

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 1(20)/2025

Содержание

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА..... 3

**Береговой В.А., Присевка А.С.,
Семилетков А.В.**
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО
ЗАВИСИМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
МЕТАБЕТОНОВ..... 3

Шитова И.Ю., Вернер П.В.
ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ И ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
СЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ИЗМЕЛЬЧЕННОМ КВАРЦЕВОМ
НАПОЛНИТЕЛЕ ЗА СЧЕТ
АППРЕТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ 10

**Коровкин М.О., Ерошкина Н.А.,
Шестернин А.И., Шульте И.С.**
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО
ЗАПОЛНИТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО
ДРОБЛЕНИЕМ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ 18

**Лавров И.Ю., Чекранова А.В.,
Бортунова В.И.**
ВЛИЯНИЕ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ
НА УСАДКУ И ДИНАМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО
БЕТОНА..... 24

**Лавров И.Ю., Семилетков А.В.,
Сидорин С.П.**
ДЕФОРМАТИВНЫЕ И ДЕМПФИРУЮЩИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ЭПОКСИДНОГО
ПОЛИМЕРБЕТОНА 29

**Гарькин И.Н., Гарькина И.А.,
Кудишина А.Э.**
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ
РАСЧЕТА ВИБРОЭКРАНОВ
С УЧЕТОМ МНОГОСЛОЙНОСТИ ОСНОВАНИЯ
И МНОЖЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ВИБРАЦИИ..... 34

**Мартышкин Д.О., Залилов И.В.,
Колесников Н.В., Меркушов А.В.**
ПРИМЕНЕНИЕ ШАЙБ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СОЕДИНЕНИЯХ
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ 39

Contents

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE ...3

**Beregovoy V.A., Prisevka A.S.,
Semiletkov A.V.**
FORMATION OF STRUCTURALLY
DEPENDENT INDICATORS OF
METABETONES 3

Shitova I.Yu., Werner P.V.
IMPROVING THE PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES AND
CHEMICAL RESISTANCE OF SULFUR
COMPOSITE MATERIALS ON CRUSHED
QUARTZ FILLER BY SURFACE
FINISHING 10

**Korovkin M.O., Eroshkina N.A.,
Shesternin A.I., Schulte I.S.**
INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF
SECONDARY AGGREGATE PRODUCED BY
CRUSHING PAVING SLABS..... 18

**Lavrov I.Yu., Chekranova A.V.,
Bortunova V.I.**
EFFECT OF AUTOCLAVE CURING ON
SHRINKAGE AND DYNAMIC PROPERTIES
OF STRUCTURAL CONCRETE 24

**Lavrov I.Yu., Semiletkov A.V.,
Sidorin S.P.**
DEFORMATIONAL AND DAMPING
CHARACTERISTICS OF EPOXY POLYMER
CONCRETE 29

**Garkin I.N., Garkina I.A.,
Kudishina A.E.**
IMPROVEMENT OF THE METHOD OF
CALCULATION OF VIBRATION SCREENS
TAKING INTO ACCOUNT THE
MULTILAYERNESS OF THE BASE AND
MULTIPLE SOURCES OF VIBRATION..... 34

**Martyshkin D.O., Zalilov I.V.,
Kolesnikov N.V., Merkushov A.V.**
THE USE OF WASHERS MADE OF
VARIOUS MATERIALS IN JOINTS OF
WOODEN STRUCTURES 39

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

УДК 691.32

*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»

Присевка Александр Сергеевич,
аспирант

E-mail: techbeton@pguas.ru

Семилетков Александр Викторович,
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

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

Prisevka Aleksandr Sergeevich,
Postgraduate

E-mail: techbeton@pguas.ru

Semiletkov Aleksander Viktorovich,
Student

E-mail: techbeton@pguas.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО ЗАВИСИМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАБЕТОНОВ

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

Дан анализ исследований в области технологии получения метабетонов. Приведены результаты исследования влияния добавок различного вида на формирование вибродинамических показателей и способности самовосстановления бетонов при наличии эксплуатационных повреждений. В качестве дополнительных компонентов, формирующих расширенный функционал метабетона, использованы вещества на основе сульфоалюминатов кальция, металлические заполнители-демпферы и биодобавки на основе микроорганизма *Bacillus cereus*.

Ключевые слова: биодобавки, заполнители-демпферы, расширяющиеся компоненты, восстановление микроструктуры, вибродинамические показатели, метабетон

FORMATION OF STRUCTURALLY DEPENDENT INDICATORS OF METABETONES

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

An analysis of research in the field of technology for the production of metabetones is given. The results of the influence of additives of various types on the formation of vibro-dynamic parameters and the ability of self-healing of concrete in the presence of operational damage are presented. Substances based on calcium sulfoaluminates, metal filler dampers, and dietary supplements based on the bacterium *Bacillus cereus* were used as additional components forming the extended functionality of the metabeton.

Keywords: bioadditives, filler dampers, expanding components, microstructure restoration, vibrodynamic parameters, metabeton

Введение

В настоящее время активно разрабатывается технологическая концепция метабетон – «умных» цементных композитов с нетипичным сочетанием показателей, недостижимым для традиционных бетонов [1, 2]. Наиболее весомые практические результаты достигнуты применительно к метаматериалам со структурно зависимыми механическими показателями. Они приобретают свои свойства в результате структурной оптимизации и введения в базовый состав компонентов, способных целенаправленно изменять показатели материала в результате реакции строительной конструкции на внешние триггеры (влажность, температура, давление, электрические и магнитные поля, свет, кислотность и др.) [2, 3].

Значительная часть современных работ в области метаматериалов сосредоточена на создании новой архитектуры структурных уровней с целью достижения требуемого сочетания механических показателей. Вместе с тем проводятся исследования по приданию метабетонам абсолютно новых функций, востребованных в технологиях интеллектуальных материалов и конструкций. Современное состояние техники и технологии позволяет выделить в качестве перспективных фотокаталитические, самовосстанавливающиеся и пьезоэлектрические виды метабетон.

В патенте [4] приведен пример пьезоэлектрического интеллектуального бетона, генерирующего электрическое напряжение при приложении механической нагрузки, достаточное для обеспечения работы автономных датчиков распределенного мониторинга состояния конструкций. Максимальная упругая деформация системы достигает 15 %, что позволяет вырабатывать при циклическом нагружении ток мощностью 330 мВт.

Объектом исследований, проведенных в ПГУАС [5, 6], являлись условия, механизмы активации и границы применимости биотехнологического подхода в рамках получения «умных» бетонов, работающих в условиях циклического нагружения. Полученные результаты позволили придать цементному бетону функцию самовосстановления, реализуемую посредством биоцементации, т.е. способности биоминеральных систем регенерировать поврежденную микроструктуру при участии добавок на основе алкилофильных бактерий или их субстратов. С этой целью успешно апробированы биодобавки, содержащие микроорганизм *Bacillus cereus*, синтезирующий в активированном состоянии вяжущее вещество на основе коллоидального кальцита. В случае нарушения защитного слоя эксплуатируемого материала биодобавка обеспечивает «залечивание» вновь образованных дефектов. Для усиления эффекта предложено совместное введение биосубстрата и гидравлической добавки, вырабатываемой из природного микропористого кремнезема. Это облегчает протекание конструктивных биоминералогических процессов за счет наличия свободного внутреннего объема в природной структуре кремнистой породы, образованной скоплением скелетов морских одноклеточных организмов. В результате биоцементации синтезируется коллоидальный кальцит, который накапливается и уплотняется, заполняя эксплуатационные дефекты. Параллельно протекает процесс непосредственного взаимодействия ионов Ca^{2+} и анионноактивных $\text{Si}(\text{OH})$ -групп на гидратированной поверхности аморфного кремнезема, что сопровождается образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, включая их ленточные типы, например ксонотлит ($\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH}_2)$), с эффектом армирования цементного камня.

В рамках решения второй задачи – разработки метабетон с регулируемыми вибродинамическими показателями для конструкций, работающих в условиях циклического нагружения, – учеными ПГУАС был применен традиционный подход [7]. Исследования были направлены на установление механизма взаимодействия элементов различных структурных уровней бетона, формирующего дополнительный диссипативный эффект.

Влияние структуры бетона на его работу при динамическом нагружении изучалось многими авторами с применением различных моделей. Общеизвестно, что упругие свойства цементного конгломерата характеризуются динамическим модулем упругости, а разрыв по растворной части является наиболее вероятной причиной

разрушения бетона при ударном воздействии [8]. Это обуславливает существенную зависимость показателя ударной прочности от поглощающей способности крупного заполнителя. Результаты опубликованных исследований структурно зависимых свойств позволили выделить оптимальные пути структурной оптимизации метабетонов по их стойкости к циклическим нагрузкам:

1. Снижение общей жесткости системы путем замены высокомодульных заполнителей на более сжимаемые.
2. Повышение прочности контактной зоны заполнителя и цементного камня за счет шероховатости поверхности или применения пористых заполнителей.
3. Понижение содержания заполнителей за счет их раздвижки цементной матрицей.

Наиболее оптимальным представляется последнее предложение, являющееся переходом от традиционных рецептур к составам, характерным для высокофункциональных бетонов с высоким содержанием матричной части.

Известно, что резонансная вибрация конструкций относится к наиболее опасным случаям, которые необходимо избегать на этапе проектирования и эксплуатации. В статье [7] рассматривается материаловедческий подход к решению данной задачи. Для этого в состав метабетона вводили специально разработанные демпфирующие агрегаты, эффективно подавляющие резонансную вибрацию. В этом качестве использовали заполнители-демпферы, состоящие из металлического сердечника и слоя силикона (рис. 1).

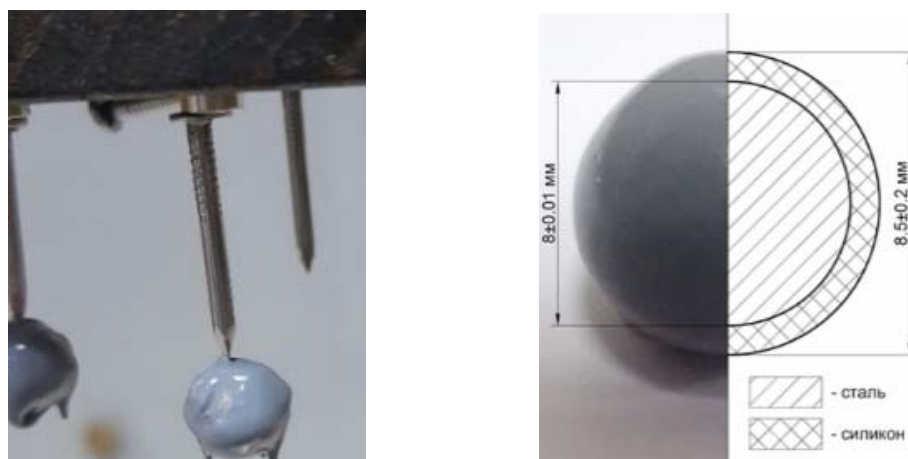


Рис. 1. Процесс изготовления и схема заполнителей-демпферов

Экспериментальные кривые частотной характеристики моделей показали изменение пиков отклика и подтвердили способность включений заполнителей-демпферов подавлять резонансную вибрацию.

Изменение соотношений между элементами позволяет в широком диапазоне влиять на свойства цементной матрицы. Цементный камень является минеральной основой многочисленной группы строительных материалов с жестко-структурированными внутренними связями, в которых поглощение вибрационной нагрузки реализуется при макроскопическом проскальзывании контактирующих поверхностей. Под воздействием вибрации в гетерогенном материале возникают упругие волны различной частоты, а их распространение по объему осложняется процессами деструктивной интерференции, когда они, перекрываясь не по фазе, генерируют результирующую с меньшей амплитудой, в результате демпфирующая способность системы возрастает.

Исходя из представлений о механизме формирования диссипативных показателей цементного камня, их повышение может быть достигнуто подбором рецептурно-технологических факторов, способствующих созданию новообразований, заметно различающихся по параметрам геометрии и плотности.

Минеральную основу цементного камня составляют гидросиликатный гель (50-60 %), портландит и его гомологи (20-25 %), а также гидросульфоалюминаты кальция (15-20 %). Слабо закристаллизованные гидросиликаты выполняют функцию основного связующего вещества, цементирующего негидратированные ядра клинкера и сравнительно крупные кристаллы гидратов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (15...25 мкм) и этtringита (5...80 мкм). В рамках изучения процесса формирования демпфирующих свойств наличие механически более податливой объединяющей фазы в виде гидросиликатного геля (C-S-H) с вкраплением более крупных минеральных образований позволяет рассматривать такую систему в качестве инерциального демпфера (рис. 2).

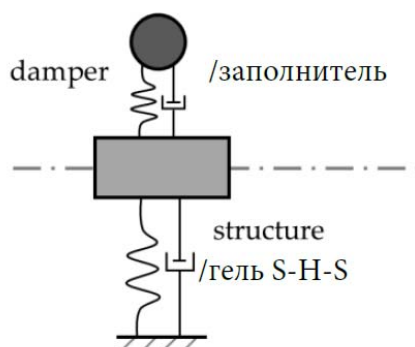


Рис. 2. Схема работы инерциального демпфера в структуре цементного камня

Согласно современным представлениям, минимальные размеры устойчивых структурных элементов твердой фазы гидросиликатного геля ограничены диапазоном 4-6 нм [9]. При этом выделяют 2 типа геля (C-S-H) – высокой плотности и низкой плотности, – которые относят к внутреннему и внешнему продуктам гидратации соответственно.

