35.
4. Luo, Y. Study on the efflorescence behavior of concrete by adding metakaolin / Y. Luo, X Gao, D Wang [et al.] / Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 83. – P. 108396.
5. Bolte, G. Efflorescence on concrete products-causes and strategies for avoidance / G. Bolte, W. Dienemann // ZKG INTERNATIONAL. – 2004. – Vol. 57, No. 9. – P. 78–86.

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Лавров Иван Юрьевич,
ассистент кафедры «Технологии
строительных материалов и
деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Семилетков Александр Викторович,
аспирант кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Бортунова Валерия Игоревна,
студентка
E-mail: techbeton@pguas.ru

Чекранова Анастасия Вадимовна,
студентка
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Lavrov Ivan Yurievich,
Assistant of the Department «Building Materials
and Woodworking Technology»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Semiletkov Aleksander Viktorovich,
Postgraduate of the Department «Building
Materials and Woodworking Technology»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Bortunova Valeria Igorevna,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

Chekranova Anastasia Vadimovna,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕТОНА

И.Ю. Лавров, А.В. Семилетков, В.И. Бортунова, А.В. Чекранова

Представлены результаты сравнительной оценки эффективности применения пластифицирующих добавок российского и китайского производства в сочетании с активными минеральными добавками и местным вяжущим для формирования реологически активной цементно-водно-дисперсной матрицы высокофункциональных бетонов. Проведена оценка влияния типа и дозировки гиперпластификаторов на реологические и прочностные свойства цементных систем. Установлены оптимальные параметры применения микрокремнезема МК-85 в количестве 8-10 % от массы цемента. Показана эффективность использования пеногасителя ПГ-5 для снижения открытой пористости на 80-90 %. Доказана экономическая целесообразность разработанных составов, обеспечивающих снижение себестоимости на 79 %, по сравнению с импортными аналогами, при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик, что несет практическую значимость для производства бетонов специального назначения в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: пластификатор, пуццолановая добавка, цементный камень, высокопрочный бетон, цементный композит, растекаемость, импортозамещение

THE INFLUENCE OF MODIFYING ADDITIVES ON THE RHEOLOGICAL AND STRENGTH PROPERTIES OF THE CEMENT MATRIX OF HIGH-FUNCTIONAL CONCRETE

I.Yu. Lavrov, A.V. Semiletkov, V.I. Bortunova, A.V. Chekranova

The article presents the results of a comparative assessment of the effectiveness of the use of plasticizing additives of Russian and Chinese production in combination with active mineral additives and local binders for the formation of a rheologically active cement-water-dispersed matrix of highly functional concretes. The influence of the type and dosage of hyperplasticizers on the rheological and strength properties of cement systems has been evaluated. Optimal parameters for the use of

microsilicon MK-85 in an amount of 8-10 % by weight of cement have been established. The effectiveness of using the PG-5 defoamer to reduce open porosity by 80-90 % is shown. The economic feasibility of the developed compositions has been proven, providing a 79 % reduction in cost compared to imported analogues while maintaining the required performance characteristics, which is of practical importance for the production of specialized concretes under import substitution conditions.

Keywords: plasticizer, pozzolanic additive, hardened cement paste, high-strength concrete, cement composite, flowability, import substitution

Введение

Как известно, решающее значение при формировании прочностных свойств цементных композитов имеет качество их дисперсной матрицы [1], которая, как показывают расчёты оптимальных составов, занимает повышенный объем в структуре современных высокофункциональных бетонов [2]. Кроме того, матрица высокофункциональных бетонов должна быть реологически активной. Проявление высоких реологических характеристик, выражающихся в способности смеси к самопроизвольному растеканию и гравитационному уплотнению, наблюдается в тонкодисперсных (порошковых) пластифицированных системах на основе цемента и минеральных добавок различной гранулометрии [3]. Наилучшие результаты достигаются при использовании пластификаторов последнего поколения – гиперпластификаторов поликарбоксилатного типа [1, 4]. До недавнего времени на российском рынке преобладали продукты западного производства, в частности таких производителей, как BASF Construction Additives. В настоящее время растёт доля китайских и отечественных гиперпластификаторов, однако их введение в качестве прямой замены в рецептуре зачастую малоэффективно. Это связано с различиями в совместимости добавки с другими компонентами, что требует дополнительных исследований и корректировки всего состава бетонной смеси.

Для изготовления ответственных бетонных конструкций, в том числе в области станкостроения, традиционно применялись специализированные композиционные вяжущие зарубежного производства [5, 6]. Их использование было обусловлено гарантированно высокими и стабильными показателями прочности, долговечности и жесткости готовых изделий [7]. Однако зависимость от европейских импортных материалов, их высокая стоимость и логистические риски обуславливают необходимость поиска отечественных аналогов. В связи с этим в ПГУАС проводятся исследования, целью которых является оценка перспектив полной или частичной замены дорогостоящих и импортных компонентов высокофункциональных бетонов на более доступные [7–9].

В данной статье приведены результаты исследования эффективности пластификаторов российского и китайского производства в сочетании с активными минеральными добавками и вяжущим отечественного производства для формирования реологически активной цементно-водно-дисперсной матрицы высокофункциональных бетонов.

Материалы и методы

При выполнении экспериментов использовались следующие основные сырьевые материалы: портландцемент ЦЕМ0 52,5Н следующего фазового состава, масс. %: C_3S – 67,2; C_2S – 12,0; C_3A – 6,7; C_4AF – 11,9 (ООО «Азия Цемент», Пензенская обл.); композиционное вяжущее Nanodur 5941Compound (Dyckerhoff GmbH, Германия) микрокремнезём конденсированный неуплотнённый МК-85 ($S_{уд}$ = 24000 м²/кг), масс. %: SiO_2 – 92; Al_2O_3 – 0,9; C – 1,6; CaO – 0,85; MgO – 0,4; (ООО «YDD Corporation», Казахстан); высокоактивный метакаолин ВМК-45 ($S_{уд}$ = 1700 м²/кг), с содержанием (в % по массе): SiO_2 – 53; Al_2O_3 – 42 и пуццолановой активностью 1210 мг/г (ООО «Синерго», РФ); пластифицирующие добавки: Melflux 5581F (BASF Construction Additives, Германия); PCE TR-6088 (Taishan Tianrun Factory, КНР); PCE-801 (Shanghai Bestsolution Co, КНР); Sika ViscoCrete 226-P (Sika, РФ).

Растекаемость смеси оценивали по показателю расплыва при истечении из конуса Хагерманна, определяемому как среднее арифметическое значение двух взаимно перпендикулярных измерений диаметра расплыва. Прочность $R_{сж}$ оценивалась при

сжатии образцов-кубиков с ребром 30 мм. Для снижения влияния геометрических характеристик образца их опорные грани перед испытанием шлифовались.

Экспериментальная часть

Исследование совместимости пластифицирующих добавок с портландцементом ЦЕМ I 52,5Н проводилось путем оценки реологических характеристик цементного теста (матрица 1-го уровня) при различном водоцементном отношении (В/Ц) и определения прочностных показателей в заданные сроки твердения. Формование образцов осуществляли при условии достижения расплыва из конуса Хагерманна более 270 мм. Таким образом, значение В/Ц при формовании образцов-кубиков составило 0,212. Пластификатор вводили с полным объемом воды затворения. Максимальная растекаемость наблюдалась не ранее 3–6 минут, поэтому окончательное измерение для всех составов проводили через 7 минут после смешивания компонентов. Эталон, по которому производилось сравнение прочностных свойств на данном этапе разработки составов, оставалась система Nanodur 5941 + 1 % Melflux5581f при В/Т 0,16 ($D_{\text{распл}}=315$ мм). Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

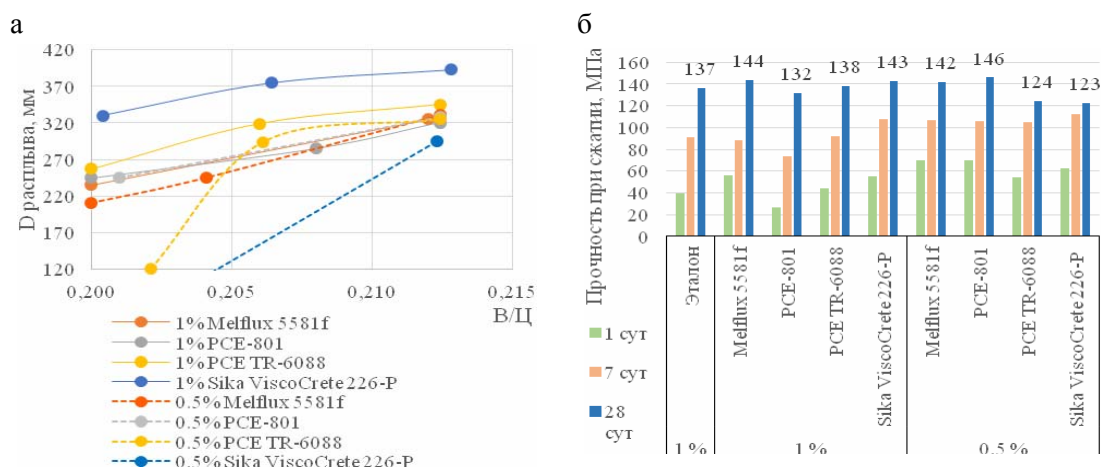


Рис.1. Влияние вида ГП, дозировки и В/Ц отношения на растекаемость цементной суспензии (а) и на прочность цементного камня (при В/Ц=0,212) (б)

Данные, приведенные на графиках, показывают, что добавка Sika ViscoCrete 226-P в дозировке 1 % от массы цемента обеспечивает максимальный пластифицирующий эффект в диапазоне В/Ц = 0,20–0,213, характерном для цементных матриц высокофункциональных бетонов. При дозировке 0,5 % наилучшую растекаемость показывает гиперпластификатор PCE-801. На диаграммах нарастания прочности замедляющий эффект добавки PCE-801 в первые сутки твердения при ее дозировке 1 %. Наилучшие результаты по прочности получены в системах «ПЦ+1 % Melflux5581f» и «ПЦ+1 % Sika ViscoCrete 226-P». Результаты экспериментов позволили установить оптимальные дозировки ГП:

- 0,8...1 % – для Melflux 5581f, PCE TR-6088, Sika ViscoCrete 226-P;
- 0,4...0,6 % – для PCE-801.

Для подбора активных минеральных добавок исследовали влияние их вида на реологические и прочностные свойства цементных матриц. Широкодоступные природные материалы в качестве пуццолановой добавки ограниченно пригодны, поскольку обладают значительной водопотребностью вследствие высокой пористости [10]. Поэтому в качестве активных минеральных добавок были отобраны микрокремнезём и метакраин. Приготавливали модельные (цементно-водно-порошковые) матрицы, содержащие цемент, пластификаторы (в установленных ранее оптимальных дозировках) и активные минеральные добавки в количестве 15 % от массы Ц. Водотвердое отношение корректировалось до обеспечения расплыва 290...300 мм по конусу

Хагерманна. Значения В/Т для составов с требуемой растекаемостью представлены на рис. 2, а. На рис. 2, б приводятся диаграммы нарастания прочности при сжатии.

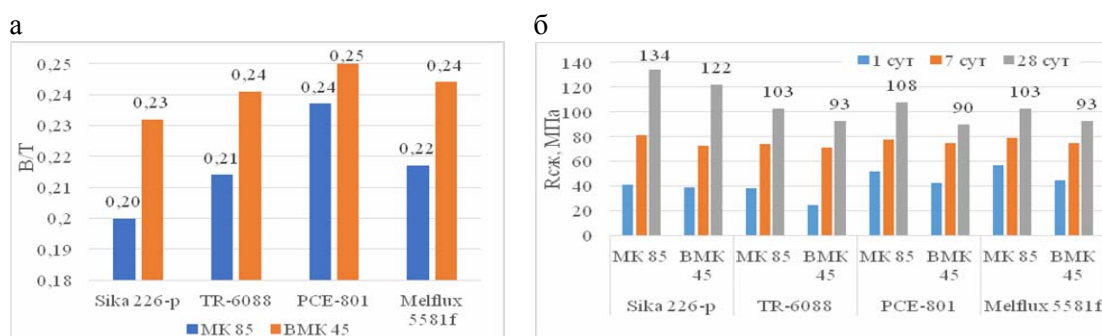


Рис. 2. Влияние вида минеральных добавок на свойства цементных матриц:
а – значение водотвердого отношения смесей равной растекаемости с различными ГП;
б – кубиковая прочность

Из результатов на диаграммах видно, что в сравнении с метакаолином составы на основе микрокремнезёма характеризуются значительно меньшей водопотребностью. Наилучшие показатели водоредуцирования получены на добавке Sika 226-p, что также благоприятно отражается на конечной прочности образцов материала. Кроме этого, можно отметить высокую суточную прочность образцов с PCE-801 и Melflux 5581f. С учетом полученных результатов дальнейшие исследования целесообразно проводить, отталкиваясь от показателей составов, содержащих в качестве пластификатора ГП Sika 226-p, а в качестве активного минерального компонента – микрокремнезём МК-85.