Влияние минерально-фазового состава цементного камня на вибродинамические показатели бетонов исследовалось на примере относительного содержания минеральной фазы этtringита. Активаторами данного процесса являлись сульфатосодержащие компоненты (САК) в виде промышленных добавок (Denka CSA20, CSA Expansive agent II) [10].

Влияние САК, микрокремнезема (МК) и карбоксилатного пластификатора (Melflux 1641F) на минерально-фазовый состав цементного камня исследовалось в ряде работ [11]. Установлены следующие морфологические особенности новообразований (рис. 3):

- без МК портландит синтезируется в крупнокристаллической форме, а этtringит в микропорах распределен беспорядочно;
- добавка МК способствует укрупнению гидроалюминатов кальция, подавляя рост этtringита;
- добавка САК формирует геометрически развитые столбчатые и нитевидные кристаллы этtringита.

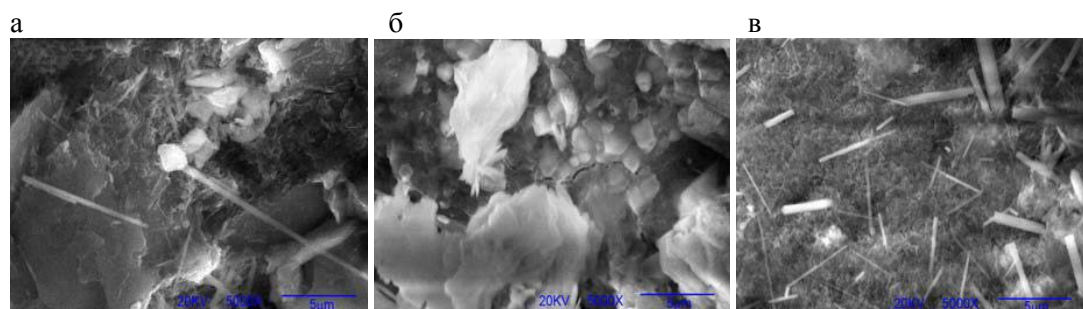


Рис. 3. Влияние добавок на микроструктуру цементного камня [11]:

а – контрольный (без добавок); б – МК; в – САК

Результаты опубликованных исследований влияния карбоксилатных пластификаторов на формирование этtringитовой фазы указывают также на интенсификацию данного процесса. При этом наблюдалось образование вытянутых призматических кристаллов до 5 мкм и активное заполнение порового пространства.

В ходе исследований сравнение эффективности САК производили на образцах цементного камня при их дозировке 10 %. Рентгенофазовый анализ (РФА) свидетельствует (рис. 4), что Denka CSA20 оказывает максимальное влияние на количество новообразованного этtringита. На это указывают интенсивные пики на дифрактограмме, соответствующие межплоскостным расстояниям кристаллической решётки этtringита.

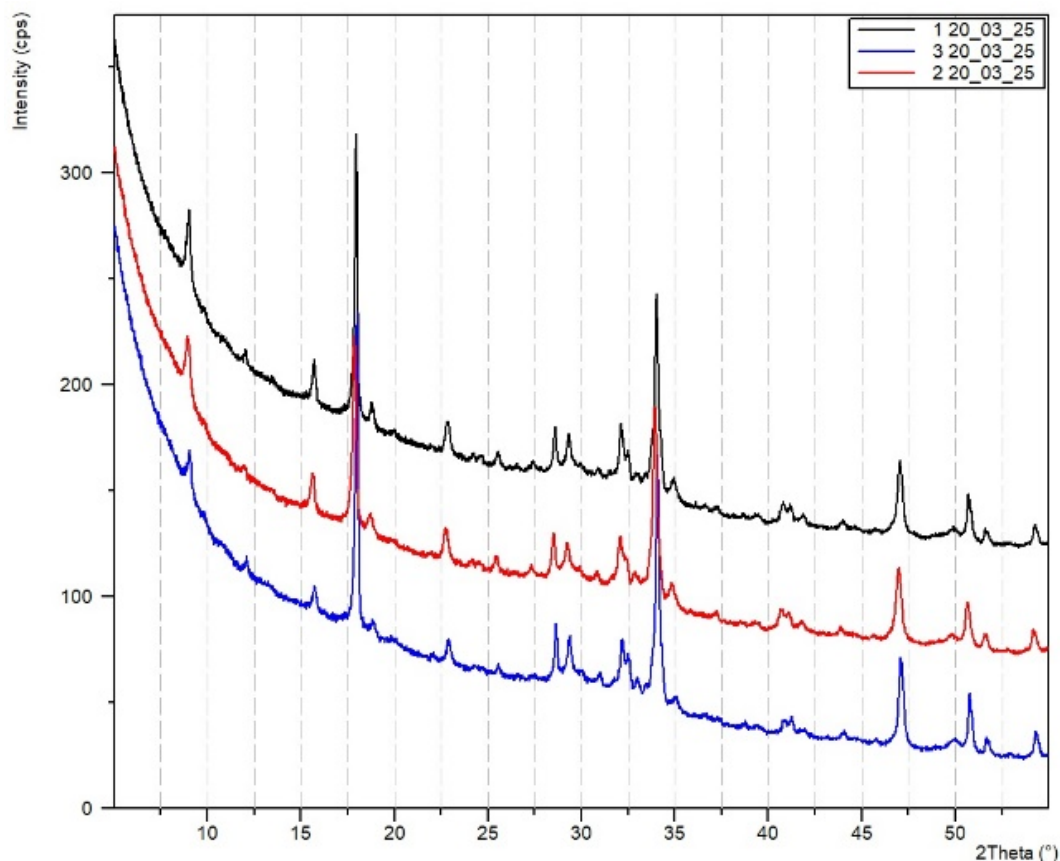


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа:
1 – Denka CSA20; 2 – CSA Expansive Agent II; 3 – контрольный состав

Лабораторные испытания образцов показали рост логарифмического декремента затухания метабетона на 4,3-17,4 % при увеличении содержания сульфоалюминатной расширяющейся добавки в пределах от 5 до 15 %, что связано с изменением архитектуры микроструктуры цементной матрицы.

Выводы

Добавки микрокремнезема и пластификатора существенно влияют на минерально-фазовый состав и морфологию гидратных новообразований, что позволяет регулировать вибродинамические показатели бетонов, приближая их к метабетонам.

«Умные» материалы и конструкции, в том числе с функцией самовосстановления, целесообразно применять при возведении путепроводов, строительстве зданий и специальных сооружений. Использование материалов с расширенными функциями эффективно для улучшения их технологичности и эксплуатационных характеристик, таких, как повышенная долговечность и структурная целостность.

Список литературы

1. Ansari, M. Experimental Validation of Dynamic Response of Small-Scale Metaconcrete Beams at Resonance Vibration / M. Ansari, F. Tartaglione, C. Koenke // *Materials*. – 2023. – 16. – 5029. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma16145029>
2. Barri K, Zhang, Q. Multifunctional Nanogenerator-Integrated Metamaterial Concrete Systems for Smart Civil Infrastructure / K Barri, Q. Zhang, J. Kline, W. Lu, J. Luo, Z. Sun, B.E. Taylor, S.G. Sachs, L. Khazanovich, Z.L. Wang, A.H. Alavi. – DOI: 10.1002/adma.202211027 // *Adv Mater*. – 2023. – Apr; 35(14).
3. R. Liu, C. Ji, Z. Zhao, T. Zhou, *Engineering* 2015, 1, 179. H. Yang, L. Ma, *Mater. Des.* 2018, 152, 181.
4. Patent US 2022/0011176 A1. Self-aware composite mechanical metamaterials and method for making same. Publication Jan. 13, 2022 / Amirhossein Alavi, Kaveh Barri.
5. Патент № 2773751 C1 Российская Федерация. Биодобавка для строительных растворов и мелкозернистых бетонов: опубл. 10.06.2022 / В.А. Береговой, А.Е. Капустин, С. А. Болдырев [и др.].
6. Beregovoy, V.A. Use of bacterial carbonatogenesis to increase the strength of cement solutions with the help of microorganisms / V.A. Beregovoy, A.E. Kapustin, A.M. Beregovoy // *Key Engineering Materials*. – 2021. – Vol. 887 KEM. – P. 440–445.
7. Береговой, В.А. Микроструктура и демпфирующие показатели мелкозернистого бетона / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А. Е. Капустин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2025. – № 2(63). – С. 60–67.
8. Баженов, Ю.М. Высококачественный тонкозернистый бетон / Ю.М. Баженов // *Строительные материалы*. – 2000. – № 2. – С. 24–25.
9. Tennis, P.D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P.D. Tennis, H.M. Jennings // *Cement and Concrete Research*, 2000. – Vol. 30. – P. 855–863.
10. Denka Company Limited // Denka CSA-20 : [сайт]. – 2016. – URL: <http://www.denka.co.jp> / (дата обращения 1.12.2024).
11. Еленова, А.А. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня / А.А. Еленова, Ю.Р. Кривобородов // *Успехи в химии и химической технологии : сборник научных трудов*. – Москва : ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2016. – Т. XXX, № 7 (176). – 36–39 с.

References

1. Ansari, M. Experimental Validation of Dynamic Response of Small-Scale Metaconcrete Beams at Resonance Vibration / M. Ansari, F. Tartaglione, C. Koenke // *Materials*. – 2023. – 16. – 5029. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma16145029>
2. Barri K, Zhang, Q. Multifunctional Nanogenerator-Integrated Metamaterial Concrete Systems for Smart Civil Infrastructure / K Barri, Q. Zhang, J. Kline, W. Lu, J. Luo, Z. Sun, B.E. Taylor, S.G. Sachs, L. Khazanovich, Z.L. Wang, A.H. Alavi. – DOI: 10.1002/adma.202211027 // *Adv Mater*. – 2023. – Apr; 35(14)
3. R. Liu, C. Ji, Z. Zhao, T. Zhou, *Engineering* 2015, 1, 179. H. Yang, L. Ma, *Mater. Des.* 2018, 152, 181.
4. Patent US 2022/0011176 A1. Self-aware composite mechanical metamaterials and method for making same. Publication Jan. 13, 2022 / Amirhossein Alavi, Kaveh Barri.
5. Patent No. 2773751 C1 RF, Bioadditive for building mortars and fine-grained concrete: publ. 10.06.2022 / V. A. Beregovoy, A. E. Kapustin, S. A. Boldyrev [et al.]
6. Beregovoy, V.A. Use of bacterial carbonatogenesis to increase the strength of cement solutions with the help of microorganisms / V.A. Beregovoy, A.E. Kapustin, A.M. Beregovoy // *Key Engineering Materials*. – 2021. – Vol. 887 KEM. – P. 440–445.
7. Beregovoy, V.A. Microstructure and damping properties of fine-grained concrete / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, A.E. Kapustin // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – No. 2(63). – P. 60–67.

-
8. Bazhenov, Yu.M. High-quality fine-grained concrete / Yu.M. Bazhenov // Construction materials. – 2000. – No. 2. – P. 24–25.
 9. Tennis, P.D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P.D.Tennis , H.M. Jennings // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30. – P. 855–863.
 10. Denka Company Limited // Denka CSA-20 : [website]. – 2016. – URL: <http://www.denka.co.jp/> (date of access 1.12.2024).
 11. Yelenova, A.A. Effect of hydrodynamically activated crystal hydrate additive on hydration and hardening of cement stone / A. A. Yelenova, Yu. R. Krivoborodov// Advances in chemistry and chemical technology : collection of scientific papers. – Moscow : RKHTU named D. I. Mendeleyeva, 2016. – Vol. XXX, № 7 (176). – P. 36–39.

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

Вернер Полина Витальевна,
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

Werner Polina Vitalievna,
Student

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ СЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗМЕЛЬЧЕННОМ КВАРЦЕВОМ НАПОЛНИТЕЛЕ ЗА СЧЕТ АППРЕТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

И.Ю. Шитова, П.В. Вернер

Предложен метод аппретирования поверхности дисперсной фазы жидким каучуком, предназначенный для предотвращения образования водорастворимых сульфидов кремния как результата реакции серного вяжущего с измельченным кварцем при температуре изготовления материала. Представлена структурная модель, изучены основные физико-механические свойства, рассчитаны коэффициенты водо- и химической стойкости в различных агрессивных средах серных композитов на аппретированном наполнителе.

Ключевые слова: серное вяжущее, композит, кварцевый наполнитель, агрессивная среда, аппретирование, вулканизат, термическая выдержка, плотность, прочность.

IMPROVING THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND CHEMICAL RESISTANCE OF SULFUR COMPOSITE MATERIALS ON CRUSHED QUARTZ FILLER BY SURFACE FINISHING

I.Yu. Shitova, P.V. Werner

A method of finishing the surface of the dispersed phase with liquid rubber is proposed, to prevent the formation of water-soluble silicon sulfides as a result of the reaction of the sulfur binder with crushed quartz at the temperature of material production. A structural model is presented, the main physical and mechanical properties are studied, and the coefficients of water and chemical resistance in various aggressive environments of sulfur composites on a finished filler of optimal compositions are calculated.

Keywords: sulfur binder, composite, quartz filler, aggressive environment, finishing, vulcanizate, thermal soak, density, strength.

Актуальной проблемой строительного материаловедения является повышение срока эксплуатации и долговечности строительных материалов, изделий и конструкций, работающих в условиях воздействия химически активных сред. В частности, на предприятиях химической, металлургической и стекольной промышленности для

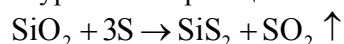
защиты от агрессивного действия кислот и солей применяют материалы на основе серного связующего [1, 2].

Технология получения стойкого композита на основе серы предполагает использование химически стойких сырьевых материалов. Кроме того, высокой стойкостью к действию агрессивных сред должны обладать и соединения, образующиеся на границе раздела фаз «вяжущее – наполнитель».

Сера относится к химически инертному веществу, однако при температурах $T=160-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ она способна вступать в химические реакции с большинством минералов и входящих в их состав соединений, используемых в качестве наполнителей. В результате этих взаимодействий образуются вещества, растворимые в воде и существенно снижающие эксплуатационные характеристики материала.

Анализ механизмов реакций кислот и солей, применяемых в промышленности, с различными наполнителями показывает, что практически универсальной стойкостью обладает кварц [3].

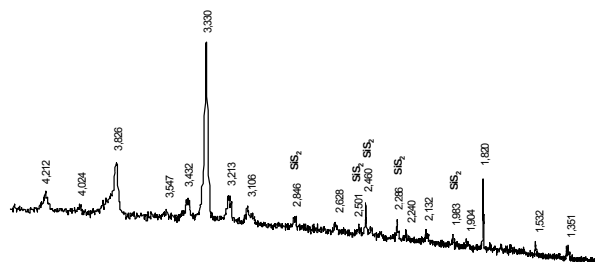
Термодинамический расчет по уравнению реакции



также показывает, что при температуре получения серных материалов ($T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$), сульфиды кремния не образуются ($\Delta G = +379,36\text{ кДж/моль}$). Однако при тонком измельчении поверхность кварца активируется, и создаются благоприятные предпосылки для образования водорастворимых сульфидов кремния, что подтверждается характерными максимумами на рентгенограмме (рис. 1, а) [4].

Для предотвращения образования сульфидов кремния использовался метод аппретирования поверхности кварца жидкими каучуками, которые в расплаве серы вулканизируются с формированием непроницаемой для серы оболочки, предотвращающей ее химическое взаимодействие с дисперсной фазой (рис. 1, б).

а



б

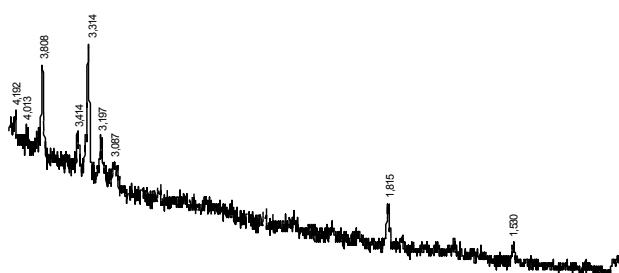


Рис. 1. Рентгенограммы серных мастик на измельченном кварцевом песке (удельная поверхность $200\text{ м}^2/\text{кг}$):
а – без аппрета; б – обработанном 20 %-м раствором аппрета (время термической выдержки – 1 ч)

Также аппретирование поверхности способствует формированию кристаллической структуры серы в наиболее благоприятных равновесных условиях, что значительно уменьшает возможность появления внутренних напряжений и подтверждается расчетом, выполненным на основе предложенной структурной модели серного композита с аппретированным наполнителем (рис. 2). Геометрические размеры компонентов модели определялись рецептурой композита (табл. 1).

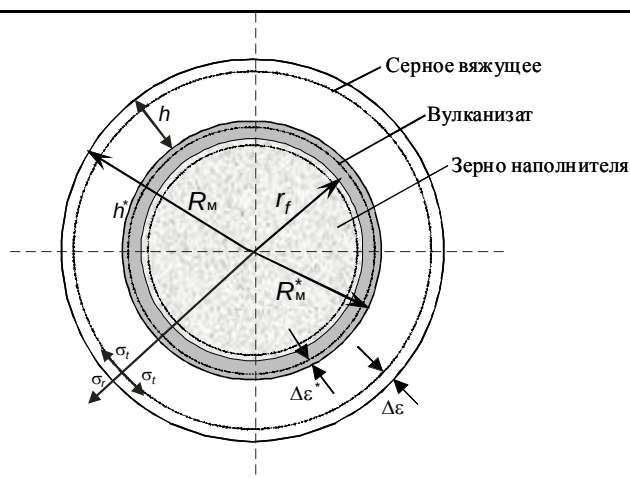


Рис. 2. Схема структурной модели серного композита на аппретированном наполнителе:
 R_M – радиус модели; R_M^* – радиус частицы наполнителя, окруженной слоем вулканизата;
 r_f – радиус частицы наполнителя; h – толщина слоя серного вяжущего; h^* – толщина слоя
 вулканизата; σ_r, σ_t – напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях;
 $\Delta \varepsilon^*$ и $\Delta \varepsilon$ – относительные деформации вулканизата и оболочки серы

Т а б л и ц а 1

Толщина слоя аппрета (наполнитель – измельченный кварцевый песок
 с удельной поверхностью $200 \text{ м}^2/\text{кг}$)

Вещество	Толщина слоя (нм) при концентрации каучука, % от массы серы		
	0,2	0,6	1,0
10 %-й раствор каучука марки Polyoil 110 в керосине	$\frac{156}{15}$	–	–
То же 30 %-й раствор	–	$\frac{154}{44}$	–
То же 50 %-й раствор	–	–	$\frac{152}{73}$

П р и м е ч а н и е . В числителе – толщина раствора, в знаменателе – толщина каучука.

Как известно, внутренние напряжения в серных композитах возникают в результате термической усадки вяжущего и уменьшения геометрических размеров зерна наполнителя, оболочки серы и аппрета при охлаждении материала в процессе его получения. Величины термической усадки вяжущего, наполнителя и аппрета различны и косвенно могут быть оценены по коэффициенту плотности (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты изменения средней плотности компонентов серных композитов
 при переходе от T_p до T_0

Компонент	Средняя плотность, кг/м ³		k_γ
	Температура, °C		
	20	160	
Сера	2070	1770	0,855
Кварцевый наполнитель	2650	2643	0,998
Аппрет – вулканизат	1200	890	0.742

П р и м е ч а н и е . k_γ – коэффициент изменения средней плотности компонентов материала при переходе от T_p до T_0 , вычисляемый по формуле $k_\gamma = \rho_i^{T=160} / \rho_i^{T=20}$.

Характерной особенностью композитов на аппретированном каучуком наполнителе является наличие дополнительно слоя – вулканизата, который в процессе изготовления материала претерпевает значительные объемные деформации (табл. 2), которые обеспечивают практически свободную усадку оболочки серы, что подтверждается расчетом, выполненным для трехкомпонентной системы «зерно наполнителя – вулканизат – серное вяжущее»: $\Delta\varepsilon' = \Delta\varepsilon^* - \Delta\varepsilon \rightarrow 0$.

Начальное формирование структуры серных материалов происходит в период его нахождения в вязкопластичном состоянии, свойства которого зависят от вида, дисперсности и количества наполнителя и добавок [1, 2], а также продолжительности изотермической выдержки, определяющей количество образующейся полимерной серы, степени превращения аппрета и свойств образующегося вулканизата – для композитов на аппретированном каучуком наполнителе (рис. 4).

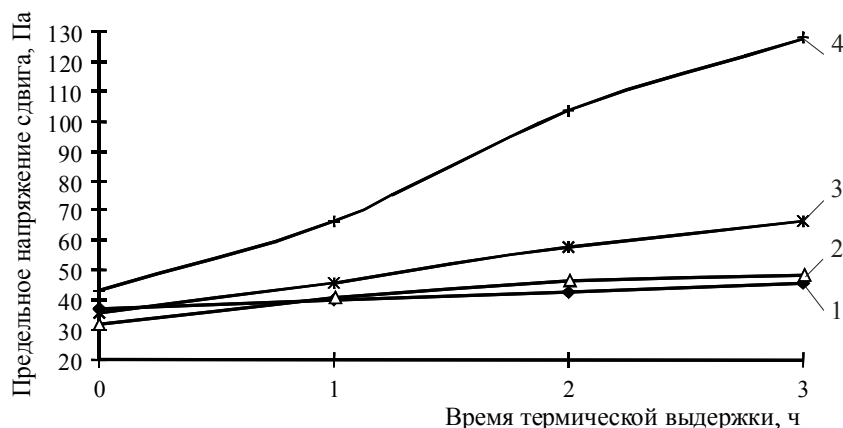


Рис. 4. Зависимость предельного напряжения сдвига серных композитов от времени термической выдержки и концентрации аппрета на измельченном кварцевом наполнителе: 1 – без аппрета; 2, 3, 4 – обработанным 10, 30 и 50 %-м раствором аппрета в керосине соответственно

Зависимость предельного напряжения сдвига серных мастик от времени термической выдержки описывается функцией вида:

$$\tau = ae^{bt_T}, \quad (1)$$

где τ – предельное напряжение сдвига, Па; t_T – время термической выдержки, ч; a, b – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.

Анализ экспериментальных данных (кривая 1) показывает, что увеличение продолжительности изотермической выдержки серных материалов на необработанном аппретом кварцевом наполнителе приводит к незначительному снижению подвижности смеси, что связано с образованием полимерной серы. Введение в расплав серы наполнителя, поверхность которого обработана аппретом, ведет к увеличению величины τ (кривые 2-4), что можно объяснить протеканием двух конкурирующих процессов, связанных с образованием полимерной серы и вулканизацией каучука. Одновременно с этими реакциями идет образование газообразных продуктов вулканизации, которые способствуют снижению вязкости системы в соответствии с законом Гута – Марка [5]. Совместное влияние указанных процессов на предельное напряжение сдвига описывается функцией вида

$$\tau = \frac{\tau_b}{\tau_n} = \frac{a(b + ct_T^d)}{b + t_T^d}, \quad (2)$$

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.

Значения эмпирических коэффициентов уравнений (1) и (2)

Концентрация аппрета от массы серы, %	Эмпирические коэффициенты			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
0	37,23	0,07	–	–
0,2	31,97	1,01	1,53	2,49
0,6	35,84	3,99	2,42	1,62
1,0	43,11	4,28	3,84	2,06

Описанные выше процессы оказывают влияние и на структурные показатели материала: наиболее плотные композиты изготавливались на наполнителе, обработанном 30 %- и 50 %-м раствором каучука, что соответствует 0,6 и 1,0 % от массы серы (рис. 5), и подвергались изотермической выдержке в течение 2-3 ч.

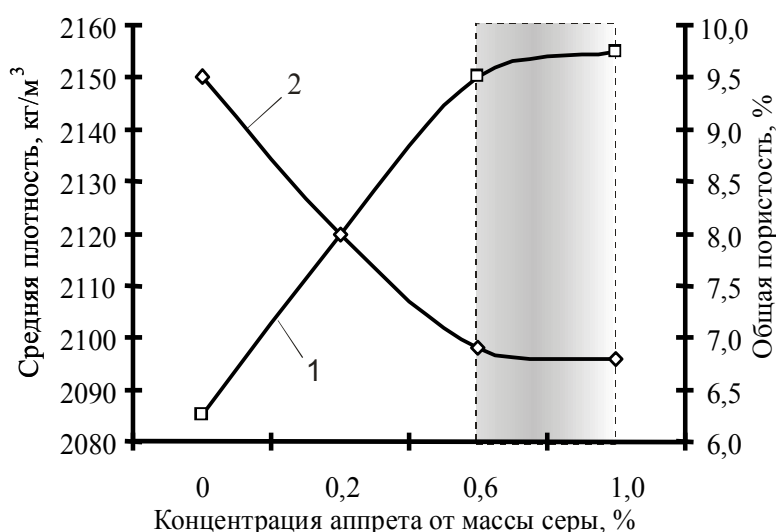


Рис. 5. Зависимость средней плотности (1) и общей пористости (2) от концентрации аппрета серных композитов на аппретированном кварцевом наполнителе

Таким структурам соответствуют и наибольшие показатели прочности (рис. 6), причем зависимости $R_{изг} = f(C_{ап}, t_T)$ и $R_{сж} = f(C_{ап}, t_T)$ (где $C_{ап}$ – концентрация каучука) носят вид экстремумы. Максимальные значения пределов прочности на сжатие и изгиб наблюдаются при концентрации каучука 0,6 % от массы вяжущего и продолжительности изотермической выдержки 2 часа. Коэффициент трещиностойкости, рассчитанный по формуле $k_{тр} = \frac{R_{изг}}{R_{сж}}$, для коррозионно-стойких мастик равен $k_{тр} = 0,3$, что

почти вдвое выше значения аналогичного показателя для обычных серных композитов [6].

Долговечность композиционных материалов на основе серы в большинстве случаев определяется их способностью противостоять деструктивному воздействию агрессивных факторов и напрямую зависит от глубины их проникновения в структуру материала [1, 2].

Проведенные исследования показывают, что кинетика водопоглощения зависит от плотности структуры коррозионно-стойких мастик, которая, в свою очередь, определяется концентрацией аппрета и продолжительностью изотермической выдержки. Кинетика водопоглощения таких композитов имеет классический вид и описывается функцией:

$$W_m = a \cdot (1 - e^{-bt}), \quad (3)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 4.