Оптимальная степень замещения цемента микрокремнезёмом также определялась на составах матриц 1-го уровня. Известно, что оптимальную дозировку микрокремнезёма назначают по показателям его дисперсности и активности [2, 9]. Так, дозировка низкокачественного микрокремнезёма достигает 15–20 % цемента, в то время как аналогичный показатель ультрадисперсного микрокремнезёма с высокой пуццолановой активностью колеблется в пределах 1–5 %. Были приготовлены составы, содержащие портландцемент, ГП Sika 226-p (1 % от ПЦ) и микрокремнезём в дозировке 0, 10 и 15 % от ПЦ. Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

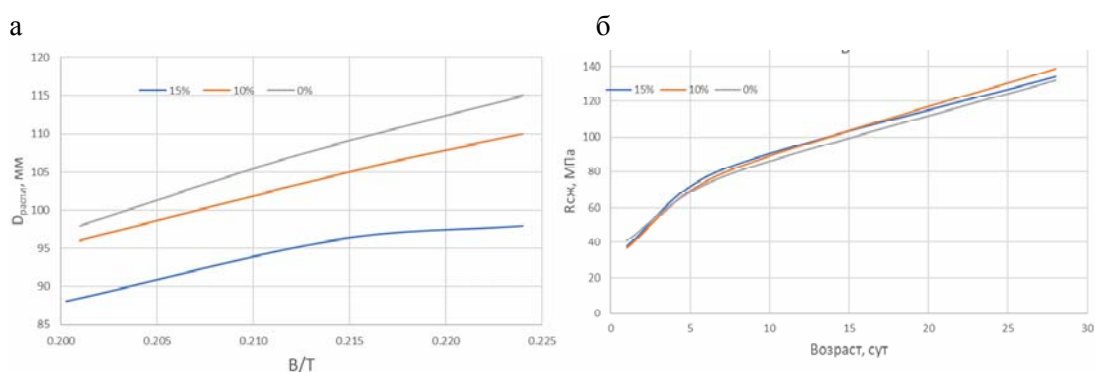


Рис.3. Влияние добавки МК-85 на свойства цементных матриц:
а – реологические; б – прочностные (В/Т=0,225)

Из приведенных данных видно, что оптимальное содержание используемого микрокремнезёма не превышает 10 % от Ц. Увеличение содержания МК-85 до 15 % ведёт к снижению растекаемости суспензии, при практическом отсутствии прироста прочности. Исходя из полученных данных и результатов определения пуццолановой активности, в качестве оптимальной была принята дозировка МК-85 в количестве 8–10 % от массы цемента.

При производстве ответственных бетонных изделий со сложной геометрией поверхности зачастую возникает необходимость получения бездефектной лицевой

поверхности. Для снижения открытой пористости, вызванной «защемлением» воздушных пузырей у стенок формы при заливке бетонной смеси, было опробовано использование различных добавок пеногасителей. На рис. 4 приведен эффект снижения открытой пористости образцов мелкозернистого бетона при введении самоэмульгирующегося пеногасителя ПГ-5 (производства ООО «Норкем», РФ) в дозировке 0,05 % от Ц. Эффект снижения открытой пористости составляет 80-90 %.



Рис.3. Образец бетона, модифицированного ПГ-5 (верхний), в сравнении с контрольным, не содержащим указанной добавки (нижний)

Последующие результаты разработки опытных составов высокофункционального бетона для применения в машиностроении были описаны ранее [7, 8, 11]. В таблице приведены результаты оценки себестоимости 1 м³ разработанных составов.

Сравнительная оценка себестоимости 1 м³ ВФБ
(по рыночным ценам на начало 2025 г.)

Компонент	Расход, кг	Цена за кг, руб.	Стоимость, руб.
Разработанный состав			
Портландцемент	690	9,5	6552
Микрокремнезём	55	18	993
Микрокальцит	179	5,5	986
Песок кварцевый (фр. 0,16–0,63)	241	0,38	92
Песок кварцевый (фр. 0,63–2,5)	154	0,6	93
Гранитный заполнитель (фр. 2,5–5)	811	1,1	892
Расширяющаяся добавка (CSA)	41	24,5	1014
Бутилцеллозольв	6,9	126	869
Гиперпластификатор (Sika 226-p)	5,5	615	3393
Вода	186	0,036	7
Общая стоимость компонентов бетонной смеси, руб.			14890
Состав на основе вяжущего Nanodur			
Nanodur Compound 5941	1050	36,4 (0,4 €)	38220
Песок кварцевый (фр. 0–2,5)	430	0,45	194
Гранитный заполнитель (фр. 2,5–5)	880	1,1	968
Гиперпластификатор (Melflux 5581f)	14	1800 (20 €)	25200
Противоусадочная добавка Eclipse Floor 200	6	1250 (14 €)	7500
Вода	160	0,036	6
Общая стоимость компонентов бетонной смеси, руб.			72087

На основании анализа данных в таблице можно сделать вывод, что разработанные составы являются экономически эффективными в сравнении с существующими аналогами (на основе Nanodure и химических добавок европейского производства). Себе-

стоимость разработанного ВФСУБ составляет 14890 руб./м³, а бетонной смеси на основе Nanodure – 72087 руб./м³.

Выводы

Полученные результаты подтверждают перспективность использования отечественных и китайских модифицирующих добавок в сочетании с портландцементом местного производства для создания конкурентоспособных составов высокофункциональных бетонов ответственного назначения.

Были установлены оптимальные дозировки гиперпластификаторов для цементных матриц высокофункциональных бетонов: 0,8-1,0 % – для Melflux 5581f, PCE TR-6088 и Sika ViscoCrete 226-P; 0,4-0,6 % – для PCE-801. Наибольшую эффективность показала добавка Sika ViscoCrete 226-P в дозировке 1 % от массы цемента, обеспечивающая максимальный пластифицирующий эффект при водоцементном отношении 0,20-0,213.

Установлено, что микрокремнезём МК-85 обладает преимуществами перед метакраолином по водопотребности и влиянию на прочностные характеристики. Оптимальная дозировка микрокремнезёма за счёт использования продукта с высокой удельной поверхностью частиц может быть снижена до 8-10 % от массы цемента без потери прочности и ухудшения гравитационного растекания.

Применение пеногасителя ПГ-5 в количестве 0,05 % от массы цемента позволяет снизить открытую пористость бетона на 80-90 %, что обеспечивает получение высококачественной лицевой поверхности изделий.

Разработанные составы на основе местного вяжущего с применением российских и китайских добавок демонстрируют снижение себестоимости на 79 %, по сравнению с импортными аналогами, при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Ю.С. Кузнецов, В.М. Володин, Е.А. Белякова // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8 (34). – С. 47–53.
2. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.
3. Калашников, В.И. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2007. – № 6. – С. 8–11.
4. Aïtcin, P.-C. Science and technology of concrete admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.
5. Применение сверхвысокотехнологичного бетона на основе специального вяжущего Nanodur Compound 5941. – URL: <https://www.cpi-worldwide.com/ru/journals/artikel/23781> (дата обращения: 19.03.2025).
6. Dyckerhoff NANODUR Compound 594 for simple production of UHPC. – URL: <https://www.dyckerhoff.com/documents> (дата обращения: 16.11.2025).
7. Береговой, В.А. Опыт применения высокофункционального бетона в конструкции современного станка / В.А. Береговой, К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 5 (280). – С. 31–37.
8. Береговой, В.А. Перспективы импортозамещения сырьевых компонентов высококачественного дисперсно-армированного бетона и исследование его физико-механических свойств / В.А. Береговой, К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров, Ф.А. Востоков // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2023. – № 1(16). – С. 16–21.
9. Тараканов, О.В. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 47–53.

-
10. Калашников, В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2016. – № 1–2. – С. 96–103.
11. Лавров, И.Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 42–48.

References

1. Kalashnikov, V.I. New generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, Yu.S. Kuznetsov, V.M. Volodin, E.A. Belyakova // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8 (34). – P. 47–53.
2. Kalashnikov, V. I. Calculation of compositions of high-strength self-sealing concretes / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2008. – No. 10. – P. 4–6.
3. Kalashnikov, V.I. Finely dispersed rheological matrices and powdered concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // Concrete technologies. – 2007. – No. 6. – P. 8–11.
4. Aïtcin, P.-C. Science and technology of concrete admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead publishing, 2015. – 617 p.
5. Application of ultra-high-tech concrete based on a special binder Nanodur Compound 5941. – URL: <https://www.cpi-worldwide.com/ru/journals/artikel/23781> (date of request: 03/19/2025).
6. Dyckerhoff NANODUR Compound 594 for simple production of UHPC. – URL: <https://www.dyckerhoff.com/documents> (date of reference: 11/16/2025).
7. Beregovoy, V.A. Experience of using high-functional concrete in the construction of a modern machine / V.A. Beregovoy, K.N. Makhambetova, I.Yu. Lavrov // Construction materials, equipment, and technologies of the 21st century. – 2023. – No. 5 (280). – P. 31–37.
8. Beregovoy, V.A. Prospects for import substitution of raw materials components of high-quality dispersed reinforced concrete and the study of its physico-mechanical properties / V.A. Beregovoy, K.N. Makhambetova, I.Yu. Lavrov, F.A. Vostokov // Bulletin of the Russian State University of Civil Engineering: Construction, Science and Education. – 2023. – No. 1(16). – P. 16–21.
9. Tarakanov, O.V. New generation self-sealing concretes based on local raw materials / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Regional Architecture and engineering. – 2014. – No. 2. – P. 47–53.
10. Kalashnikov, V. I. Evolution of the development of compositions and changes in the strength of concrete. The concretes of the present and the future. Part 1. Changing the composition and strength of concrete / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2016. – No. 1–2. – P. 96–103.
11. Lavrov, I.Yu. High-functional concretes for industrial construction and mechanical engineering / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // Building materials. – 2024. – No. 12. – P. 42–48.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Мартышкин Даниил Олегович,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: historical95@mail.ru

Залилов Илья Вадимович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Martyshkin Daniil Olegovich,
Assistant of the department «Building Structures»
E-mail: historical95@mail.ru

Zalilov Ilya Vadimovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»
E-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ СПОСОБОМ ОБКЛЕЙКИ КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.О. Мартышкин, И.В. Залилов

Рассмотрены соединения деревянных конструкций с применением различных механических связей. Представлены соединения с клееными шайбами из стеклотекстолита КАСТ-В и СТЭФ. Приведены результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки. Установлены величины несущей способности и критерий разрушения образцов. Рассмотрены повышение несущей способности и увеличение деформативности соединений с клееными стеклопластиковыми шайбами обклейкой композитным материалом поверхности элементов соединения.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, шайба, стеклопластик, несущая способность, стеклоткань

INCREASING THE BEARING CAPACITY OF JOINTS OF WOODEN STRUCTURES ON GLUED FIBERGLASS WASHERS BY GLUING THE INNER SURFACE OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH COMPOSITE MATERIAL

D.O. Martyshkin, I.V. Zalilov

The connections of wooden structures using various mechanical connections are considered. Connections with glued washers made of fiberglass CAST-V and STEF are presented. The results of testing samples under short-term load are presented. The values of the bearing capacity and the criterion of destruction of the samples are established. An increase in the bearing capacity and an increase in the deformability of joints with glued fiberglass washers by gluing the surface of the joint elements with a composite material is considered.

Keywords: wooden structures, connection, washer, fiberglass, load-bearing capacity, glass fabric

В современной практике строительства наиболее распространёнными решениями узловых соединений деревянных конструкций (далее ДК) [1, 2] являются: клеенные стержни по «системе ЦНИИСК», клеенные пластины, металлические зубчатые

пластины (МЗП), шпонки и шайбы [3-5]. На основе достоинств клеенных стальных шайб [6] предложены их разновидности из стеклотекстолита КАСТ-В и СТЭФ [7, 8]. Общий вид шайб показан на рис. 1.

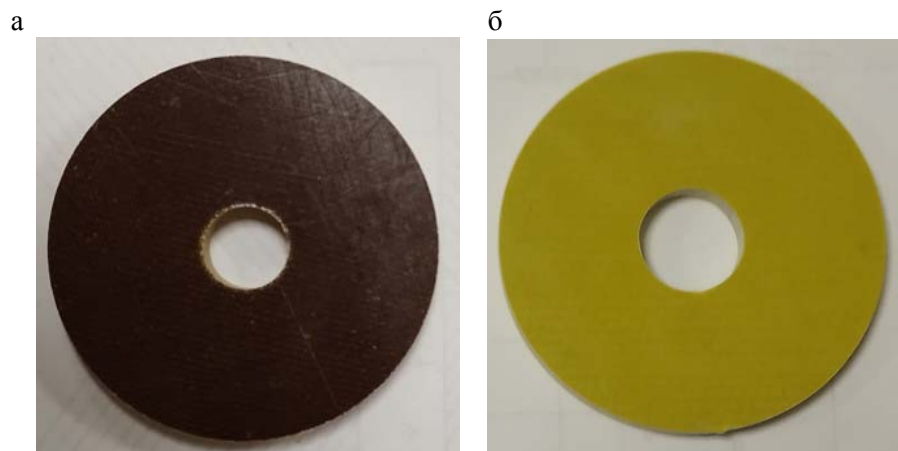


Рис. 1. Общий вид шайб:

а – стеклотекстолит КАСТ-В; б – стеклотекстолит СТЭФ

Соединения с клееными шайбами из стеклотекстолита КАСТ-В и СТЭФ могут использоваться при различных условиях внутри здания (температура, высокая влажность, воздействие химических веществ) и нагрузках, действующих на несущие конструкции [7, 8]. Стеклотекстолит КАСТ-В (ГОСТ 10292-74) (рис. 1, а) является огнестойким материалом, что повышает его себестоимость, по сравнению с другими композитами. Соединения с клееными шайбами из КАСТ-В целесообразно применять на объектах с высокими температурами и значительными тепловыми выделениями. Свойства стеклотекстолита СТЭФ (ГОСТ 12652-74) (рис. 1, б) аналогичны КАСТ-В (кроме максимальной температуры). На этом основании шайбы из СТЭФ целесообразно использовать в узлах ДК на объектах с нормальными условиями эксплуатации и агрессивной средой (высокая влажность, воздействие химических веществ).