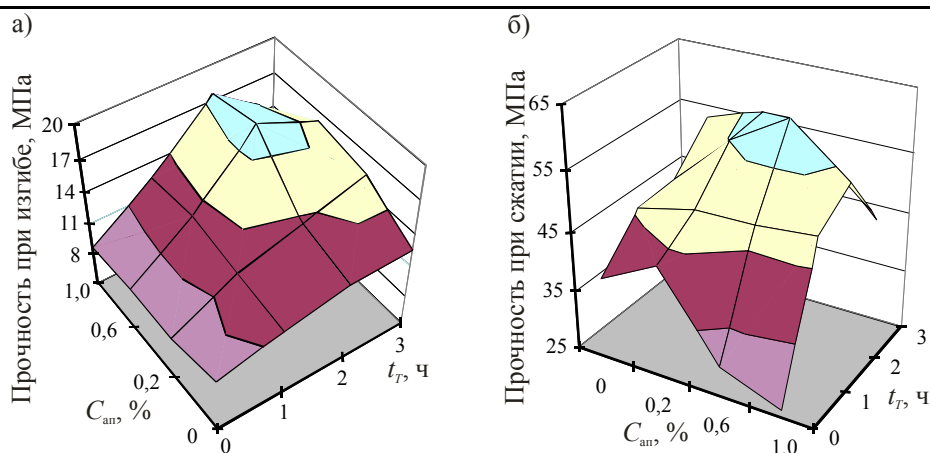


Рис. 6. Зависимость предела прочности при изгибе (а) и сжатии (б) серных мастик на измельченном кварцевом наполнителе от времени термической выдержки и концентрации аппрата

Отметим, что процесс водопоглощения образцов, подвергшихся изотермической выдержке, практически полностью прекращается через месяц экспозиции их в воде. При прочих равных условиях аппретирование поверхности наполнителя способствует снижению величины водопоглощения в 4...7 раз.

Т а б л и ц а 4

Значения эмпирических коэффициентов уравнения (3)

Концентрация раствора аппрата от массы серы, %	Время термической выдержки, ч	Коэффициенты	
		<i>a</i>	<i>b</i>
0	0	1,740	0,122
	1	0,931	0,057
	2	0,809	0,071
	3	0,888	0,052
0,2	0	1,153	0,078
	1	0,844	0,089
	2	0,463	0,117
	3	0,694	0,123
0,6	0	1,055	0,052
	1	0,327	0,059
	2	0,432	0,075
	3	0,232	0,117
1,0	0	0,892	0,077
	1	0,236	0,021
	2	0,246	0,089
	3	0,171	0,019

Повышенные значения плотности и прочности структуры обеспечивают высокую химическую стойкость материала (табл. 5). Причем максимальные показатели стойкости наблюдаются у мастик, изготовленных на измельченном кварцевом наполнителе, обработанном 30 %- и 50 %-м раствором каучука, и подвергшихся 2- и 3-часовой термической выдержке.

Химическая стойкость коррозионно-стойких серных композитов

Концентрация аппрета от массы серы, %	Время термической выдержки, ч	Коэффициент водостойкости	Коэффициент кислотостойкости и (раствор HCl, pH=1)	Коэффициент солестойкости и (5 %-й раствор NaCl)
0	0	0,52	0,74	0,6
	1	0,63	0,84	0,8
	2	0,68	0,79	0,74
	3	0,75	0,77	0,75
0,2	0	0,71	0,70	0,80
	1	0,72	0,70	0,70
	2	0,89	0,74	0,65
	3	0,45	0,76	0,47
0,6	0	0,69	0,75	0,87
	1	0,81	0,76	0,89
	2	0,99	0,97	0,98
	3	1,04	1,03	1,04
1,0	0	0,68	0,61	0,84
	1	0,72	0,88	0,88
	2	0,98	1,16	1,26
	3	1,06	0,91	0,92

Таким образом, разработанные материалы отличаются от традиционных серных композитов более высокими значениями показателей физико-механических и эксплуатационных свойств. Их целесообразно использовать для изготовления коррозионно-стойких бетонов и штучных изделий, для заливки швов и стыков ограждающих конструкций предприятий химической, стекольной, металлургической и других отраслях промышленности.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, А.П. Прошин, Ю.М. Баженов, Ю.А. Соколова. – Москва : Палеотип, 2004. – 464 с.
2. Королев, Е.В. Строительные материалы на основе серы / Е.В. Королев, А.П. Прошин, В.Т. Ерофеев, В.М. Хрулев, В.В. Горетый. – Пенза : ПГУАС ; Саранск : МГУ им. Огарева, 2003. – 372 с.
3. Шитова, И.Ю. Применение основ термодинамики на примере выбора дисперсной фазы при изготовлении серных композитов / И.Ю. Шитова, А.В. Туманов // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. – 2023. – № 1.
4. Черкинский, Ю.М. Химия полимерных неорганических вяжущих веществ / Ю.М. Черкинский. – Ленинград : Химия, 1967. – 224 с.
5. Захарченко, В.Н. Коллоидная химия / В.Н. Захарченко. – Москва : Высшая школа, 1989. – 237 с.
6. Волгушев, А.Н. Производство и применение серных бетонов / А.Н. Волгушев, Н.Ф. Шестеркина. – Москва : ЦНИИТЭИМС, 1985. – 60 с.

References

1. Korolev, E.V. Radiation-protective and corrosion-resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, A.P. Proshin, Yu.M. Bazhenov, Yu.A. Sokolova. – Moscow : Paleotype, 2004. – 464 p.
2. Korolev, E.V. Sulfur-based building materials / E.V. Korolev, A.P. Proshin, V.T. Erofeev, V.M. Khrulev, V.V. Gorety. – Penza : PSUAS ; Saransk : Moscow State University, 2003. – 372 p.
3. Shitova, I.Yu. Application of thermodynamic principles using the example of choosing a dispersed phase in the manufacture of sulfur composites / I.Yu. Shitova, A.V. Tumanov // Vestnik PSUAS: Construction, Science and Education. – 2023. – No. 1.
4. Cherkinsky, Yu.M. Chemistry of polymer inorganic binders / Yu.M. Cherkinsky. – Leningrad : Chemistry, 1967. – 224 p.
5. Zakharchenko, V.N. Colloidal chemistry / V.N. Zakharchenko. – Moscow : Higher School, 1989. – 237 p.
6. Volgushev, A.N. Production and application of sulfur concretes / A.N. Volgushev, N.F. Shesterkina. – Moscow : TsNIITEIMS, 1985. – 60 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

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

Шестернин Александр Игоревич,
аспирант
E-mail: psm31@rambler.ru

Шульте Ирина Сергеевна,
студент магистратуры
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*

Korovkin Mark Olympievich,
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

Shesternin Aleksandr Igorevich,
Graduate student
E-mail: psm31@rambler.ru

Shulte Irina Sergeevna,
Master's degree student
E-mail: irina13122000@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ДРОБЛЕНИЕМ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.И. Шестернин, И.С. Шульте

Рассмотрены особенности использования демонтированных тротуарных плиток в качестве сырья для производства вторичных заполнителей бетона. Исследовано влияние кратности повторного дробления этого отхода на зерновой состав рециклингового мелкого и крупного заполнителя, на его насыпную и среднюю плотность, дробимость вторичного щебня фр. 5-10 мм, а также содержание в нем лежачих зерен. Установлено, что полученный рециклинговый песок относится к пескам повышенной крупности, вторичный щебень имеет марку по дробимости 300 и 400 и рекомендуется для производства бетонов классов В15 и В20.

Ключевые слова: тротуарные плитки, рециклинг, повторное дробление, вторичный песок, вторичный щебень, зерновой состав, плотность, лежачесть, коэффициент формы зерен заполнителя

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SECONDARY AGGREGATE PRODUCED BY CRUSHING PAVING SLABS

М.О. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.I. Shesternin, I.S. Schulte

The features of using dismantled paving slabs as raw materials for the production of secondary concrete aggregates are considered. The influence of the frequency of repeated crushing of this waste on the grain composition of the recycled fine and coarse aggregate, as well as on the bulk and average density, crushing capacity of secondary crushed stone of 5-10 mm, as well as the content of bream grains in it, was investigated. It has been established that the obtained recycled sand belongs to sands of increased size, secondary crushed stone has grades 300 and 400 and is recommended for the production of concrete of classes B15 and B20.

Keywords: paving slabs, recycling, re-crushing, secondary sand, secondary crushed stone, grain composition, density, greasiness, grain shape coefficient of aggregate

Введение

Производство бетонных изделий методом вибропрессования в последние десятилетия постоянно увеличивается. Эта технология позволяет изготавливать мелкоштучные изделия для благоустройства – тротуарные плиты, бортовые камни, водоотводные лотки и др. К преимуществам технологии вибропрессования относится возможность производства на автоматизированных технологических линиях изделий из мелкозернистых бетонных смесей жесткой консистенции. Такие изделия за счет низкого водоцементного отношения имеют высокую прочность.

Тротуарные плитки, произведенные методом вибропрессования, характеризуются достаточно высокой долговечностью. Однако они эксплуатируются в неблагоприятных условиях морозно-солевого воздействия, в результате через несколько лет постепенно разрушаются и требуют замены. В настоящее время тротуарные плитки после демонтажа покрытия не утилизируются, а вывозятся с другим строительным мусором на полигоны захоронения отходов, что связано с относительно небольшим количеством этого отхода. Однако через несколько лет объемы демонтируемых тротуарных плиток значительно возрастут. В связи с этим целесообразны исследования, направленные на рациональное использование этого отхода в строительной отрасли.

Отличительной особенностью крупного и мелкого рециклингового заполнителя, полученного дроблением вибропрессованных изделий, является отсутствие в его составе щебня из горных пород. Это, с одной стороны, обеспечивает более высокую однородность зерен вторичного заполнителя в отличие от заполнителя, полученного дроблением бетона, изготовленного с применением щебня. А, с другой стороны, эта особенность состава не позволяет получить при использовании различных методов [1] более качественный рециклинговый заполнитель за счет уменьшения в нем содержания растворной составляющей, которая содержится как в виде отдельных зерен, так и в виде зерен конгломератной структуры, включающих природный крупный заполнитель и растворную составляющую рециклируемого бетона [2]. По данным [3], в продуктах дробления с размером частиц менее 10 мм содержание цементного камня составляет 18–24 %.

Кроме того, структура цементного камня демонтированных тротуарных плит в значительной степени разрушена морозным воздействием, а в поровом пространстве может содержаться значительное количество противогололедных реагентов, что повышает риск коррозии арматуры в железобетонных конструкциях, изготовленных с применением этого заполнителя.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были отобраны демонтированные с остановки общественного транспорта серые и красные тротуарные плитки (рис.1а), которые эксплуатировались в течение 16 лет. Осмотр плитки показал, что она подвержена разрушению в большей степени с нижней стороны (рис.1б), которая более насыщается влагой в процессе эксплуатации.

Прочность бетона в плитке определялась неразрушающими методами – ультразвуковым с помощью прибора УК 41.01 и методом ударного импульса с помощью склерометра ИПС-МГ4.03. При определении прочности на наименее разрушенных боковых гранях плитки ее значения составляли 34–65 МПа.

Отобранный материал дробился в лабораторной щековой дробилке ЩД 6. Дробление производилось по «мягкому» режиму [4], при котором дробление материала происходит преимущественно за счет взаимодействия зерен измельчаемого бетонного лома. Для реализации такого режима разгрузочная щель дробилки открывалась до максимума, а дробление производилось при полном заполнении рабочего пространства дробилки. При дроблении по такому режиму вследствие взаимодействия между собой зерен разрушались наименее прочные из них. Для исследования влияния повторного дробления материал повергался одно-, трех- и пятикратному дроблению. Для полученных продуктов дробления определялся зерновой состав методом просева на стандартных ситах, а также насыпная и средняя плотность, дробимость при сжатии

в цилиндре щебня фр. 5-10 мм. Кроме того, определялись содержание во вторичном щебне зерен лещадной формы и коэффициент формы, который рассчитывался по формуле $K_{\phi} = a/b$, где a и b – наибольший и наименьший размеры гранулы щебня соответственно, мм.

а



б



Рис. 1. Демонтаж плитки (а), нижняя поверхность демонтированной плитки (б)

Результаты и их обсуждение

Результаты определения фракционного состава продуктов дробления тротуарной плитки приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Фракционный состав продуктов различной кратности дробления

Кратность дробления	Остатки на ситах с размером ячейки, %								
	20 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	0,16 мм	<0,16 мм
1	14,7	48,3	15,0	7,6	2,7	3,9	4,0	1,7	2,1
3	4,6	48,7	20,1	9,8	3,1	3,9	4,9	2,7	2,2
5	1,9	42,3	19,6	10,7	4,7	6,3	7,4	4,5	2,6

Анализ данных в табл. 1 показывает, что при увеличении кратности дробления доля крупного заполнителя в продуктах дробления снижается с 78 до 63,8 % и в

результате соотношение мелкого и крупного заполнителя приближается к традиционному для пластичных бетонных смесей соотношению – 1:2. При этом необходимо отметить почти полное отсутствие в дробленом бетонном ломе после пятикратного дробления зерен 20 мм и более.

Результаты расчета полных и частных остатков, а также модуля крупности рециклингового песка при различной кратности дробления приведены в табл. 2, а графики, характеризующие его зерновой состав, – на рис. 2.