Технология изготовления данных соединений предполагает клеивание шайбы заподлицо в тело деревянного элемента [6]. Для обеспечения безопасной работы древесины в тело древесины клеиваются стеклотекстолитовые шайбы из КАСТ-В (рис. 1, а) и СТЭФ (рис. 1, б). Практическая применимость композитных шайб подтверждена на основе натурных испытаний образцов [7, 8]. Общий вид образцов показан на рис. 2.

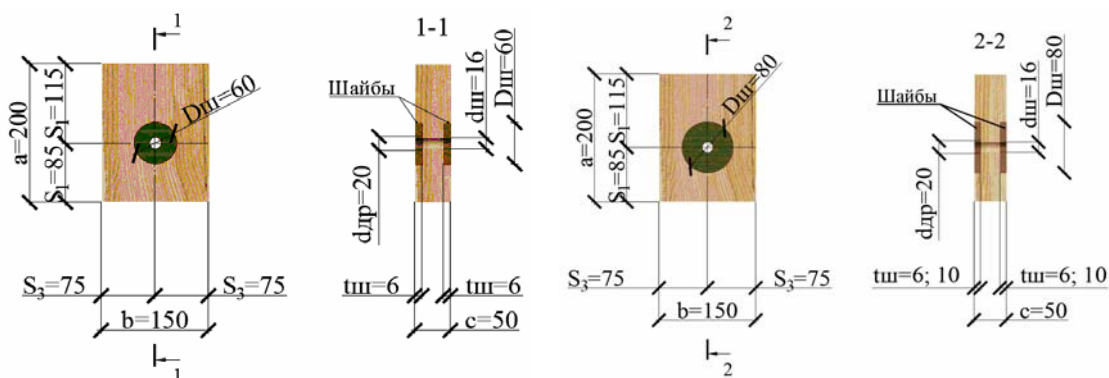


Рис. 2. Общий вид и размеры образцов

Для соединения деревянного элемента с клееными шайбами и металлическими накладками (рис. 3) используется металлический болт или шпилька. Для обеспечения коррозионной стойкости элементов соединений деревянных конструкций целесообразно использовать оцинкованные или подверженные гальванической обработке

болтовые комплекты. В качестве альтернативы также рассматриваются болты из композитных материалов [9].

Подготовленные образцы испытывались на сжатие с равномерной нагрузкой до полного разрушения (рис. 3).

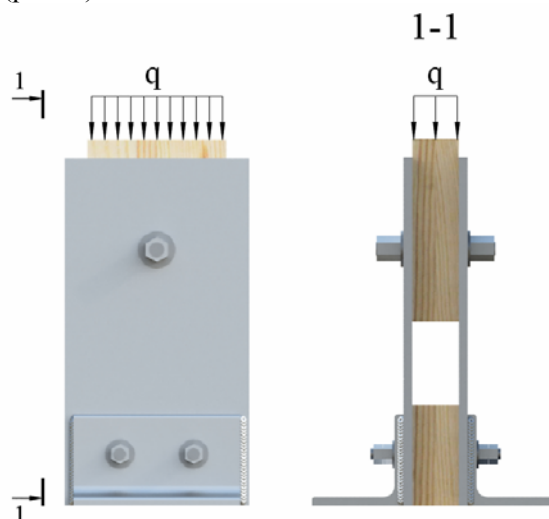


Рис. 3. Схема испытаний образцов на клеенных шайбах

В процессе испытаний фиксировались величины нагрузок и деформации образцов. Графики распределения деформаций сдвига в образцах на клеенных стеклотекстолитовых шайбах представлены на рис. 4.

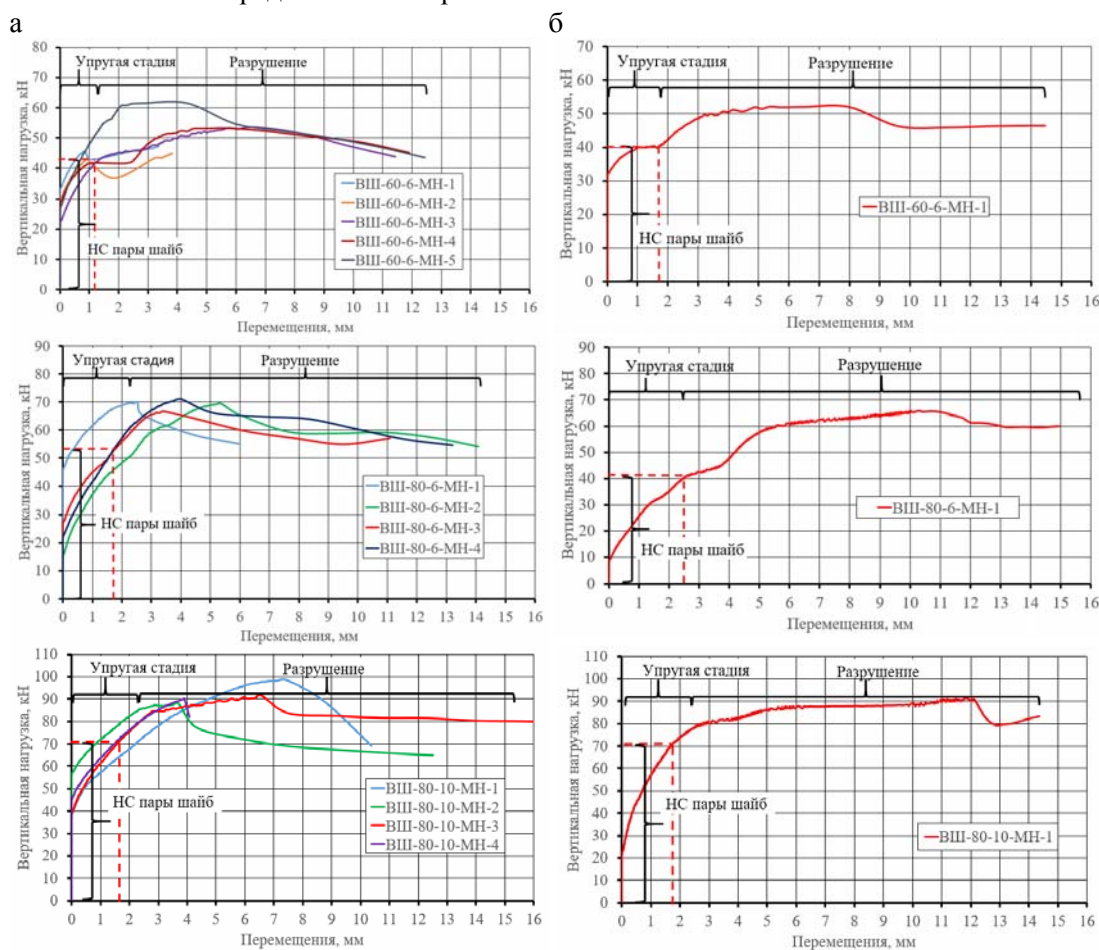


Рис. 4. Деформации сдвига в образцах на клеенных стеклотекстолитовых шайбах КАС-В (а) и СТЭФ (б)

Согласно рис. 4, характер работы образцов с клееными шайбами из стеклотекстолитов КАСТ-В и СТЭФ аналогичен. При нагружении образцов происходит обмятие шайб, далее отмечается линейный рост нагрузки и деформаций. За разрушающую нагрузку (несущую способность пары шайб) принимается величина, при которой деформации равны 2 мм. При таких деформациях происходит разрушение клеенной шайбы, и в работу включается древесина. Таким образом обеспечивается конструктивный запас прочности соединения.

Средняя разрушающая нагрузка образцов с клееными стеклотекстолитовыми шайбами составила:

– стеклотекстолитовые шайбы (КАСТ-В) ВШ-60-6-МН – 43,42 кН, ВШ-80-6-МН – 52,61 кН, ВШ-80-10-МН – 70,43 кН;

– стеклотекстолитовые шайбы (СТЭФ) ВШ-60-6-МН – 40,52 кН, ВШ-80-6-МН – 41,38 кН, ВШ-80-10-МН – 70,91 кН.

Далее представлен общий вид разрушения образцов (рис. 5), где видно вертикальное растрескивание деревянного элемента и клеенной шайбы. Первичное растрескивание возникает в шайбе, после чего при дальнейшем нагружении растрескивается деревянный элемент [7, 8], что подтверждает хрупкое разрушение соединения. Вместе с тем, испытания показали достаточно высокую несущую способность соединения [7, 8] как было отмечено выше. Однако следует рассмотреть возможные варианты увеличения несущей способности соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах.



Рис. 5. Общий вид разрушения образцов

Для повышения несущей способности рассматривается вариант обклейки поверхности деревянного элемента композитным материалом [10] (стеклотканью с размерами ячеек от 2×2 до 5×5 мм) (рис. 6). Стеклоткань наклеивается на заранее подготовленную поверхность деревянного элемента, для наклеивания используется клей на основе эпоксидной смолы, далее накладываются крайние элементы соединения и весь комплект прессуется.

При таком варианте обеспечивается монолитная работа всех соединяемых элементов, исключается податливость и хрупкое разрушение шайб и образца.

Кроме этого, рассматривается вариант повышения несущей способности, при котором стеклоткань наклеивается только на поверхность среднего элемента (рис. 6) [10]. При этом, конструктивные элементы стягиваются центровым болтом. Таким образом, средний элемент с вклеенными шайбами, в котором возникают максимальные усилия сжатия под шайбами, усиливается. Это происходит за счет увеличения контактной поверхности и, как описано выше, исключается хрупкое разрушение вдоль линии действия нагрузки.

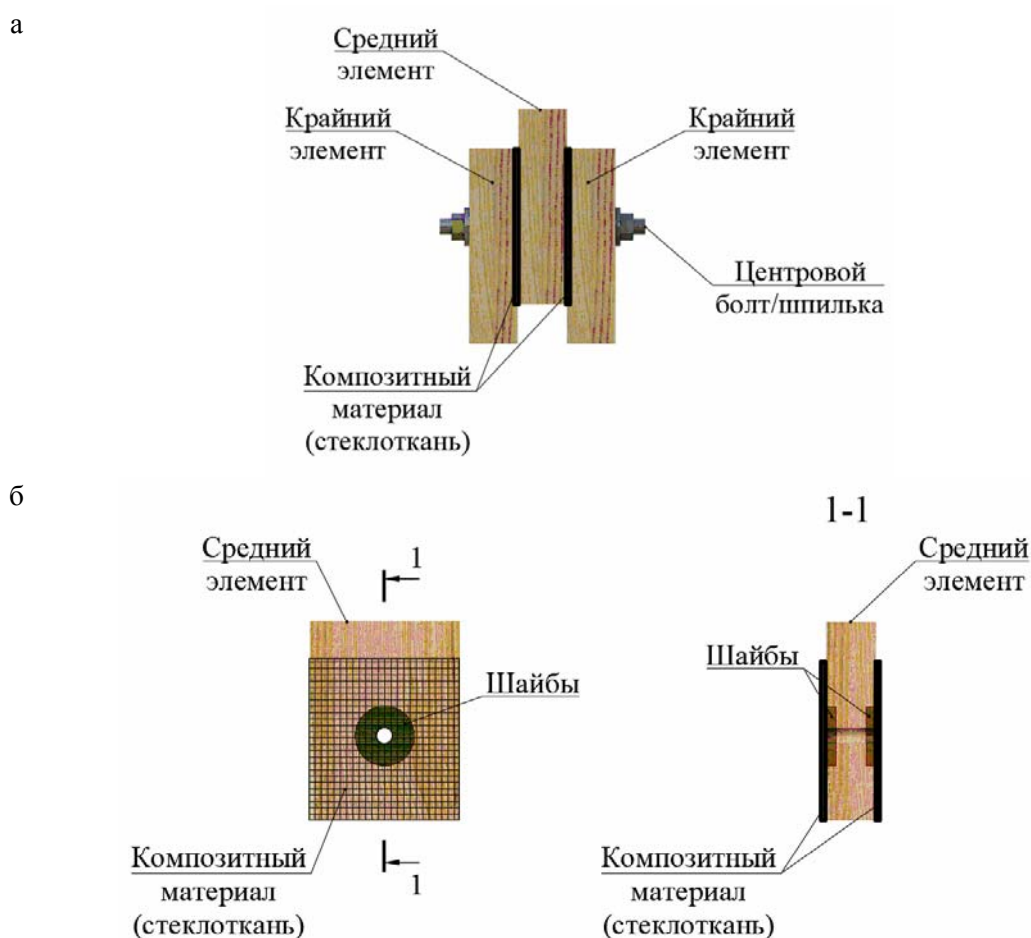


Рис. 6. Образец с применением обклейки композитным материалом (а), средний элемент с обклейкой поверхности композитным материалом (б)

Представленный вариант усиления узловых соединений может использоваться в несущих деревянных и деревоклееных конструкциях [1, 2, 11].

На рис. 7 представлена треугольная ферма с конструктивными деревянными элементами и узлами на вклеенных стеклопластиковых шайбах. При таком варианте выполнения узлов часть усилия воспринимается клеевым швом со стеклотканью, повышая несущую способность и снижая деформативность соединения.

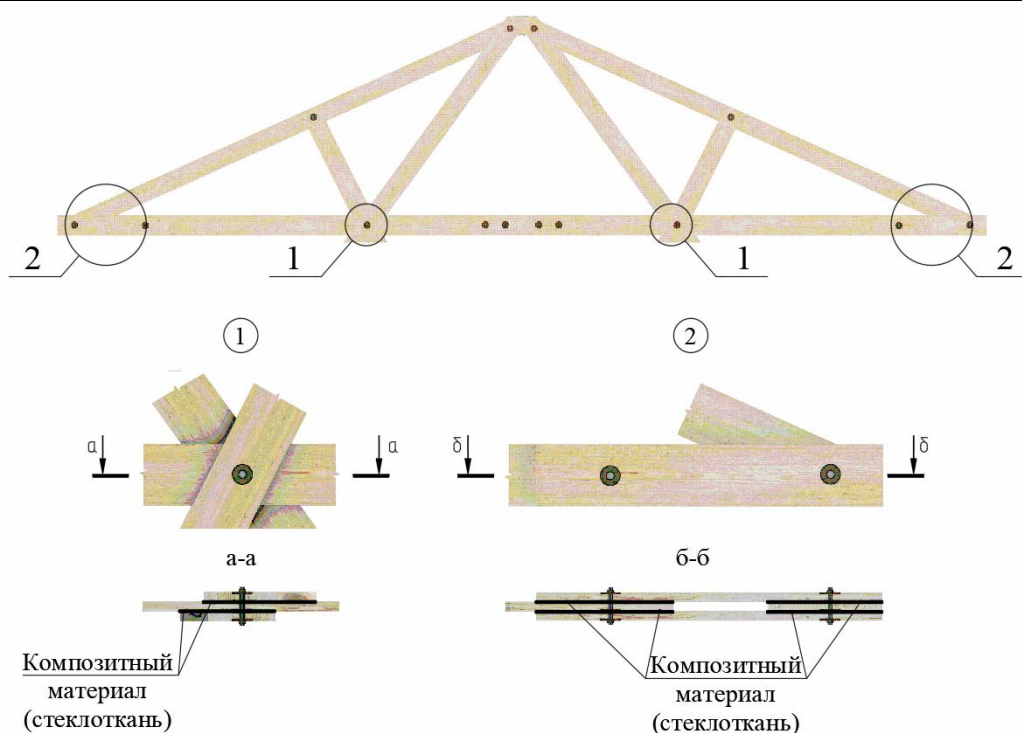


Рис. 7. Треугольная ферма с конструктивными деревянными элементами и узлами на клеенных стеклопластиковых шайбах

Далее представлены стыковые соединения растяжения/сжатия с узлами на клеенных стеклопластиковых шайбах (рис. 8).

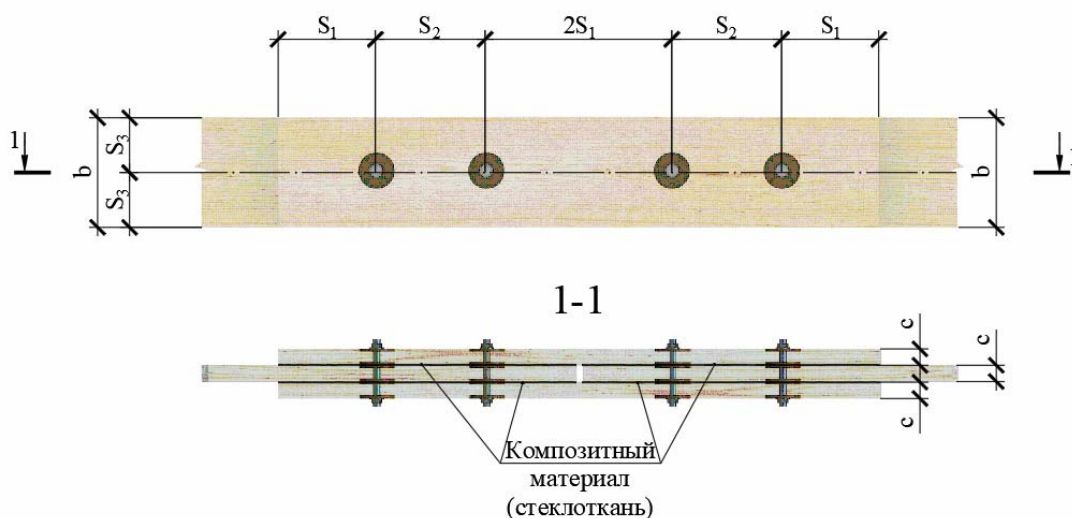


Рис. 8. Стыковые соединения растяжения/сжатия с узлами на клеенных стеклопластиковых шайбах

Таким образом, согласно полученным результатам испытаний образцов с клееными шайбами из стеклотекстолита КАСТ-В и СТЭФ, установлена удовлетворительная несущая способность пары шайб. Вместе с тем, установлено, что при нагружении образцов вертикальной нагрузкой, происходит растрескивание шайб и деревянного элемента вдоль линии действия нагрузки. Для повышения несущей способности, исключения податливости и хрупкого разрушения шайб и образца рассматривается вариант обклейки поверхности деревянного элемента композитным материалом.

Список литературы

1. Гаппоев, М.М. Конструкции из дерева и пластмасс / М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов, Э.В. Филимонов. – Москва : АСВ, 2004. – 440 с.
2. Калугин, А.В. Деревянные конструкции / А.В. Калугин. – Москва : АСВ, 2008. – 286 с.
3. Турковский, С.Б. Клеенные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
4. Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35–50.
5. Попов, Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Е.В. Попов, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – Курск, 2015. – С. 189–198.
6. Арискин, М.В. Совершенствование клеюметаллических соединений деревянных конструкций с применением стальных шайб : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Арискин Максим Васильевич. – Пенза : ПГУАС, 2011. – 190 с.
7. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.
8. Мартышкин, Д.О. Несущая способность соединений деревянных конструкций с различными параметрами клеенных стеклопластиковых шайб / Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №3(60) – С. 108–117.
9. Мартышкин, Д.О. Стеклопластиковые болты соединений деревянных конструкций / Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин, И.В. Залилов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2024. – №2(19) – С. 31–36.
10. Мартышкин, Д.О. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на клеенных шайбах из композитных материалов / Д.О. Мартышкин, Н.В. Князев, Н.В. Колесников, А.В. Меркушов // Наука молодых – интеллектуальный потенциал XXI века : сборник статей Международного научного форума. – Пенза, 2024. – С.270–274.
11. Сибен, А.В. Клеёные деревянные конструкции в строительстве: эффективность и проблемы применения / А.В. Сибен // Новые технологии – нефтегазовому региону : сб. материалов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в IV т. – Тюмень, 2022. – С. 180–183.

References

1. Gappoev, M.M. Constructions from wood and plastics / M.M. Gappoev, I.M. Guskov, L.K. Ermolenko, V.I. Linkov, E.T. Serova, B.A. Stepanov, E.V. Filimonov. – Moscow : ASV Publishing House, 2004. – P 440.
2. Kalugin, A.V. Wooden constructions / A.V. Kalugin. – Moscow : ASV Publishing House, 2008. – P. 286.
3. Turkovsky, S.B. Glued wooden structures with joints on glued rods in modern construction (System of TsNIISK) / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. – Moscow : RIF «Building Materials», 2013. – 308 p.
4. Rimshin, V.I. Connections of elements of wooden structures on dowels and washers / V.I. Rimshin, B.V. Labudin, V.I. Melekhov [et al.] // MSUCE Bulletin. – 2016. – No 9. – P. 35–50.
5. Popov, E.V. Testing for shear of elements of wooden structures connected using toothed washers «Bulldog» / E.V. Popov, B.V. Labudin, V.I. Melekhov // Safety of the construction industry in Russia. Problems and Solutions. – Kursk, 2015. – P. 189–198.

-
6. Ariskin, M.V. Improvement of glue-metal connections of wooden structures using steel washers : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.23.01 / Ariskin Maxim Vasilyevich. – Penza : PGUAS, 2011. – 190 p.
 7. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.
 8. Martyshkin, D.O. Bearing capacity of joints of wooden structures with various parameters of glued fiberglass washers / D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2024. – No 3(60) – P. 108–117.
 9. Martyshkin, D.O. Fiberglass bolts of joints of wooden structures / D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Vestnik PGUAS: construction, science and education. – 2024. – №2(19) – P. 31–36.
 10. Martyshkin, D.O. Ways to increase the bearing capacity of joints of wooden structures on glued washers made of composite materials / D.O. Martyshkin, N.V. Knyazev, N.V. Kolesnikov, A.V. Merkushov // Science of the young – the intellectual potential of the XXI century : Collection of articles International Scientific Forum. – Penza, 2024. – P.270-274.
 11. Siben, A.V. Glued wooden structures in construction: efficiency and application problems // New technologies for the oil and gas region : the collection of the Materials of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and Young Scientists : In IV volumes. – Tyumen, 2022. – P. 180–183.

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Махамбетова Камажай Нурабуллаевна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: techbeton@pguas.ru

Мошкова Екатерина Анатольевна,
студент
E-mail: techbeton@pguas.ru

Сухова Наталья Викторовна,
студент
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Makhambetova Kamagay Nurabullaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: techbeton@pguas.ru

Moschkova Ekaterina Anatolyevna,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

Sukhova Natalia Viktorovna,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.Н. Махамбетова, Е.А. Мошкова, Н.В. Сухова

Выполнена оценка качества глинистого сырья Пензенских месторождений по определению физико-механических и технологических свойств глин. Проведен обжиг опытных керамических образцов с принятым режимом обжига. Полученные результаты показали, что исследуемые глины являются легкоплавкими, по минеральному составу – преимущественно монтмориллонитовыми, по качеству полностью удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к пригодным сырьевым материалам для производства керамических изделий.

Ключевые слова: глина, керамика, гранулометрический состав, связующая способность, прочность при сжатии, сушка, линейная усадка, режим обжига, спекаемость

QUALITY ASSESSMENT OF LOCAL CLAY RAW MATERIALS USED FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC WALL MATERIALS

K.N. Makhambetova, E.A. Moschkova, N.V. Sukhova

The quality of clay raw materials from Penza deposits was assessed to determine their physical, mechanical, and technological properties. Experimental ceramic samples were fired using the adopted firing regime. The obtained data showed that the studied clays are low-melting, predominantly montmorillonite in mineral composition, and fully meet the regulatory requirements for suitable raw materials for ceramic production.

Keywords: clay, ceramics, particle size distribution, binding capacity, compressive strength, drying, linear shrinkage, firing mode, sintering

В современных условиях производство строительных материалов является одним из важнейших направлений отечественной промышленности. Это объясняется ежегодно повышающимися темпами строительства и требованиями к качеству выпускаемых изделий.

Большинство заводов по производству керамических изделий сосредоточено в центре европейской части России. Ряд регионов, несмотря на наличие сырья, вынужден ввозить его из других областей, что существенным образом отражается на его стоимости.

В сложившихся условиях удовлетворить требования по объемам производства, номенклатуре и качеству керамического кирпича возможно совершенствованием технологии, улучшением качества и расширением номенклатуры выпускаемой продукции. Повышение качества готовой продукции требует строгого соблюдения технологических параметров по всем операциям, улучшения обработки, тщательно подобранной шихты путём ввода различных добавок. В связи с растущей потребностью строительного комплекса в теплоэффективных строительных стеновых материалах на основе местного сырья, было проведено исследование физико-механических и технологических свойств глинистого сырья Пензенских месторождений по определению пригодности для производства керамических изделий.

Были проанализированы глины Блиновского (с. Блиновка Пензенской области) и Махалинского месторождений (с. Махалино Пензенской области).

Глина представляет собой продукт разложения и выветривания полевошпатовых и некоторых других горных пород. Внешний вид исследуемых глин Пензенских месторождений показан на рис. 1.