Т а б л и ц а 2

Частные a_i и полные остатки A_i , модуль крупности M_k песчаной фракции при различной кратности дробления тротуарной плитки

Размер сита, мм	Однократное		Трехкратное		Пятикратное	
	a_i	A_i	a_i	A_i	a_i	A_i
2,5	34,6	34,6	36,9	36,9	29,5	29,5
1,25	12,2	46,8	11,7	48,6	13,0	42,6
0,63	17,6	64,4	14,8	63,4	17,3	59,9
0,315	18,3	82,7	18,3	81,7	20,6	80,4
0,16	7,9	90,7	10,1	91,7	12,3	92,8
< 0,16 мм	9,3	–	8,3	–	7,2	–
M_k	3,2		3,2		3,1	

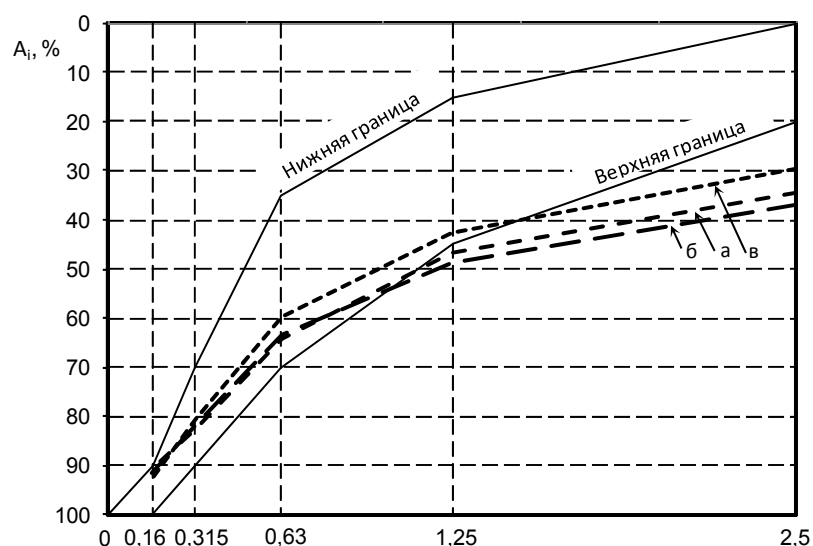


Рис. 2. Рекомендуемый зерновой состав песков и зерновой состав рециклингового песка после однократного (а), трехкратного (б) и пятикратного (в) дробления тротуарной плитки

По модулю крупности полученный рециклинговый песок относится к пескам повышенной крупности. Как видно из графиков на рис. 2, при увеличении кратности дробления полученный песок приближается к рекомендуемой области гранулометрии мелкого заполнителя [5]. Отклонение от рекомендуемого зернового состава отмечается для частиц размером 2,5 мм.

Очевидно, что этот вторичный заполнитель из-за пористости будет значительно повышать водопотребность бетонов и строительных растворов. В связи с этим целесообразно проведение исследований по эффективности использования фракций 0,63 мм и более для обогащения мелких кварцевых и полевошпатных песков.

В работе [6] установлено, что нефракционированный щебень, полученный дроблением бетона различных классов по прочности, не соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 по зерновому составу. В связи с этим исследования щебня проводились отдельно на фр. 5-10 и 10-20 мм.

Анализ гранулометрии вторичного щебня фр. 5-10 мм показал, что увеличение количества циклов дробления приводит к снижению содержания в нем средней фракции с 60 приблизительно до 40 % (рис. 3а). В то же время на содержание средней фракции в щебне 10-20 мм (рис. 3б) количество циклов дробления влияние не оказывает. На графиках видно, что зерновой состав полученного вторичного щебня соответствует ГОСТ 8267-93.

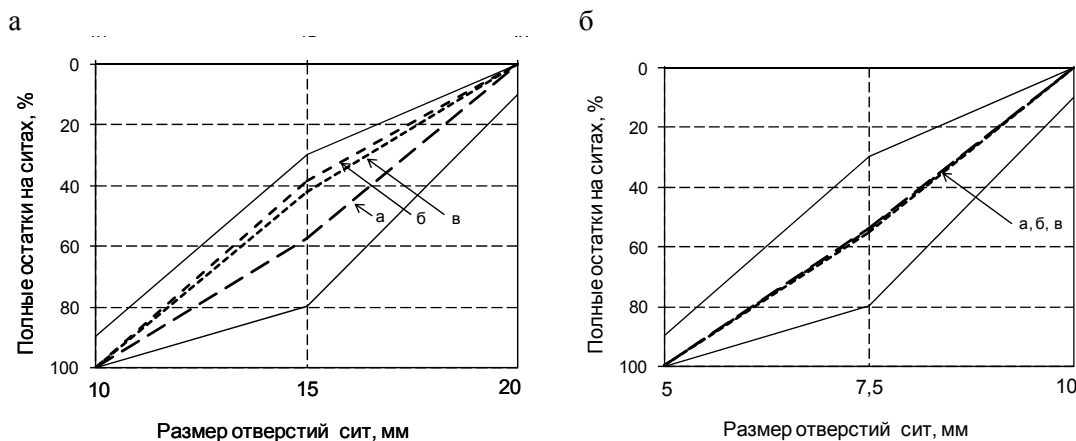


Рис. 3. Зерновой состав вторичного щебня фр. 10-20 мм (а) и фр. 5-10 мм (б) после однократного (а), трехкратного (б) и пятикратного (в) дробления и требования ГОСТ 8267-93

Результаты определения насыпной и средней плотности, дробимости при сжатии в цилиндре щебня фр. 5-10 мм, а также содержания в нем лещадных зерен и коэффициента их формы, приведенные в табл. 3, показывают, что увеличение кратности дробления позволяет значительно улучшить эти характеристики.

Т а б л и ц а 3

Свойства вторичного щебня фр. 5-10 мм при различной кратности дробления

Кратность дробления	Насыпная плотность, кг/м ³	Средняя плотность, кг/м ³	Дробимость при сжатии в цилиндре, % / марка по дробимости	Коэффициент формы зерен K_{ϕ}	Доля лещадных зерен, %
1	1135	2400	25 / 300	3,4	51,8
3	1232	2410	20 / 300	2,6	26,8
5	1264	2415	18 / 400	2,3	12,5

Анализ данных в табл. 3 показывает, что при увеличении кратности дробления средняя плотность вторичного щебня остается практически неизменной, но при этом его насыпная плотность значительно возрастает. Это можно объяснить повышением плотности упаковки зерен щебня за счет уменьшения содержания в продуктах дробления лещадных зерен, что подтверждается результатами определения содержания таких зерен и коэффициента формы зерен рециклингового щебня (см. табл. 3).

Улучшение формы зерен при повторном дроблении связано с тем, что при «мягком» режиме дробления («под завалом») происходит разрушение преимущественно материала пластинчатой формы, а также зерен с меньшей прочностью.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность получения вторичного щебня дроблением демонтированной тротуарной плитки. Установлено, что, несмотря на значительное морозное разрушение плитки за несколько лет эксплуатации, на основе этого отхода возможно получение щебня марки по дробимости 300-400.

Зерновой состав продуктов дробления бетонного лома менее 5 мм (рециклингового песка) позволяет отнести их к пескам повышенной крупности. В связи с этим целесообразно применение отсеков дробления для обогащения мелких природных песков.

Зерновой состав вторичного щебня фр. 5-10 и 10-20 мм, полученного дроблением демонтированной тротуарной плитки, соответствует требованиям ГОСТ 8267-93. Дробимость щебня при увеличении кратности дробления значительно снижается при повторном дроблении. Полученный вторичный щебень имеет марку по дробимости 300 и 400, что позволяет использовать его в соответствии с ГОСТ 32495-2013 для производства бетонов классов по прочности на сжатие В15 и В20 соответственно.

Список литературы

1. Коровкин, М.О. Повышение эффективности утилизации бетонного лома в технологии бетона / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.А. Христосов // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 2(27). – С. 158–166.
2. Вайсберг, Л.А. Исследование состава и физико-механических свойств вторичного щебня из дробленого бетона / Л.А. Вайсберг, Е.Е. Каменева // Строительные материалы. – 2014. – № 6. – С. 41–45.
3. Морозова, Н.Н. Бетонные отходы: организация переработки, свойства и применение / Н.Н. Морозова, А.Р. Гиззатуллин, А.П. Аксаков, К.О. Нестерова // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – № 1(10). – С. 32–46.
4. Исследование переработанных отходов сноса в качестве сырья для производства бетона / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.И. Шестернин, В.В. Зенкин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2024. – № 1(18). – С. 33–38.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям / Ю.М. Баженов. – 5-е изд. – Москва : Изд-во АСВ, 2011. – 524 с.
6. Беппаев, З.У. Исследование зависимости зернового состава и марки рециклингового щебня по дробимости от прочности исходного утилизируемого бетона / З.У. Беппаев, Л.Х. Аствацатурова, С.А. Колодяжный [и др.]. – DOI 10.37538/2226-9696-2021-3(30)-5-16 // Вестник НИЦ Строительство. – 2021. – № 3(30). – С. 5–16.

References

1. Korovkin, M.O. Improving the efficiency of recycling concrete scrap in concrete technology / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.A. Khristosov // Education and science in the modern world. Innovations. – 2020. – No. 2 (27). – P. 158–166.
2. Weisberg, L.A. Study of the composition and physical and mechanical properties of secondary crushed stone from crushed concrete / L.A. Weisberg, E.E. Kameneva // Construction materials. – 2014. – No. 6. – P. 41–45.
3. Morozova, N.N. Concrete waste: organization of processing, properties and application / N.N. Morozova, A.R. Gizzatullin, A.P. Aksakov, K.O. Nesterova // Polymers in Construction: Scientific Online Journal. – 2022. – No. 1 (10). – P. 32–46.
4. Study of Recycled Demolition Waste as Raw Materials for Concrete Production / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.I. Shesternin, V.V. Zenkin // Bulletin of PSUAS: Construction, Science and Education. – 2024. – No. 1 (18). – P. 33–38.
5. Bazhenov, Yu.M. Concrete Technology: A Textbook for Students of Higher Education Institutions Studying in Construction Specialties / Yu.M. Bazhenov. – 5th ed. – Moscow: ASV Publishing House, 2011. – 524 p.
6. Bepbaev, Z.U. Study of the dependence of the grain composition and grade of recycled crushed stone by crushability on the strength of the original recycled concrete / Z.U. Bepbaev, L.Kh. Astvatsaturova, S.A. Kolodyazhny [et al.]. – DOI 10.37538/2226-9696-2021-3 (30)-5-16 // Bulletin of the Research Center for Construction. – 2021. – No. 3 (30). – P. 5–16.

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,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

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

Бортунова Валерия Игоревна,
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

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate student
E-mail: techbeton@pguas.ru

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

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

ВЛИЯНИЕ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ НА УСАДКУ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА

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

Представлены результаты оценки эффективности низкоинтенсивной автоклавной обработки высокопрочного бетона, модифицированного активной минеральной добавкой с целью снижения его деформаций усадки. Исследованы влияние тепловлажностной и автоклавной обработки на прочность бетона, а также изменение деформативных и демпфирующих характеристик. Установлено, что автоклавная обработка позволяет снизить величину усадки бетона в 1,3...1,6 раза, а также повысить демпфирование при сохранении прочности и жёсткости материала

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, усадка, автоклавная обработка, машиностроение, станина

EFFECT OF AUTOCLAVE CURING ON SHRINKAGE AND DYNAMIC PROPERTIES OF STRUCTURAL CONCRETE

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

The article presents the results of assessing the effectiveness of low-intensity autoclave treatment of high-strength concrete modified with an active mineral additive to reduce its shrinkage deformations. The effect of heat-moisture and autoclave treatment on the strength of concrete, as well as changes in deformation and damping characteristics, are studied. It is established that autoclave treatment allows reducing the shrinkage of concrete by 1.3 ... 1.6 times, as well as increasing damping while maintaining the strength and rigidity of the material.

Keywords: fine-grained concrete, shrinkage, autoclave treatment, mechanical engineering, machine bed

Введение. За последние десятилетия наметилась тенденция к снижению металлоёмкости в промышленности [1]. Одной из доступных альтернатив металлическим сплавам могут стать бетоны на минеральном вяжущем [2]. Однако широкое внедрение цементных видов бетонов в различные области машиностроения осложнено целым рядом причин. Одним из лимитирующих факторов является недостаточная геометрическая стабильность конструкций, в частности в случае их выполнения из традиционного общестроительного бетона. В предлагаемой статье оцениваются перспективы применения автоклавной обработки при различных режимах её проведения на

физико-механические и деформативные показатели бетона с целью расширения области его рационального применения.

Автоклавная обработка, являющаяся традиционным этапом технологии газобетона, интенсифицирует формирование прочной кристаллической структуры в результате синтеза гидросиликатов кальция – тоберморита $11\text{\AA}$ ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), его $14\text{\AA}$ - и $9\text{\AA}$ -политипов и более высокотемпературной фазы – ксонотлита ($\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$). Известные экспериментальные данные [3, 4] и термодинамические расчёты [5] указывают на образование приведённых соединений в температурном диапазоне $160\ldots 200\text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует давлению водяного пара от 7 до 15 атм. Именно такие параметры являются характерными для технологии автоклавного газобетона. Литературные данные о физико-химических процессах в температурном диапазоне $100\ldots 140\text{ }^\circ\text{C}$ представлены в меньшем количестве. В данной работе приводятся результаты оценки влияния низкоинтенсивной автоклавной обработки ($T = 100\ldots 140\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 3\ldots 4$ атм.) на свойства бетона, в том числе модифицированного активной минеральной добавкой – микрокремнезёмом (МК).