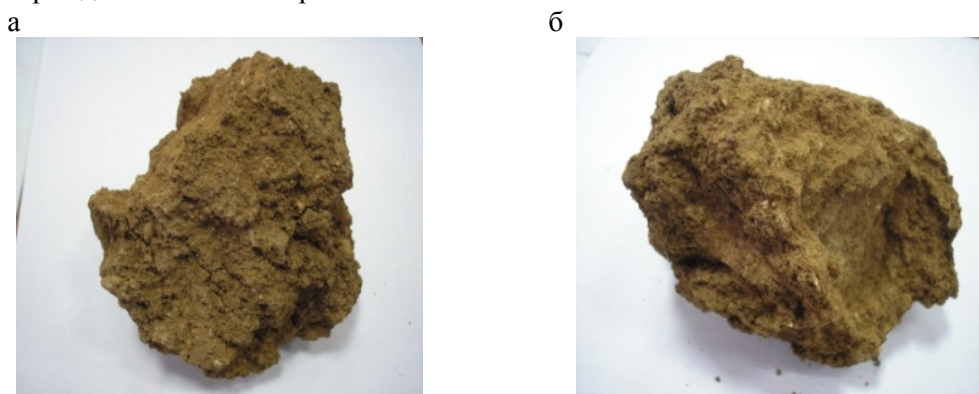


Рис. 1. Внешний вид глин Пензенского месторождения:
а – Блиновская глина; б – Махалинская глина

От правильности отбора средней пробы в значительной мере зависит точность оценки качества глинистого сырья. Отбор средней пробы для физико-механических исследований производили квартованием согласно ГОСТ 21216.0. Для исследований было подготовлено три пробы, отобранных из разной глубины участка карьера. Все пробы смешивали и из усредненной части отбирали пробу для макроскопического осмотра, а также оценки структуры и текстуры материала. Макроскопическая оценка производилась путем осмотра образцов средней пробы глины с помощью оптической лупы. Макроскопическое описание глинистого сырья представлено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Макроскопическое описание глинистого сырья

Пробы	Наименование исследуемого сырья	Цвет в сухом состоянии	Структура	Наличие известняка и его распределение (проба 10 %-й HCl)	Содержание других примесей
1	Блиновская глина	Бурый	Комковая	Слабо вскипает	MnO, Fe ₂ O ₃
2	Блиновская глина	Бурый	Комковая	Бурное вскипание	MnO, Fe ₂ O ₃
3	Махалинская глина	Бурый	Комковая	Бурное вскипание	MnO, Fe ₂ O ₃ ,

Как видно из табл. 1, цвет глин в сухом состоянии одинаковый – бурый. Исследование глин на наличие в них известняковых включений при воздействии на влажную глину 10 %-го раствора соляной кислоты показал, что глины содержат небольшое количество тонкораспределенного карбоната кальция, что подтверждается незначи-

тельным выделением углекислого газа во время реакции. У Блиновской глины скважины №1 наблюдается запесоченное сырье с высоким и средним содержанием крупных включений, а скважины №3 – с низким содержанием кварцевых и карбонатных включений. Глина Махалинского месторождения относится к группе с мелкими кварцевыми, карбонатными и железистыми включениями.

При определении гранулометрического состава глины применялся метод Б.И. Рутковского, основанный на способности частиц набухать в воде и на различной скорости падения частиц в воде в зависимости от их размера (седиментометрия или скорость осаждения).

При взаимодействии с водой способны набухать только минералы глинистой части. Зависимость скорости осаждения глинистых и мелких алевритовых частиц (песчаные, полевошпатовые) от ряда факторов и их размера описывается уравнением Стокса:

$$v = \frac{2r^2 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{g \eta},$$

где v – скорость падения частиц в жидкости, м/с; r – радиус частиц, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; η – вязкость жидкости, Н·с/м².

Данные анализа гранулометрического состава были нанесены на диаграмму Охотина [1-5]. По ней установлено, что Блиновская глина по количеству песчаных, глинистых и пылеватых частиц в пробе скважины №1 относится к суглинку (количество песчаных фракций – 33 %, пылеватых – 53,7 %, глинистых – 13,6 %); глина скважины №3 относится к глине (количество песчаных фракций – 0,5 %, пылеватых – 1 %, глинистых – 98,5 %). Аналогичным способом было определено, что Махалинская глина относится к глине (песчаные фракции – 0,58 %, пылеватые – 1 %, глинистые – 98,42 %).

Пластичность глинистого сырья определялась по разности между верхним и нижним пределами пластичного глиняного состояния, оцениваемых влажностью в соответствии с ГОСТ 21216.1. Испытания по числу пластичности показали, что все исследуемые глины (Блиновская глина скважина №1 – 10,4; Блиновская глина скважина №3 – 13,5; Махалинская глина – 9,4) относятся к умеренно-пластичным типам глин.

Определение связующей способности глины проводили путем формования из глиняного теста нормальной влажности образцов-кубов размерами 20×20×20 мм, затем высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-110°C. Высушенные таким образом образцы подвергались испытанию на гидравлическом прессе. Результаты полученных данных приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Связующая способность глинистого сырья

Наименование сырья	Площадь, S , см ²	Нагрузка по показанию манометра гидравлического пресса, кгс	Прочность при сжатии, МПа
Блиновская глина (скв. №1)	4,01	182	4,53
Блиновская глина (скв. №3)	4,07	235	5,77
Махалинская глина	4,05	155	3,82

За результат испытания приняли среднее значение прочности при сжатии пяти образцов-кубов. Прочность при сжатии для глины Блиновского месторождения (скважина №1, скважина №3) составляет 4,53 и 5,77 МПа соответственно.

Немаловажным является способность сырца, сформованного из глин, противостоять внутренним напряжениям без трещин и деформаций, развивающимся в резуль-

тате удаления влаги. Склонность глиняного образца к растрескиванию в период воздушной усадки характеризуется чувствительностью глины к сушке, которая определялась по методу А.Ф. Чижского. Установлено, что глины Блиновского месторождения (скважина №1 и №3) относятся к малочувствительным, глины Махалинского – к высокочувствительным глинам.

При сушке керамических изделий их объем сокращается, т.е. происходит усадка. В ходе исследований воздушную линейную усадку определяли по изменениям линейных размеров образцов из глины после сушки. Определение усадки производили на плитках размером 50×50×5 мм, отформованных пластическим способом. Результаты испытаний приведены в табл.3.

Т а б л и ц а 3

Линейная усадка глин

№ пробы	Наименование сырья	Влажность смеси, %	Линейная усадка, %, после сушки при температуре 105°С
1	Блиновская глина (скв. №1)	16	6,2
2	Блиновская глина (скв. №3)	21	7,3
3	Махалинская глина	25	7,8

Результаты эксперимента показали, что значение линейной усадки после сушки у глин Блиновского месторождения – 6,2 и 7,3 % и у Махалинской глины – 7,8 % соответственно.

На завершающем этапе исследования осуществлялся обжиг опытных керамических образцов размерами 20×20×20 мм, изготовленных из глиняного теста. При обжиге образцов учитывается способ их изготовления [6, 7]. Пластический способ формования из легкоплавких глин предусматривает обжиг при температуре 950-1000°С. В случае полусухого прессования максимальные температуры увеличивают на 50-100°С [6, 7]. Разница в максимальных температурах обжига объясняется тем, что изделия пластического формования отличаются более однородным мелкозернистым строением. При повышении температуры физико-механические свойства изделия в процессе обжига изменяются равномерно. Для изделий полусухого прессования характерно грубозернистое строение, крупные поры, большая неоднородность, поэтому они требуют несколько повышенную температуру обжига. В связи с этим, был принят следующий режим обжига при трех различных температурах изотермической выдержки: 1 – 950 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1050 °С (рис. 2). После обжига нами был определен цвет керамических образцов (рис. 3).

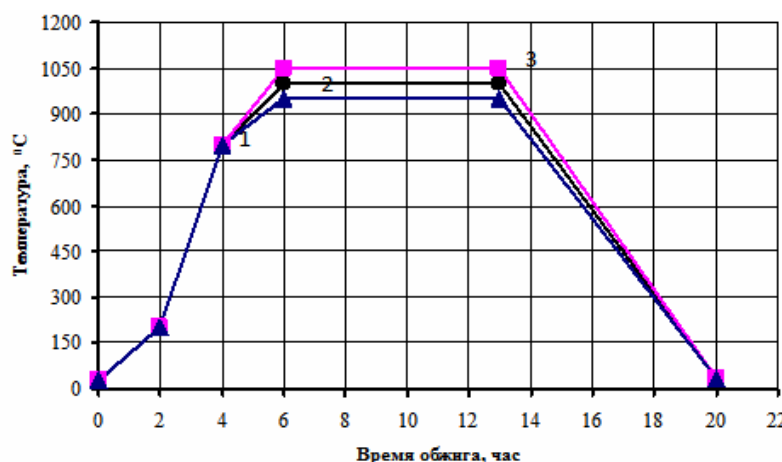


Рис. 2. График режима обжига керамических образцов при температурах изотермической выдержки: 1 – 950°С; 2 – 1000°С; 3 – 1050°С

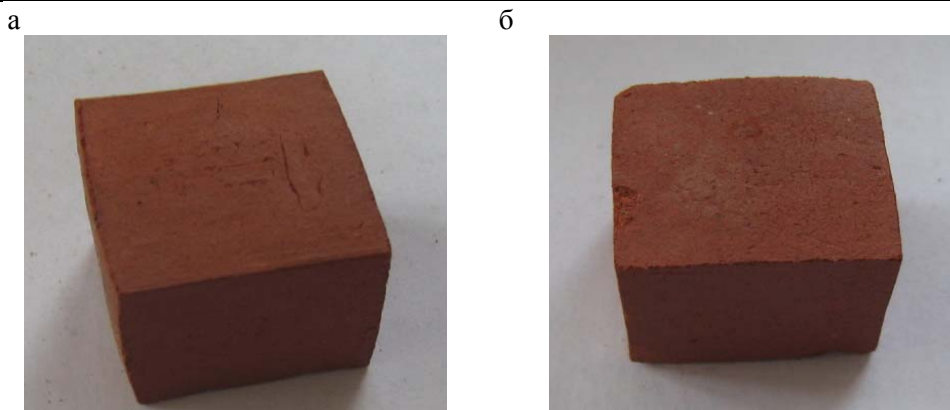


Рис. 3. Цвет глиняных образцов после обжига при температуре 950°C:
а – образец из Махалинской глины; б – образец из Блиновской глины

Как видно из рис. 3, все глиняные образцы после обжига имеют кирпичный цвет. При температуре обжига 1050°C наблюдалось образование трещины на образцах, изготовленных из глиняного теста Блиновского месторождения (рис. 4).



Рис. 4. Трещины на образце из Блиновской глины при температуре обжига 1050°C

Как известно, спекшимися считаются изделия, достигшие в процессе обжига минимального водопоглощения. Водопоглощение определялось в течение 48 часов на образцах-кубах размерами 20×20×20 мм, обожженных при заданных режимах обжига. Результаты по определению спекаемости опытных глиняных образцов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Спекаемость глин

Наименование сырья	Наименование показателей	Температура обжига, °C			Классификация сырья по степени спекания
		950	1000	1050	
Блиновская глина (скв. №1)	Водопоглощение по массе, %	9,60	9,54	9,53	Неспекающееся
	Плотность, г/см ³	2,206	2,207	2,214	
Блиновская глина (скв. №3)	Водопоглощение по массе, %	10,19	9,73	8,93	Неспекающееся
	Плотность, г/см ³	2,196	2,198	2,201	
Махалинская глина	Водопоглощение по массе, %	11,59	10,13	9,56	Неспекающееся
	Плотность, г/см ³	2,15	2,14	2,132	

Как видно из табл. 4, все глины по степени спекания относятся к неспекающимся. Огневую линейную усадку определяли после обжига по изменениям линейных размеров керамических образцов-плиток размером 50×50×5 мм. Минимальная полная усад-

ка отмечена у образцов из Блиновской глины, равной 6,2 % при температуре обжига 1050 °С. Максимальная полная усадка у образцов из Махалинской глины – 10,3 %.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований по определению физико-механических и технологических свойств сырья, можно сделать вывод о том, что исследуемые глины Пензенских месторождений являются легкоплавкими, а по минеральному составу – преимущественно монтмориллонитовыми. При пластическом способе формования изделий из легкоплавких глин оптимальная температура обжига 950°С. Таким образом, местные глины по качеству полностью удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к пригодным сырьевым материалам для производства керамических изделий.

Список литературы

1. Августиник А.И. Керамика / А.И. Августиник. – Ленинград : Стройиздат, 1975. – 590 с.
2. Андрианов, Н.Т. Практикум по технологии керамики : учеб. пособие / Н.Т. Андрианов, А.В. Беляков, А.С. Власов, И.Я. Гузман, Е.С. Лукин, М.А. Мальков, Ю.М. Мосин, Б.С. Скидан ; под ред. И.Я. Гузмана. – Москва, 2004. – 195 с.
3. Бакунов, В.С. Практикум по технологии керамики и огнеупоров / В.С. Бакунов, В.Л. Балкевич. – Москва : Стройиздат, 1972. – 348 с.
4. Вакалова, Т.В. Глины. Особенности структуры и методы исследования : учеб. пособие / Т.В. Вакалова, Т.А. Хабас, В.И. Верещагин, Е.Д. Мельник. – Томск, 1998. – 121 с.
5. Кузьменков, М.И. Основы технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов : лабораторный практикум / М.И. Кузьменков, А.А. Сакович. – Белорусский государственный технологический университет, 2004. – 176 с.
6. Мороз, И.И. Технология строительной керамики : учеб. пособие / И.И. Мороз. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища школа, 1980. – 383 с.
7. Павлов, В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики / В.Ф. Павлов. – Москва : Стройиздат, 1977. – 240 с.

References

1. Avgustinik, A.I. Ceramics / A.I. Avgustinik. – Leningrad : Stroyizdat, 1975. – 590 p.
2. Andrianov, N.T. Practical Training in Ceramics Technology : Textbook / N.T. Andrianov, A.V. Belyakov, A.S. Vlasov, I.Ya. Guzman, E.S. Lukin, M.A. Malkov, Yu.M. Mosin, B.S. Skidan ; Ed. by I.Ya. Guzman. – Moscow: 2004. – 195 p.
3. Bakunov, V.S. Practical Training in Ceramics and Refractory Technology / V.S. Bakunov, V.L. Balkevich. – Moscow : Stroyizdat, 1972. – 348 p.
4. Vakalova, T.V. Clays. Features of the Structure and Research Methods : a textbook / T.V. Vakalova, T.A. Khabas, V.I. Vereshchagin, E.D. Melnik. – Tomsk, 1998. – 121 p.
5. Kuzmenkov, M.I. Fundamentals of the Technology of Refractory Non-Metallic and Silicate Materials : laboratory practical training / M.I. Kuzmenkov, A.A. Sakovich. – Belarusian State Technological University, 2004. – 176 p.
6. Moroz, I.I. Technology of Construction Ceramics : a textbook / I.I. Moroz. – 3rd ed., revised and enlarged. – Kyiv : Vishcha shkola, 1980. – 383 p.
7. Pavlov, V.F. Physicochemical Principles of Firing Construction Ceramics Products / V.F. Pavlov. – Moscow : Stroyizdat, 1977. – 240 p.

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Меркушов Антон Викторович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: merkushov.av@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Merkushov Anton Viktorovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»
E-mail: merkushov.av@mail.ru

Ariskin Maxim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the
department «Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

МОНТАЖНЫЕ УЗЛЫ НЕСУЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШАЙБ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБОЙ

А.В. Меркушов, М.В. Арискин

Рассмотрены соединения деревянных и деревоклееных конструкций с применением металлических шайб с внутренней резьбой. Представлены результаты испытаний образцов с шайбами при действии кратковременной нагрузки. Установлены удовлетворительные значения несущей способности образцов. Выполнены моделирование и расчет двухшарнирной клееной деревянной арки. Монтажные стыки выполнены в сборно-разборном варианте с применением шайб с внутренней резьбой. Получены внутренние усилия в монтажных узлах конструкции, определены количество шайб и размеры металлических накладок.

Ключевые слова: деревянные конструкции, монтажный узел, шайба, металл, несущая способность

MOUNTING UNITS OF LOAD-BEARING WOODEN STRUCTURES USING WASHERS WITH INTERNAL THREAD

A.V. Merkushov, M.V. Ariskin

The connections of wooden and wood-glued structures using metal washers with internal thread are considered. The results of testing samples with washers under short-term load are presented. Satisfactory values of the bearing capacity of the samples have been established. A double-hinged glued wooden arch is being modeled and calculated. The mounting joints are made in a collapsible version using washers with internal thread. The internal forces in the mounting assemblies of the structure are obtained, the number of washers and the dimensions of the metal linings are determined.

Keywords: wooden structures, mounting assembly, washer, metal, bearing capacity

В современной практике строительства применение несущих деревянных конструкций является актуальным [1]. Применяются такие несущие конструкции, как стойки, колонны, рамы, балки, арки, которые эффективно могут использоваться как при малых (6-12 м), так и при больших пролетах (18-36 м) [2, 3]. Для обеспечения логистики большепролетные деревянные конструкции (далее ДК) конструктивно разделяются на отправочные марки с выполнением монтажных узлов.

Наиболее распространенными решениями узловых соединений ДК [2, 3] являются: вклеенные стержни по «системе ЦНИИСК», вклеенные пластины, металлические зубчатые пластины (МЗП), шпонки и шайбы [4-6]. Исходя из достоинств вклеенных стальных шайб [7], предложены их разновидности с внутренней резьбой [8, 9]. На основе натурных испытаний образцов установлено, что использование шайб с внут-

ренной резьбой без вклеивания в тело древесины обеспечивает несущую способность соединения за счет трения внутренней стороны шайбы и затяжки самого болта. Общий вид металлических шайб с внутренней резьбой показан на рис. 1, 2.

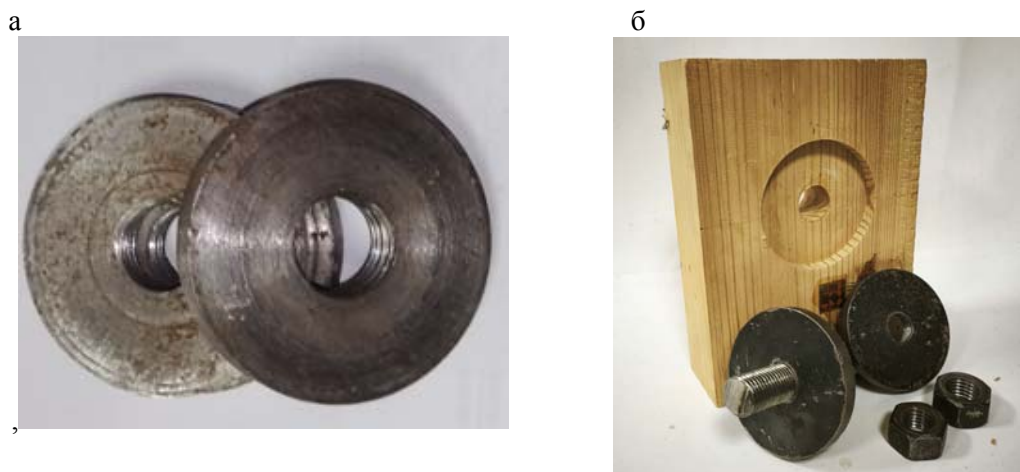


Рис. 1. Соединение на шайбах с внутренней резьбой:

а – общий вид шайб; б – составляющие образца с шайбами и простейший образец из дерева



Рис. 2. Соединение на шайбах с внутренней резьбой в сборе

Практическая применимость металлических и композитных шайб подтверждена на основе натурных испытаний образцов [6-9]. Схема испытаний и общий вид образцов показаны на рис. 3.

Образцы испытывались на сжатие с равномерной нагрузкой до полного разрушения. В процессе испытаний фиксировались величины нагрузок и деформации образцов.

На основе натурных испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки установлена следующая несущая способность пар шайб с внутренней резьбой (далее ШР) [9]:

- ШР-60-6 – 67,65 кН;
- ШР-60-10 – 78,12 кН;
- ШР-100-6 – 78,4 кН;
- ШР-100-10 – 101,14 кН.



Рис. 3. Испытания образцов с применением шайб с внутренней резьбой

Далее рассмотрим расчетную схему с несущими деревянными конструкциями двухшарнирной арки пролетом 30 м и выполним монтажные узлы отправочных марок с применением ШР.

Геометрия конструктивной системы представлена аркой параболического очертания с пролетом 30 м и высотой подъема 8 м. Арка выполнена из клееной древесины сечением: высота 1,0 м и ширина 0,15 м. Прогоны, служащие для передачи нагрузок от кровельного покрытия к арочной конструкции, изготовлены из клееного бруса с прямоугольным сечением размером 0,7×0,12 м. Для обеспечения пространственной работы выполняются деревянные распорки и вантовые горизонтальные связи (рис. 4).

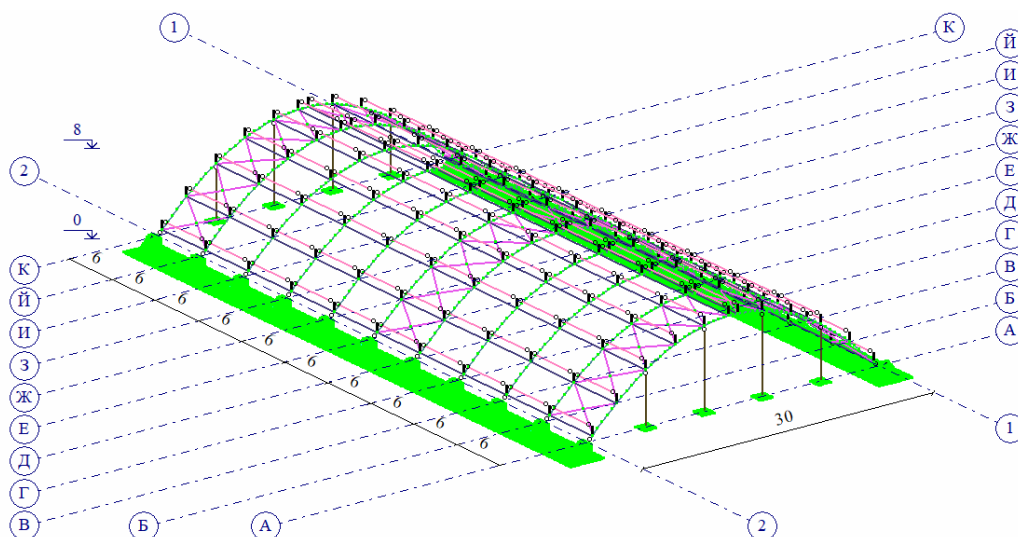


Рис. 4. Расчетная схема здания из двухшарнирных арок

Моделирование материалов конструкций арок выполнено из клееной древесины в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Нагрузки на несущие конструкции заданы в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и

СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Фундаменты выполняются из монолитного железобетона (контрфорсы, объединенные плитой) согласно СП 63.13330. 2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

Конструкция арки была поделена на три отправочных элемента (рис. 5), длиной не более 13,3 м, для возможности транспортировки до строительной площадки.

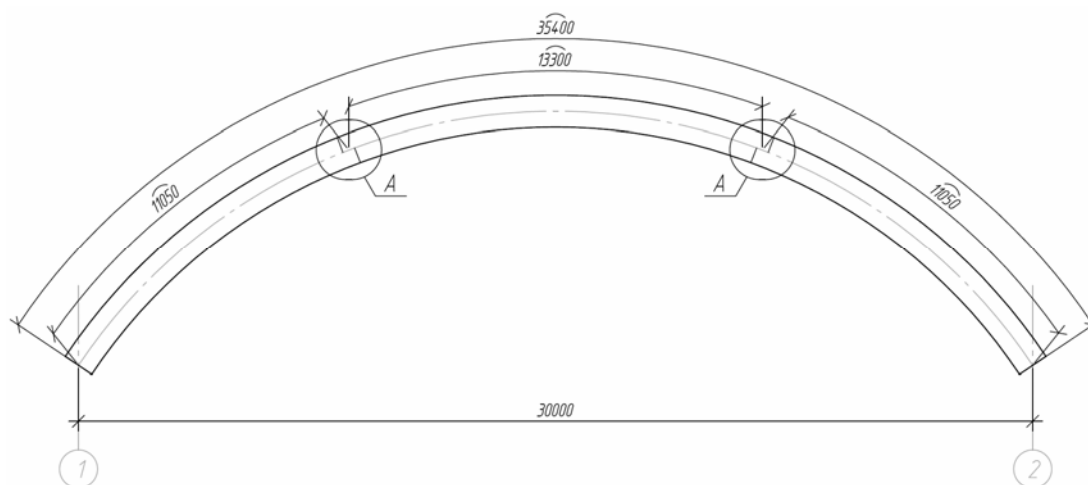


Рис. 5. Места устройства монтажных стыков отправочных элементов

Далее рассмотрим эпюры продольной силы и изгибающего момента наиболее нагруженной арки и определим максимальные значения усилий в местах монтажных стыков – $N=185,0$ кН, $M_y=215,0$ кН·м (рис. 6, 7).