Материалы и методы исследования. При выполнении экспериментов использовались сырьевые материалы:

- портландцемент ЦЕМ0 52,5Н следующего фазового состава: $\text{C}_3\text{S} - 67,2\%$, $\text{C}_2\text{S} - 12,0\%$, $\text{C}_3\text{A} - 6,7\%$, $\text{C}_4\text{AF} - 11,9\%$ (ООО «Азия Цемент», Пензенская обл.);

- микрокремнезём конденсированный неуплотнённый МК-85 ($S_{\text{уд}}=21000\text{ м}^2/\text{кг}$) [ПАО «НЛМК», РФ];

- песок кварцевый Ртищевского месторождения (Саратовская обл.), $M_k=2,33$;

- гиперпластификатор на поликарбоксилатной основе (ГП) Sika ViscoCrete 226-P [Sika, РФ];

- кварцевая мука Silverbond 15 EW R300 ($S_{\text{уд}}=1100\text{ м}^2/\text{кг}$) [Раменский ГОК, РФ].

Растекаемость смеси оценивалась путём определения диаметра её расплыва при истечении из цилиндра $30\times 30\text{ мм}$. Предельное напряжение сдвига определялось в соответствии с методикой, изложенной в [6].

Прочность при сжатии оценивалась на образцах-кубиках с ребром 30 мм . Для снижения влияния геометрических характеристик образца на определяемые показатели их опорные грани перед испытанием шлифовались. В качестве значения прочности принималось среднее значение по итогам 11 испытаний.

Деформации усадки измерялись в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020 на образцах-призмах длиной 300 мм .

Динамические характеристики образцов (динамический модуль упругости, E_d и логарифмический декремент δ) определялись методом свободных колебаний [7] на образцах-балочках длиной $(300\pm 1)\text{ мм}$, с высотой сечения $(28\pm 0,1)\text{ мм}$ и шириной $(40\pm 1)\text{ мм}$.

Экспериментальная часть. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о существенном влиянии автоклавной обработки на свойства высокопрочного бетона. Однако эти данные носят противоречивый характер. В работе Дж. Хэнсона [8] было показано, что автоклавная обработка при температуре $175\text{ }^\circ\text{C}$ в $3\ldots 4$ раза снижает влажностную усадку и ползучесть бетона, при этом повышаются прочность и модуль упругости. Исследование [9] показывает, что обработка бетона горячим паром приводит к снижению модуля упругости и повышению демпфирования. Согласно [10], автоклавирование сверхвысококачественного бетона (УНПС) при температуре $200\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к повышению прочности при сжатии, однако прочность при изгибе значительно снижается.

При проведении исследования влияния различных видов тепловлажностной обработки на механические показатели бетона использовались два состава: состав I содержал ПЦ, МК (10% от Ц), кварцевую муку ($0,3$ от Ц), кварцевый песок (при отношении П/Ц $2:1$), пластификатор ($0,8\%$ от Ц); состав II отличался отсутствием микрокремнезёма, замещённого долей кварцевой муки. В/Ц для обоих составов составляло $0,33$ ($\text{В/Т}=0,1$). Смешивание компонентов осуществлялось в лабораторной чаше ручным способом, пластификатор вводился с водой затворения. Предельное напряжение сдвига составило $3,23$ и $3,14\text{ Па}$ для составов I и II соответственно.

После формования образцы выдерживались в течение суток в камере нормального твердения при температуре 20...23 °С и относительной влажности 95...99 %, после распалубки образцы делились на серии. Автоклавная обработка образцов осуществлялась в возрасте 24 часов в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 140 °С и давлении 4 атмосфер. Режимы обработки представлены на рис. 1.

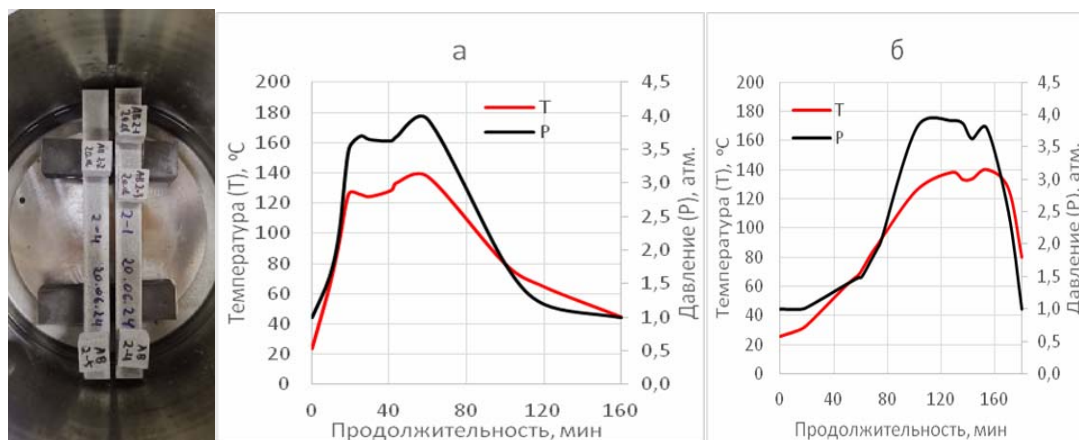


Рис. 1. Экспериментальные образцы и параметры автоклавной обработки:
а – режим 1; б – режим 2

Тепловлажностная обработка (пропаривание) осуществлялась путём нагрева образцов, завернутых во влажную ткань и несколько слоёв полимерной плёнки, в соответствии со следующим режимом: 1 фаза – подъём температуры до 70 °С в течение 40 минут; 2 фаза – изотермическая выдержка в течение 2 часов, а затем плавное охлаждение в течение ~3 часов. После указанных процедур образцы помещались в камеру нормального твердения (н.у.). Контрольные образцы каждого состава после распалубки оставляли в камере. После 7 суток нормального твердения образцы извлекались из камеры. Результаты представлены на рис. 2.

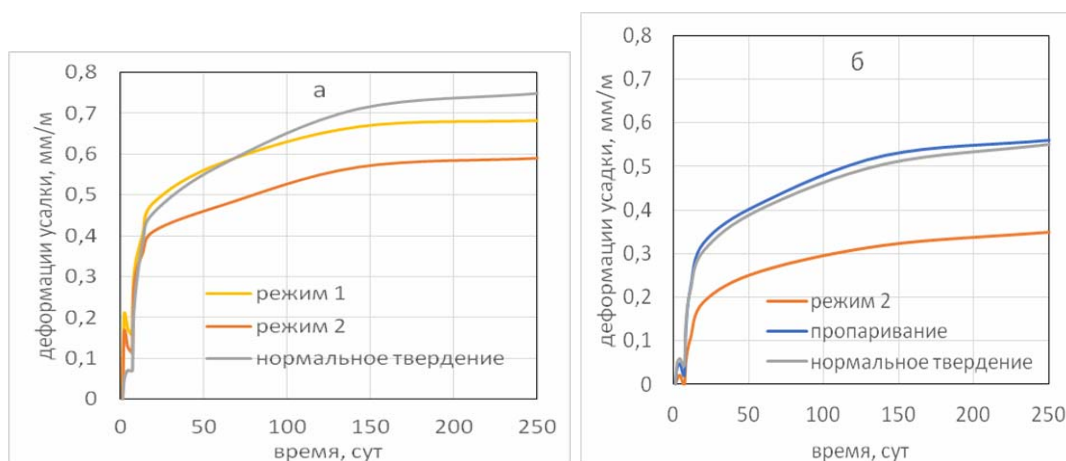


Рис. 2. Результаты определения усадки образцов при различных условиях:
а – состав I; б – состав II

Анализ экспериментальных данных показывает, что у образцов с МК, подвергшихся автоклавной обработке, наблюдается снижение величины предельной усадки (рис. 2, а). Наиболее эффективным оказался 2-й режим (снижение усадки в 1,27 раза). У образцов без добавки микрокремнезёма (рис. 2, б) пропаривание не оказало заметного влияния на усадку, а автоклавная обработка способствовала её снижению в 1,57 раза.

Далее определяли динамические характеристики (E_d и δ) (рис. 3). Наибольшая величина модуля упругости для состава с микрокремнезёмом зафиксирована у образцов после автоклавной обработки по режиму 2. У бездобавочных составов автоклавная

обработка и пропаривание также вызывают незначительное повышение модуля упругости. Прочность при сжатии (R_{28}) (состав I) составляет 80, 88 и 81 МПа при автоклавной обработке по режимам 1, 2 и твердении при н.у. соответственно. При быстром подъёме температуры (режим 1) наблюдаются снижение E_d и повышение демпфирования, что свидетельствует о росте дефектности структуры материала.

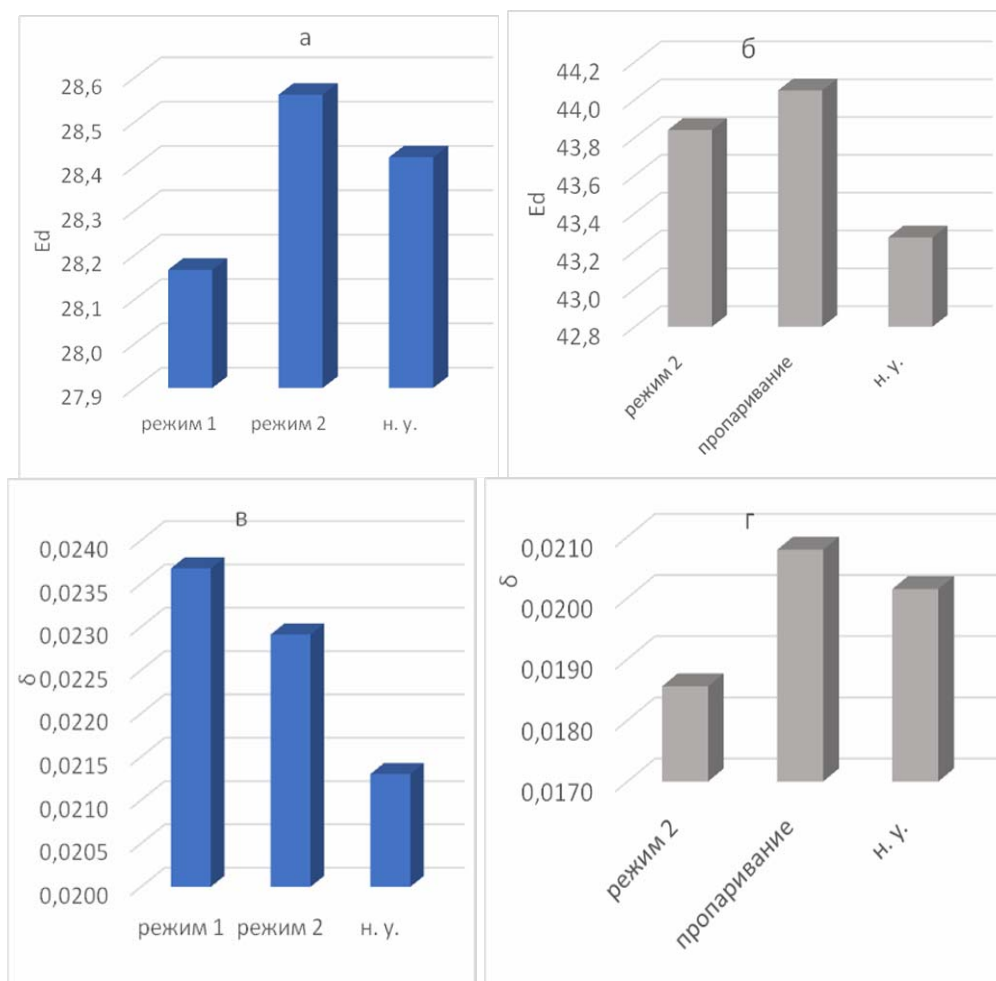


Рис.3. Динамический модуль упругости (E_d) и логарифмический декремент колебаний (δ) экспериментальных образцов:
а, в – состав I; б, г – состав II

Выводы. Установлена эффективность проведения автоклавной обработки при температурах 130-140 °С для снижения усадки конструкционного бетона, в том числе модифицированного активной минеральной добавкой. Определено снижение величины линейной усадки бетона в 1,27 раза у состава с добавкой и в 1,57 раза у состава, не содержащего микрокремнезём. Выявлен незначительный рост величины демпфирования при сохранении жёсткости и прочности материала после автоклавной обработки на протяжении 120 минут. Отмечено, что наибольшая эффективность автоклавной обработки достигается при использовании в составе бетона активной минеральной добавки.

Список литературы

1. Береговой, В.А. Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 18–25.
2. Лавров И.Ю. Перспективы применения цементных бетонов для изготовления базовых деталей станков / И.Ю. Лавров // Сборник материалов XV Международной научно-технической конференции «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов». – 2021. – С. 98–106.

3. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашов, В.Г. Савельев. – Москва : Высшая школа, 1981. – 335 с.
4. Бутт, Ю.М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю.М. Бутт, Л.М. Рашкович. – Москва : Стройиздат, 1965. – 244 с.
5. Кафтаева, М.В. К вопросу о фазовом составе гидросиликатного связующего автоклавного газобетона / М.В. Кафтаева, И.Ш. Рахимбаев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 10. – С. 370–372.
6. Коровкин, М.О. Совершенствование методики определения предельного напряжения сдвига суспензии по ее растекаемости / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, М.Н. Замчалин // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 3–1 (47). – С. 109–112.
7. Лавров, И.Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – Вып. 0, № 12. – С. 42–48.
8. Hanson, J.A. Prestress Loss as Affected by Type of Curing / J.A. Hanson // PCI J. – 1964. – Vol. 9, № 2. – P. 69–93.
9. Long, G. The mechanical characteristics of steam-cured high strength concrete incorporating with lightweight aggregate / G. Long, J. Yang, Y. Xie // Constr. Build. Mater. – 2017. – Vol. 136. – P. 456–464.
10. Tian, H. The Influence of Long-Term Autoclaving on the Properties of Ultra-High Performance Concrete / H. Tian, T. Hirsch, D. Stephan, C. Lehmann // Front. Mater. Frontiers. – 2022. – Vol. 9.

References

1. Beregovoy, V.A. High-Performance Concretes in Machine Tool Manufacturing: Technological Aspects of Application / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 18–25.
2. Lavrov, I.Yu. Prospects for the Use of Cement Concretes for Manufacturing Machine Tool Base Components / I.Yu. Lavrov // Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Theory and Practice of Improving the Efficiency of Construction Materials». – 2021. – P. 98–106.
3. Gorshkov, V.S. Methods of Physico-Chemical Analysis of Binding Materials / V.S. Gorshkov, V.V. Timashov, V.G. Savel'ev. – Moscow : Vysshaya Shkola, 1981. – 335 p.
4. Butt, Yu.M. Hardening of Binding Materials at Elevated Temperatures / Yu.M. Butt, L.M. Rashkovich. – Moscow : Stroyizdat, 1965. – 244 p.
5. Kaftaeva, M.V. On the Phase Composition of Hydrosilicate Binder in Autoclaved Aerated Concrete / M.V. Kaftaeva, I.Sh. Rakhimbaev // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2013. – No. 10. – P. 370–372.
6. Korovkin, M.O. Improvement of the Methodology for Determining the Ultimate Shear Stress of a Suspension by its Spreadability / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, M.N. Zamchalin // Modern Scientific Research and Innovations. – 2015. – No. 3–1 (47). – P. 109–112.
7. Lavrov, I.Yu. High-Performance Concretes for Industrial Construction and Mechanical Engineering / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). – 2024. – Vol. 0, No. 12. – P. 42–48.
8. Hanson J.A. Prestress Loss as Affected by Type of Curing / J.A. Hanson // PCI J. – 1964. – Vol. 9, № 2. – P. 69–93.
9. Long, G. The mechanical characteristics of steam-cured high strength concrete incorporating with lightweight aggregate / G. Long, J. Yang, Y. Xie // Constr. Build. Mater. – 2017. – Vol. 136. – P. 456–464.
10. Tian, H. The Influence of Long-Term Autoclaving on the Properties of Ultra-High Performance Concrete / H. Tian, T. Hirsch, D. Stephan, C. Lehmann // Front. Mater. Frontiers. – 2022. – Vol. 9.

*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,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

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

Сидорин Сергей Павлович,
магистрант
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,
Postgraduate student
E-mail: techbeton@pguas.ru

Semiletkov Aleksander Viktorovich,
Student
E-mail: techbeton@pguas.ru

Sidorin Sergey Pavlovich,
Master's student
E-mail: techbeton@pguas.ru

ДЕФОРМАТИВНЫЕ И ДЕМПФИРУЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРБЕТОНА

И.Ю. Лавров, А.В. Семилетков, С.П. Сидорин

Приведены результаты исследования физико-механических и деформативных свойств образцов различных видов полимербетона с эпоксидной матрицей. В качестве заполнителей и наполнителей применялись кварцевая мука, стеклогранулят, пеностекло, гранитный щебень и стальная фибра. Произведена оценка влияния рецептурных факторов, макроструктуры и степени наполнения на статический и динамический модули упругости материала, демпфирующие качества, коэффициент линейного теплового расширения. Полученные данные подтверждают, что оптимальная степень наполнения композита обеспечивает высокую механическую жёсткость при высоких демпфирующих показателях, а также низкие термические деформации, что делает полимербетон перспективным материалом для промышленных конструкций.

Ключевые слова: полимербетон, эпоксидная смола, жесткость, динамический модуль упругости, демпфирование, композитный материал

DEFORMATIONAL AND DAMPING CHARACTERISTICS OF EPOXY POLYMER CONCRETE

I.Yu. Lavrov, A.V. Semiletkov, S.P. Sidorin

The article presents the results of an investigation into the physico-mechanical and deformational properties of various types of polymer concrete with an epoxy matrix. Quartz flour, glass aggregate, foam glass, granite crushed stone and steel fiber were used as fillers and reinforcements. The influence of formulation factors, macrostructure and filler content on the material's static and dynamic elastic moduli, damping characteristics and coefficient of linear thermal expansion was evaluated. The data obtained confirm that an optimal filler content ensures both high mechanical stiffness with pronounced damping performance and low thermal deformation, making epoxy polymer concrete a promising material for critical industrial structures.

Keywords: polymer concrete, epoxy resin, stiffness, dynamic modulus of elasticity, damping, composite material

Введение. В настоящее время в мировой промышленности наметилась тенденция к снижению металлоёмкости, что влечёт за собой необходимость разработки и внедрения современных композиционных материалов. Так, например, в Японии доля использования композитных материалов в машиностроении достигает 50 %, в Соединённых Штатах – 20 %, в Германии – 30 %, в то время как в России данный показатель

остаётся на уровне 5-7 % [1]. Одним из перспективных материалов для создания конструкции промышленного назначения, включая обрабатывающее оборудование, являются полимербетоны [2, 3, 4].

Преимуществами полимербетонов перед бетонами на основе минеральных вяжущих и металлическими сплавами являются [5, 6]:

- стойкость к воздействию агрессивных химических веществ, масла и влаги;
- высокие электроизоляционные свойства;
- высокие демпфирующие свойства и вязкость разрушения;
- меньший удельный вес.

К числу недостатков полимербетонов можно отнести:

- низкую теплостойкость (температура размягчения смол марок ЭД-14 и ЭД-16 составляет 70...80 °С);
- подверженность старению, в том числе под действием УФ-излучения;
- повышенную ползучесть материала под нагрузкой;
- высокую стоимость и меньшую технологичность (в сравнении с цементными бетонами);
- более низкую размерную стабильность при изменении температуры, в особенности у материалов с малой степенью наполнения.

Материалы и методы исследования. При изготовлении образцов полимербетона использовались следующие компоненты: эпоксидный компаунд марки СМЭЛ 04-25, состоящий из смолы (компонент А) и отвердителя (компонент Б); кварцевая мука (КМ) с удельной поверхностью 180 м²/кг. Применялись стеклогрануляты в качестве заполнителей со средним диаметром частиц ($D_{ср}$) 3,1 мм ($\rho_{ср}$ 2491 кг/м³); гранулы пеностекла с $D_{ср}$ 3,5 мм ($\rho_{ср}$ 334 кг/м³); гранитный заполнитель, полученный путём дробления гранитного щебня марки 1200...1400 в щековой дробилке до фракции 1,25-2,5 мм; фибра стальная волновой конфигурации длиной 14 мм со средним диаметром 0,27 мм.

Основные физико-механические показатели образцов определялись в соответствии с действующими стандартами. Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) определялся по результатам последовательного измерения базовых размеров образцов, термостатированных при температуре -20 °С, а затем +20 °С (рис. 1, г).

Статический модуль упругости (E) определялся методом четырёхточечного изгиба в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9550-81 (п.3, метод Б) на образцах-балках длиной 300 мм, высотой и шириной сечения 28 и 40 мм соответственно. Динамический модуль упругости (E_d) и логарифмический декремент затухания (δ) находили методом свободных колебаний по методике, ранее опубликованной в работе [7].

Экспериментальная часть и выводы. Задачей работы являлась оценка влияния рецептурных факторов и структуры полимербетона на его физико-механические и деформативные свойства. Было изготовлено 8 серий образцов (рис. 1,а) следующих составов. Состав 1 – ненаполненная эпоксидная матрица, при массовом соотношении компонент А : компонент Б = 4,07:1, данное соотношение выбрано как наиболее оптимальное по результатам предыдущих экспериментов [8]. Состав 2 – эпоксидно-минеральная матрица, полученная путём введения кварцевой муки при отношении (по массе) КМ:эпоксидная матрица (состав 1) = 2,5:1. Состав 3 – эпоксидно-минеральная матрица, в которую был введён стеклогранулят (порог перколяции составляет 78 % для композита из указанных компонентов) в количестве, обеспечивающем степень наполнения (по объёму) 76,8 %. Состав 4 отличался от предыдущего наличием парафинового покрытия толщиной 0,001-0,01 мм на стеклянных гранулах, нанесённого методом аэрозольного распыления. Так как данное вещество состоит преимущественно из углеводов нормального строения, не имеющих полярных групп, оно является инертным по отношению к заполнителям и эпоксидной матрице и препятствует их сцеплению. Состав 5 повторял состав 3, но стеклогранулят был замещён гранулами пеностекла с сохранением общей степени наполнения композита. Состав 6 содержал стальную фибру, введённую в дозировке 4,6 % (по объёму) в эпоксидно-

минеральную матрицу (состав 2). Составы 7 и 8 представляли собой полимербетон на гранитном заполнителе с докритической и сверхкритической (приводящей к потере сплошности структуры) степенью наполнения, соответственно.

На рис. 1 изображены контрольные образцы и процесс испытаний.

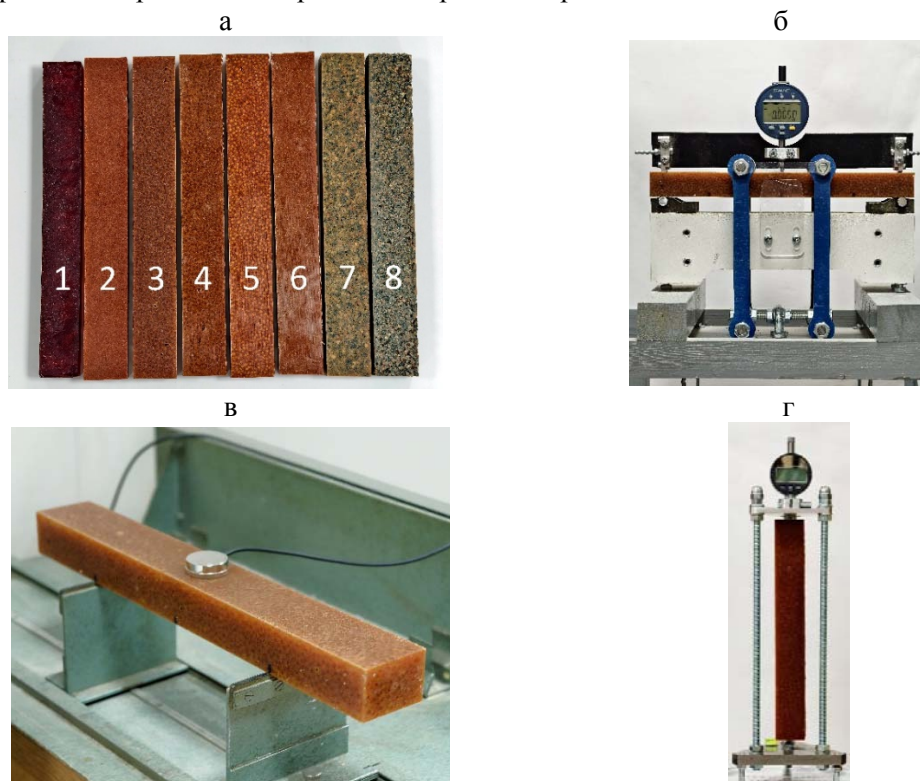


Рис. 1. Испытания полимербетона:

а – контрольные образцы; б – определение статической деформативности; в – определение динамического модуля упругости и величины демпфирования; г – определение КЛТР

На начальном этапе определялись физико-механические показатели эпоксидно-минеральной матрицы, которые составили: прочность при сжатии – 58,9 МПа; относительная деформация при максимальном напряжении сжатия – 4,4 %; прочность при растяжении – 14,9 МПа; относительная деформация при максимальном напряжении растяжения – 1,1 %; прочность при сдвиге – 8,7 МПа; прочность при отрыве – 1,57 МПа.

В таблицу сведены результаты определения следующих физико-механических и динамических характеристик экспериментальных составов: массы образца (m); объёмной степени наполнения (v); собственной частоты первой моды изгибных колебаний (ν); отношения динамического модуля упругости к статическому (E_d/E); КЛТР (α); логарифмического декремента затухания (δ); средней плотности (ρ_m).