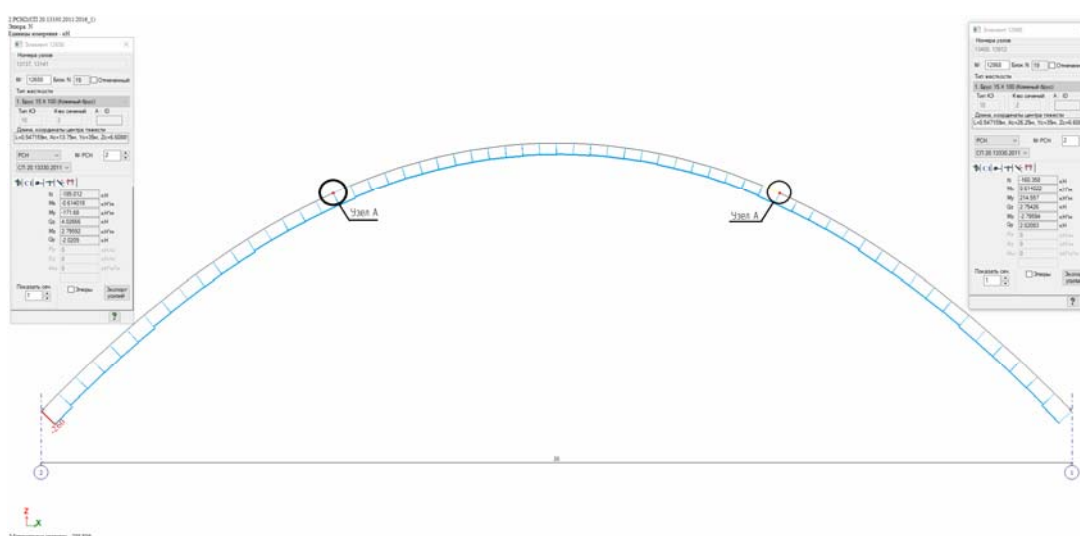


Рис. 6. Эпюры усилий продольной силы N , кН, в двухшарнирной арке по оси E

При расчете укрупнительных монтажных стыков необходимо определить максимальные сжимающие N_c и растягивающие N_p усилия как в сжато-изогнутом элементе по формулам (1) и (2):

$$N_c = -\frac{N}{2} - \frac{M}{h_0}, \quad (1)$$

$$N_p = -\frac{N}{2} + \frac{M}{h_0}, \quad (2)$$

где h_0 – плечо сил N_c и N_p .

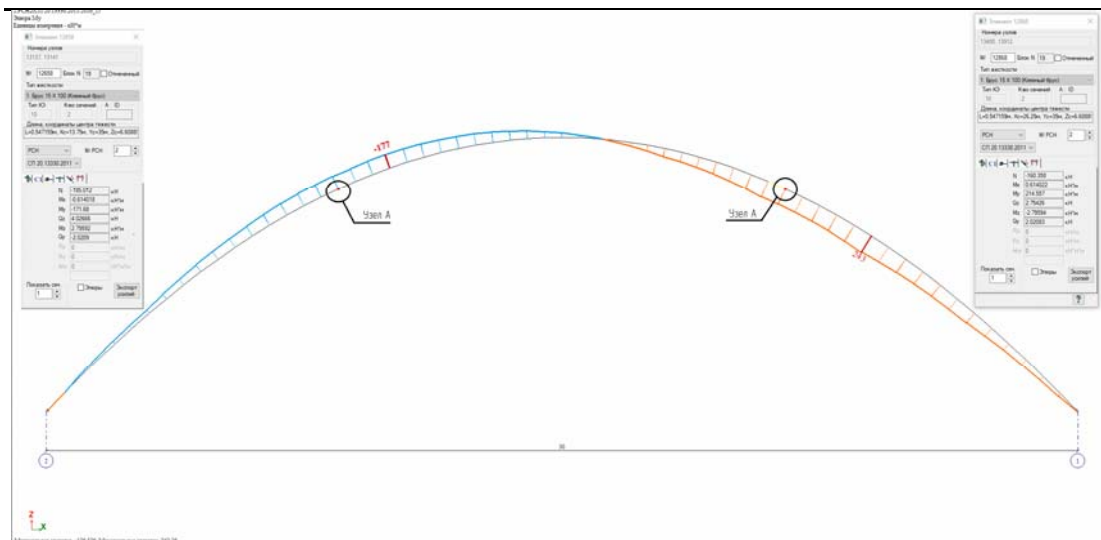


Рис. 7. Эпюры усилий изгибающего момента, кН·м, в двухшарнирной арке по оси E

На действие сил N_c и N_p подбирают необходимое количество шайб по формулам (3) и (4):

$$n_1 \geq \frac{N_c}{[T_{ш}]}, \quad (3)$$

$$n_2 \geq \frac{N_p}{[T_{ш}]}, \quad (4)$$

где $[T_{ш}]$ – несущая способность вклеенной шайбы, принимается по результатам испытаний, указанным выше [Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций], исходя из диаметра $D_{ш}$ и толщины шайбы $t_{ш}$.

Определяем максимальные сжимающие N_c и растягивающие N_p усилия:

$$N_c = -\frac{185,00}{2} - \frac{215,00}{1,0} = 307,50 \text{ кН.}$$

$$N_p = -\frac{185,00}{2} + \frac{215,00}{1} = 122,50 \text{ кН.}$$

Определяем необходимое количество шайб ШР-60-6 в обоих рядах:

$$n_1 = \frac{307,50}{67,65} = 5.$$

$$n_2 = \frac{122,50}{67,65} = 2.$$

Принимаем 3 пары шайб с внутренней резьбой в обоих рядах.

Определяем площадь накладки монтажного стыка:

$$A_1 = \frac{N_c}{R_y} = \frac{307,50}{330 \cdot 10^3} = 0,001 \text{ м}^2.$$

$$A_2 = \frac{N_p}{R_y} = \frac{122,5}{330 \cdot 10^3} = 0,0004 \text{ м}^2.$$

Принимаем накладки размером 100×1800 мм и толщиной 10 мм, в верхнем и нижнем рядах (рис. 8).

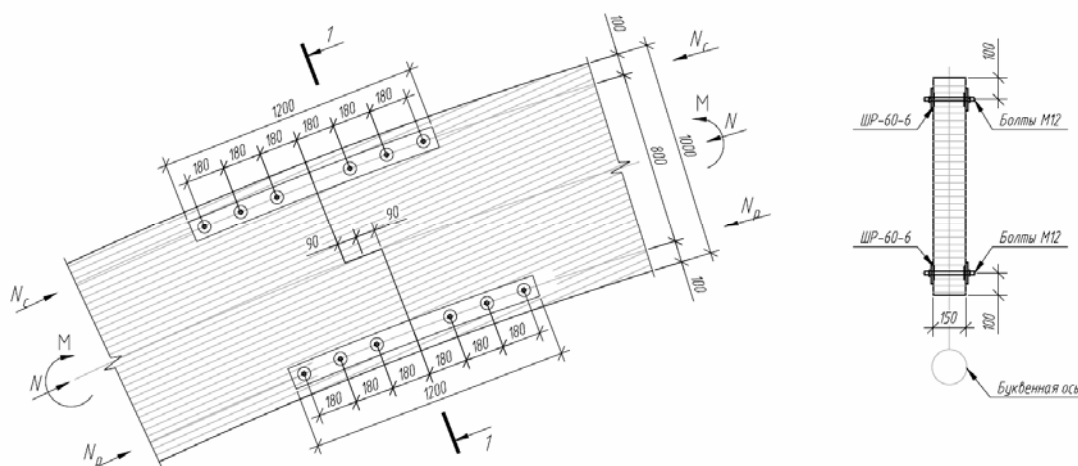


Рис. 8. Монтажный узел с применением ШР

Таким образом, на основе результатов натурных испытаний образцов с применением металлических шайб с внутренней резьбой установлена удовлетворительная несущая способность узлового соединения. В связи с чем, для соединения двух отправочных элементов клееной 2-шарнирной арки в монтажном стыке приняты металлические ШР и накладки. По результатам моделирования и расчета несущей деревянной конструкции были получены усилия, по которым были определены количество шайб и размеры металлических накладок для соединения монтажных элементов. Следует отметить, что данное соединение из клееных деревянных конструкций выполнено в сборно-разборном варианте. Это позволяет осуществлять монтаж в короткие сроки, а также производить замену отдельных отправочных элементов в случае их повреждения без необходимости демонтажа всей конструкции.

Список литературы

1. Володин, С.С. Использование деревянных конструкций в современном строительстве / С.С. Володин, Л.Р. Глухова, К.Н. Посаженникова // Научный журнал молодых ученых. – 2024. – №3(38). – С. 30–34.
2. Гаппоев, М.М. Конструкции из дерева и пластмасс / М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов, Э.В. Филимонов. – Москва : АСВ, 2004. – 440 с.
3. Калугин, А.В. Деревянные конструкции / А.В. Калугин. – Москва : АСВ, 2008. – 286 с.
4. Турковский, С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
5. Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35–50.
6. Попов, Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Е.В. Попов, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – Курск, 2015. – С. 189–198.
7. Арискин, М.В. Совершенствование клеиметаллических соединений деревянных конструкций с применением стальных шайб : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Арискин Максим Васильевич. – Пенза : ПГУАС, 2011. – 190 с.

8. Ванин, И.В. Соединение деревянных конструкций с применением вклеенных стальных шайб с внутренней резьбой / И.В. Ванин, М.В. Аришкин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2022. – №4(35). – С. 30–39.

9. Ванин, И.В. Применение резьбовых шайб в соединениях деревянных конструкций / И.В. Ванин, М.В. Аришкин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – №2(41). – С. 29–39.

References

1. Volodin, S.S. The use of wooden structures in modern construction / S.S. Volodin, L.R. Glukhova, K.N. Posazhennikova // Scientific Journal of Young Scientists. – 2024. – №3(38). – P. 30–34.

2. Gappoev, M.M. Constructions from wood and plastics / M.M. Gappoev, I.M. Guskov, L.K. Ermolenko, V.I. Linkov, E.T. Serova, B.A. Stepanov, E.V. Filimonov. – Moscow : ASV Publishing House, 2004. – P 440.

3. Kalugin, A.V. Wooden constructions / A.V. Kalugin. – Moscow : ASV Publishing House, 2008. – P. 286.

4. Turkovsky, S.B. Glued wooden structures with joints on glued rods in modern construction (System of TsNIISK) / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. – Moscow : RIF «Building Materials», 2013. – 308 p.

5. Rimshin, V.I. Connections of elements of wooden structures on dowels and washers / V.I. Rimshin, B.V. Labudin, V.I. Melekhov [et al.] // MSUCE Bulletin. – 2016. – No 9. – P. 35–50.

6. Popov, E.V. Testing for shear of elements of wooden structures connected using toothed washers «Bulldog» / E.V. Popov, B.V. Labudin, V.I. Melekhov // Safety of the construction industry in Russia. Problems and Solutions. – Kursk, 2015. – P. 189–198.

7. Ariskin M.V. Improvement of glue-metal connections of wooden structures using steel washers: dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.23.01/ Ariskin Maxim Vasilyevich. – Penza : PGUAS, 2011. – 190 p.

8. Vanin, I.V. Connection of wooden structures using glued steel washers with internal thread / I.V. Vanin, M.V. Ariskin // Bulletin of the Scientific Research Center «Construction». – 2022. – №4(35). – P. 30–39.

9. Vanin, I.V. The use of threaded washers in joints of wooden structures / I.V. Vanin, M.V. Ariskin // Bulletin of SIC «Construction». – 2024. – №2(41). – P. 29–39.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Шитова Инна Юрьевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии строительных материалов
и деревообработки»
E-mail: Innalife1@rambler.ru

Теплова Виктория Романовна,
студент

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Shitova Inna Yurievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the
department «Technologies of Building Materials
and Woodworking»
E-mail: Innalife1@rambler.ru

Teplova Victoria Romanovna,
Student

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ ЛЬНЯНЫМ МАСЛОМ НА ЕЁ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

И.Ю. Шитова, В.Р. Теплова

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей значений средней плотности, водопоглощения, прочности при сжатии и формостабильности от продолжительности экспозиции образцов древесины в горячем растительном масле. Опытным путем подтверждено, что пропитка горячим льняным маслом приводит к значительному улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств древесины.

Ключевые слова: пропитка, растительное масло, средняя плотность, водопоглощение, прочность при сжатии, формостабильность

STUDYING THE EFFECT OF THE DURATION OF WOOD IMPREGNATION WITH LINSEED OIL ON ITS PHYSICAL, MECHANICAL, AND OPERATIONAL PROPERTIES

I.Yu. Shitova, V.R. Teplova

The article presents the results of experimental studies of the dependence of the average density, water absorption, compressive strength, and shape stability on the duration of exposure of wood samples to hot vegetable oil. It has been experimentally confirmed that impregnation with hot linseed oil significantly improves the physical, mechanical, and operational properties of wood.

Keywords: impregnation, vegetable oil, average density, water absorption, compressive strength, and form stability

В последнее время все больше возрастает интерес к экологически чистым и безопасным для здоровья методам обработки древесины, которая, как известно, обладает набором уникальных свойств, однако ее применение ограничивается уязвимостью к различным внешним факторам (климатическим, биологическим). Одним из таких методов, который не только улучшает эксплуатационные характеристики древесины, но и минимизирует негативное воздействие на окружающую среду, является пропитка растительными маслами.

Существует несколько способов пропитки древесины маслами, в частности, погружение, напыление и инъекция. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, например, погружение позволяет равномерно пропитать древесину,

однако требует значительных затрат времени; напыление и инъекция обеспечивают более быстрое нанесение, но могут быть менее эффективными для глубокого проникновения масла.

Применяемые для пропитки древесины растительные масла (льняное, тунговое и соевое) имеют следующие преимущества:

1. Экологичность. Все растительные масла получают из природного сырья, что делает их безопасными для здоровья человека и окружающей среды.

2. Надежная защита от действия влаги. Под действием капиллярных сил масла проникают в поры древесины, заполняют их, а в результате процесса полимеризации масла на ее поверхности образуется твердая и водоотталкивающая защитная пленка, препятствующая дальнейшему впитыванию влаги и загрязняющих веществ.

3. Устойчивость к биологическим факторам. Например, тунговое и льняное масла содержат природные антисептики, подавляющие рост грибков и плесени. Эти соединения проникают в древесину и помогают предотвратить биологическое разрушение, что особенно важно для древесины, используемой в условиях повышенной влажности или на открытом воздухе.

4. Устойчивость к УФ-излучению. Льняное и тунговое масла содержат природные антиоксиданты, которые помогают предотвратить разрушение древесины под воздействием солнечных лучей, что особенно важно для древесины, используемой для наружных работ и подверженной выгоранию и изменению цвета.

5. Улучшение эстетических свойств. Масла подчеркивают текстуру и цвет древесины, придавая ей более глубокий и насыщенный оттенок. Это является важным аспектом для дизайнерских решений, где эстетика играет ключевую роль.

Несмотря на преимущества, у пропитки растительными маслами есть и свои недостатки, к которым относят:

1. Время высыхания. Большинство масел требует длительного времени для высыхания, что может значительно затруднять процесс обработки.

2. Необходимость в регулярном обслуживании. Для поддержания защитных свойств необходимо периодическое обновление покрытия.

Экспериментальным путем исследовано влияние продолжительности обработки древесины горячим растительным маслом на ее среднюю плотность, водопоглощение, прочность и формостабильность. В качестве опытных образцов были взяты стандартные образцы древесины дуба и сосны, в качестве пропитки – льняное масло температурой 105...110 °С. Предварительно высушенные образцы древесины погружали в емкость с горячим маслом, время экспозиции составляло 20, 40 и 60 минут. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 1–4.

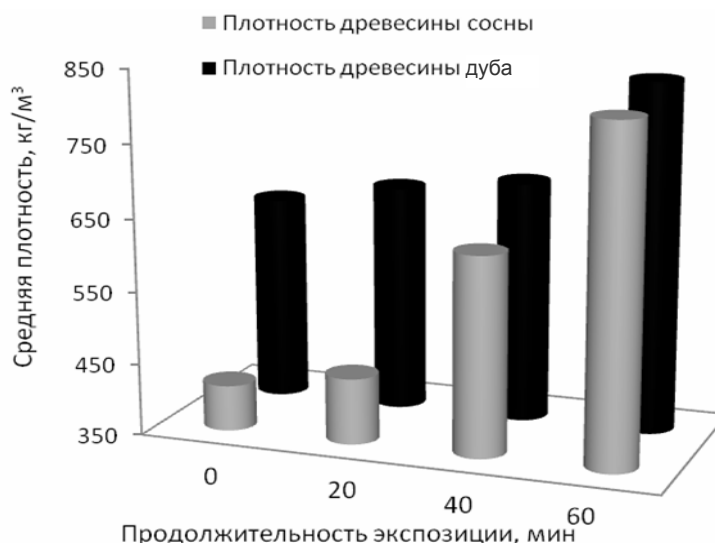


Рис. 1. Зависимость средней плотности древесины от продолжительности обработки горячим растительным маслом

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 1) показывает, что с увеличением продолжительности экспозиции образцов в масле наблюдается закономерное повышение средней плотности древесины. Так, при обработке в течение 60 минут плотность дуба повысилась более чем на 30 %, сосны – на 50 %, что можно объяснить ее большей общей пористостью. Общее поглощение льняного масла составило 130 кг/м^3 – для дуба, 180 кг/м^3 – для сосны.

Кинетика водопоглощения приведена на рис. 2. Наибольшие значения водопоглощения по массе (до 40 %) имеют необработанные образцы древесины. С увеличением продолжительности экспозиции образцов в горячем масле их водопоглощение закономерно снижается (на 35...50 %), что повышает устойчивость древесины к деформациям, вызванным процессами усушки или разбухания.

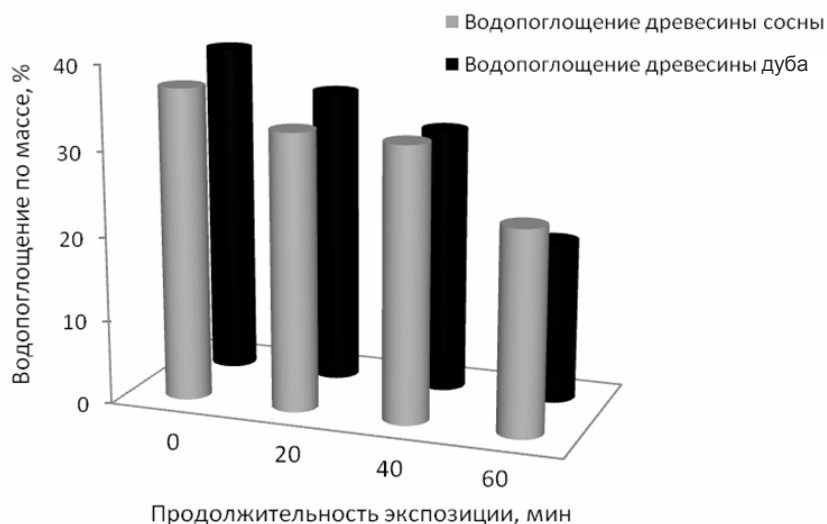


Рис. 2. Зависимость водопоглощения древесины от продолжительности обработки горячим растительным маслом

Обработка горячим маслом улучшает и механические свойства древесины, что также подтверждается опытным путем (рис. 3). Анализ рис. 3 показывает, что с увеличением продолжительности обработки горячим растительным маслом предел прочности при сжатии древесины возрастает: при обработке в течение 60 мин предел прочности древесины дуба увеличивается на 33,5 %, сосны – на 64 %.

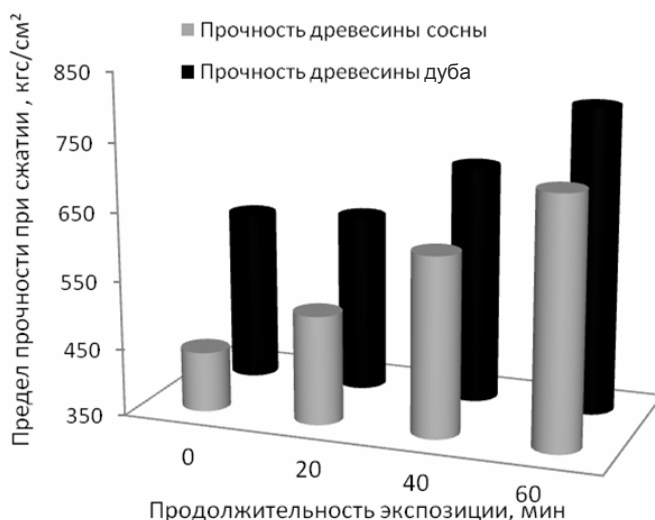


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии древесины от продолжительности обработки горячим растительным маслом

Повышение механических свойств древесины напрямую влияет на ее формостабильность под воздействием различных механических нагрузок. Горячее масло обладает более низкой вязкостью и лучшей проницаемостью, вследствие чего происходит более интенсивная пропитка древесины. Масло заполняет пустоты и поры, вытесняя воздух и, тем самым, снижает вероятность изменений в объеме древесины при колебаниях влажности.

При обработке горячим маслом наблюдается увеличение формостабильности древесины (рис. 4), которая играет ключевую роль в строительстве и производстве мебели. Так, при экспозиции образцов древесины в воде в течение двух суток отмечается снижение разбухания, по сравнению с контрольными образцами на 26 % – для дуба и 28 % – для сосны.

Анализ экспериментальных данных рис. 4 показывает, что с увеличением продолжительности обработки формостабильность образцов древесины повышается. Так, обработка дуба в течение 20 мин ведет к снижению изменения объема на 8 %, 40 мин – на 16 %, 60 мин – на 26,5 %. Обработка сосны – на 9, 26 и 27 % соответственно.

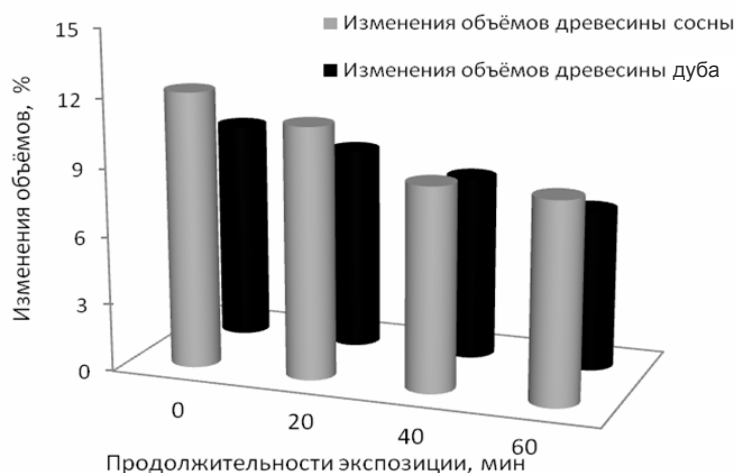


Рис. 4. Зависимость изменения объемов древесины от продолжительности обработки горячим растительным маслом

Также отметим, что пропитка горячим льняным маслом подчеркивает текстуру древесины и способствует усилению цвета, делая его более насыщенным и глубоким (рис. 5). После высыхания масла на древесине формируется тонкая пленка, которая придает материалу легкий блеск, большую выразительность и привлекательность поверхности.

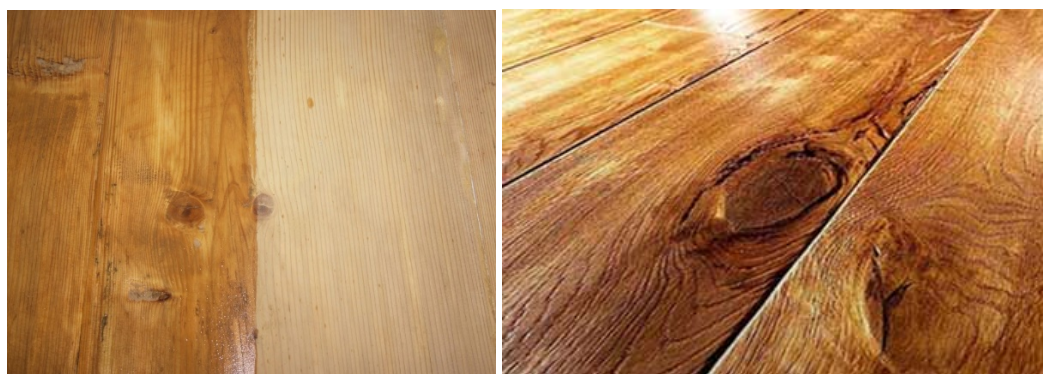


Рис. 5. Необработанная и обработанная льняным маслом древесина

Таким образом, проведенные исследования показали, что обработка древесины горячими растительными маслами является целесообразной и эффективной технологией, которая значительно улучшает защитные, механические и декоративные

характеристики древесины. Этот метод обеспечивает долговечность и надежность изделий из древесины, что делает его актуальным для широкого спектра применений, включая строительство и мебельную промышленность.

Список литературы

1. Береговой, В.А. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: практикум / В.А. Береговой, Г.Ф. Ларина. – Пенза : ПГУАС, 2011. – 92 с.
2. Королев, Е.В. Основы древесиноведения : учебное пособие / Е.В. Королев, С.А. Болтышев, И.Ю. Шитова. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 105 с.
3. Расев, А.И. Технология и оборудование защитной обработки древесины : учебник / А.И. Расев, А.А. Косарин, Л.П. Красухина ; под общ. ред. проф. А.И. Расева. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. – 171 с
4. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование : учебник для вызов / П.С. Серговский, А.И. Расев. – Москва : Лесная Промышленность, 1987. – 360 с.
5. Уголев, Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение / Б.Н. Уголев. – 3-е изд. – Москва : Академия, 2011. – 272 с.
6. Чубов, А. Маслотермомодификация древесины / А. Чубов // ЛесПромИнформ. – 2008. – №4 (53).

References

1. Beregovoy, V.A. Hydrothermal treatment and preservation of wood : a practical guide / V.A. Beregovoy, G.F. Larina. – Penza : PGUAS, 2011. – 92 p.
2. Korolev, E.V. Fundamentals of tree science : a textbook / E.V. Korolev, S.A. Boltyshev, I.Y. Shitova. – Penza : PGUAS, 2009. – 105 p.
3. Rasev, A.I. Technology and equipment of protective wood processing : textbook / A.I. Rasev, A.A. Kosarin, L.P. Krasukhina ; under the general editorship of prof. A.I. Rasev. – Moscow : State Educational Institution of Higher Professional Education MGUL, 2010. – 171 p.
4. Sergovsky, P.S. Hydrothermal treatment and preservation : A textbook for children / P.S. Sergovsky, A.I. Rasev. – Moscow : Lesnaya Promyshl, 1987. – 360 p.
5. Ugolev, B.N. Wood science and forest commodity science / B.N. Ugolev. – 3rd ed. – Moscow : Academy, 2011. – 272 p.
6. Chubov, A. Oil and thermal modification of wood / A. Chubov // LesPromInform. – 2008. – №4 (53).