Результаты определения характеристик образцов полимербетона

№ состава	m , г	ρ_m , кг/м ³	v , %	ν , Гц	E_d , ГПа	δ	E , ГПа	E_d/E	α , 10^{-6} C^{-1}
1	319	1110	0.0	533.8	3.14	0.190	-	-	74.4
2	551	1640	56.0	788.2	11.17	0.107	8.66	1.29	31.2
3	696	2070	76.8	1021.0	24.74	0.071	20.50	1.21	-
4	713	2100	76.8	1054.9	24.66	0.078	19.93	1.24	-
5	386	1150	76.8	712.8	6.57	0.086	5.31	1.24	24.7
6	679	2030	53.3	864.6	16.87	0.083	13.60	1.24	21.2
7	687	2050	69	998.9	22.57	0.082	18.97	1.19	19.1
8	708	2100	75.2	1102.1	28.15	0.072	23.92	1.18	18.5

Установлено, что покрытие частиц заполнителя парафиновой плёнкой позволяет приблизительно на 9 % повысить величину демпфирования при сохранении статической и динамической жёсткости материала, что, очевидно, связано с появлением дополнительного механизма диссипации механической энергии за счёт работы силы трения в переходных зонах композитного материала при относительном движении поверхности заполнителя и матрицы. Введение пористого заполнителя оказалось неэффективным из-за значительного снижения модуля упругости материала. Добавка металлической фибры повышает E_d в 1.5 раза и снижает демпфирование в 1,29 раза.

В целом установлено, что увеличение степени наполнения в диапазоне от 0 до 77 % приводит к росту собственной частоты колебаний образцов приблизительно в 2 раза, при этом динамический модуль упругости повышается от 3,14 до 22...28 ГПа, а величина демпфирования уменьшается в 2,2...2,6 раза. Статический модуль упругости состава 1 определить не удалось по причине высокой ползучести материала. Величина отношения E_d/E снижается при увеличении степени наполнения и составляет в среднем 1,23. Коэффициент линейного теплового расширения сильно коррелирует со степенью наполнения композита. Таким образом, оптимальное объёмное наполнение (~75 %) обеспечивает максимальную жёсткость и минимальную термическую деформацию композиционного материала при сохранении консистенции смеси, необходимой для формирования изделий по литьевой технологии.

Список литературы

1. Лавров, И.Ю. Перспективы применения цементных бетонов для изготовления базовых деталей станков / И.Ю. Лавров // Сборник материалов XV Международной научно-технической конференции «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов». – 2021. – С. 98–106.
2. Ashby, M.F. Materials selection in mechanical design / M.F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.): Elsevier/Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.
3. Suh, J.D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine / J.D. Suh, D.G. Lee // Int. J. Mech. Mater. Des. – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 113–121.
4. Dunaj, P. Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame / P. Dunaj, B. Powalka, S. Berczyński, M. Chodźko, T. Okulik // CIRP J. Manuf. Sci. Technol. – 2020. – Vol. 31. – P. 1–13.
5. Греков, Э.Л. Материалы для изготовления базовых деталей координатных-фрезерных станков с ЧПУ / Э.Л. Греков, М.В. Янушкин // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф., 31 янв.-2 февр. – 2018. – С. 2914–2919.
6. Möhring, H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // CIRP Ann. – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.
7. Лавров, И.Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – Вып. 0, № 12. – С. 42–48.
8. Лавров, И.Ю. Эпоксидные составы для защиты бетона и ремонта железобетонных конструкций / И.Ю. Лавров, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 2 (59). – С. 100–109.

References

1. Lavrov, I.Y. Prospects of using cement concretes for the manufacture of basic machine parts / I.Y. Lavrov // Proceedings of the XV International Scientific And Technical Conference Theory And Practice Of Improving The Efficiency Of Building Materials. – 2021. – P. 98–106.
2. Ashby, M.F. Materials selection in mechanical design / M.F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.): Elsevier/Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.

-
3. Suh, J.D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine / J.D.Suh, D.G. Lee // *Int. J. Mech. Mater. Des.* – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 113–121.
 4. Dunaj, P. Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame / P. Dunaj, B. Powalka, S. Berczyński, M. Chodźko, T. Okulik // *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 31. – P. 1–13.
 5. Grekov, E.L. Materials for manufacturing basic parts of coordinate CNC milling machines / E.L. Grekov, M.V. Yanushkin // *University complex as a regional center of education, science and culture : materials of the All-Russian Scientific Method. conference*, 31 Jan.-2 Feb. – 2018. – P. 2914–2919.
 6. Möhring, H.-C. Materials in machine tool structures / H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, F. Bleicher // *CIRP Ann.* – 2015. – Vol. 64, № 2. – P. 725–748.
 7. Lavrov, I.Yu. High-functional concretes for industrial construction and mechanical engineering / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // *Building Materials.* – 2024. – Issue 0, No. 12. – P. 42–48.
 8. Lavrov, I.Yu. Epoxy compounds for concrete protection and repair of reinforced concrete structures / I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy // *Regional Architecture And Engineering.* – 2024. – No. 2 (59). – P. 100–109.

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук,
кандидат исторических наук, зав. кафедрой
«Архитектура, реставрация и дизайн»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*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

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Кудишина Алина Эдуардовна,
студент
E-mail: i.a.naum@mail.ru

*Peoples' Friendship University of Russia named
after Patrice Lumumba*

Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6

Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Candidate
of Historical Sciences, Head of the Department
«Architecture, Restoration and Design»
E-mail: igor_garkin@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

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Kudishina Alina Eduardovna,
Student
E-mail: i.a.naum@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВИБРОЭКРАНОВ С УЧЕТОМ МНОГОСЛОЙНОСТИ ОСНОВАНИЯ И МНОЖЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ

И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, А.Э. Кудишина

Представлена усовершенствованная методика расчета параметров виброзащитных экранов для сложных инженерных условий. Предложен комплексный подход, учитывающий многослойность грунтовых оснований и влияние нескольких источников вибрации. На основе математического моделирования определены скорости распространения продольных и поперечных волн, длины волн колебаний в различных грунтах, а также оценена эффективность экранов при наличии нескольких источников вибрации. Результаты показывают, что учет слоистости основания и взаимодействия волновых полей от множественных источников существенно повышает точность прогнозирования эффективности виброзащитных мероприятий.

Ключевые слова: виброзащита, строительные конструкции, дифференциальные модели, волновые процессы, виброизоляционный экран, спектральный анализ, моделирование, численные методы, динамика грунта, экранирование

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALCULATION OF VIBRATION SCREENS TAKING INTO ACCOUNT THE MULTILAYERNESS OF THE BASE AND MULTIPLE SOURCES OF VIBRATION

I.N. Garkin, I.A. Garkina, A.E. Kudishina

The paper presents an improved method for calculating the parameters of vibration protection screens for complex engineering conditions. A comprehensive approach is proposed that takes into account the multi-layer nature of soil foundations and the influence of several vibration sources. Based on mathematical modeling, the propagation speeds of longitudinal and transverse waves, the

wavelengths of vibrations in various soils are determined, and the efficiency of screens in the presence of several vibration sources is estimated. The results show that taking into account the layering of the foundation and the interaction of wave fields from multiple sources significantly increases the accuracy of predicting the effectiveness of vibration protection measures.

Keywords: vibration protection, building structures, differential models, wave processes, vibration isolation screen, spectral analysis, modeling, numerical methods, soil dynamics, shielding

Введение. Защита зданий и сооружений от вибрационных воздействий представляет собой важную инженерную задачу, особенно актуальную в условиях плотной городской застройки и на промышленных площадках. Традиционные методы расчета виброэкранов, основанные на классических дифференциальных уравнениях движения [1–3], зачастую предполагают однородность, изотропность основания и неизменность модулей упругости и плотности грунта в пределах влияния вибрационных волн.

Однако в реальных условиях необходимо учитывать наложение различных типов грунтов, возможные водонасыщения и эффективность экранов различной конструкции. Кроме того, на строительных площадках могут одновременно работать несколько вибрационных машин, создающих сложную интерференционную картину волновых полей [4].

Методы. В рамках исследования был применен комплексный подход, сочетающий аналитические расчеты и элементы численного моделирования. Для учета многослойности грунтового основания использована двумерная модель распространения волн с учетом импеданса слоев. Модель основана на следующих допущениях:

- грунтовое основание представлено двумя слоями с различными физико-механическими характеристиками;
- источники вибрации рассматриваются как точечные с заданными частотами и амплитудами;
- распространение волн подчиняется закону экспоненциального затухания.

Для расчета скоростей распространения продольных (α) и поперечных (β) волн были использованы следующие формулы:

$$\alpha = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}},$$

где E – модуль упругости грунта; σ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность грунта.

Для оценки эффективности экрана в условиях многослойного основания применялась теория отражения волн на границе сред с различными импедансами ($Z = \rho c$) через вычисление коэффициентов отражения (R) и пропускания (T):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1},$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}.$$

Для моделирования суперпозиции волновых полей от нескольких источников вибрации учитывалось экспоненциальное затухание амплитуд с расстоянием:

$$A' = A * e^{-\alpha * r},$$

где A' – амплитуда в точке наблюдения; A – исходная амплитуда источника, α – коэффициент поглощения; r – расстояние от источника до точки наблюдения.

Результаты. В ходе исследования рассмотрена модель грунтового основания, состоящая из двух слоев: верхний слой – глина мягкопластичная ($E_1=5$ МПа, $\sigma_1=0,4$,

$\rho_1=1800 \text{ кг/м}^3$) толщиной $h_1=10 \text{ м}$; слой, подстилаемый известняком ($E_2=25 \text{ МПа}$, $\sigma_2=0,2$, $\rho_2=2400 \text{ кг/м}^3$).

Расчет скоростей волн для глинистого слоя показал:

- скорость продольных волн $a_1 \approx 77,2 \text{ м/с}$;
- скорость поперечных волн $b_1 \approx 31,5 \text{ м/с}$.

Для известнякового слоя:

- скорость продольных волн $a_2 \approx 107,6 \text{ м/с}$;
- скорость поперечных волн $b_2 \approx 65,9 \text{ м/с}$.

Длины волн для основной частоты возбуждения ($\omega = 42 \text{ с}^{-1}$) составили:

- для глины: λ_1 (продольная) $\approx 1,84 \text{ м}$, λ_1 (поперечная) $\approx 0,75 \text{ м}$;
- для известняка: λ_2 (продольная) $\approx 2,56 \text{ м}$, λ_2 (поперечная) $\approx 1,57 \text{ м}$.

При моделировании воздействия двух вибрационных машин с частотами $\omega_1=42 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2=36 \text{ с}^{-1}$, амплитудами возбуждения $A_1=1,5 \text{ мм}$ и $A_2=0,8 \text{ мм}$, находящихся на расстояниях $r_1=20 \text{ м}$ и $r_2=25 \text{ м}$ от точки наблюдения, были получены следующие результаты:

Амплитуды в точке наблюдения для отдельно взятого источника с учетом затухания ($\alpha=0,04 \text{ м}^{-1}$):

- $A_1' \approx 0,67 \text{ мм}$;
- $A_2' \approx 0,29 \text{ мм}$.

Суммарная амплитуда колебаний при синфазном сложении $A_{\text{total}} \approx 0,96 \text{ мм}$.

Анализ взаимодействия волн на границе слоев показал, что для поперечной волны коэффициент отражения составляет $R \approx 0,47$, что означает отражение 47 % волновой энергии на границе слоев, в то время как 53 % проникает во второй слой.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют важность учета многослойности грунтового основания при проектировании виброзащитных экранов. Существенная разница в скоростях распространения волн в различных слоях грунта (77,2 м/с против 107,6 м/с для продольных волн и 31,5 м/с против 65,9 м/с для поперечных) определяет не только глубину проникновения вибрационного воздействия, но и эффективность экранирующих конструкций.

Особого внимания заслуживает тот факт, что на границе между глиной и известняком происходит значительное отражение волновой энергии (47 %), что необходимо учитывать при расчете глубины заложения экрана. При недостаточной глубине заложения экрана возможно проникновение вибрационных волн под экран с последующим их распространением к защищаемому объекту.

Анализ суперпозиции волновых полей от нескольких источников вибрации показывает, что суммарная амплитуда колебаний в точке наблюдения может быть значительно выше, чем от каждого источника в отдельности (0,96 мм против 0,67 мм и 0,29 мм). При этом следует отметить, что в реальных условиях могут возникать сложные интерференционные картины биения и модуляции колебательного процесса [5, 6].

Разработанная методика позволяет более точно прогнозировать эффективность виброзащитных экранов в сложных инженерных ситуациях, однако имеет ряд ограничений. В частности, не учитываются пространственные эффекты и динамические взаимодействия фундаментных систем в условиях плотной застройки. Для преодоления этих ограничений перспективным направлением является применение комплексных численных моделей, включающих методы конечно-элементного анализа, метод граничных элементов и спектральные методы.

Заключение. В работе представлена усовершенствованная методика расчета виброзащитных экранов, учитывающая многослойность грунтового основания и влияние нескольких источников вибрации. Полученные результаты показывают, что эффективность виброэкранов существенно зависит от правильного учета физико-механических характеристик слоев грунта, их взаимодействия, сложения вибрационных полей от нескольких источников.

Для дальнейшего развития методики целесообразно рассмотреть возможности оптимизации параметров экранов для комплексных инженерных ситуаций с учетом

пространственной неоднородности основания, а также оценить влияние нескольких источников вибрации и вторичных эффектов, возникающих во взаимодействии фундаментных систем в условиях плотной застройки.

Оптимальным путем дальнейшего развития методики является использование комплексных численных моделей, которые позволят не только повысить точность расчета параметров экрана в сложных инженерных ситуациях, но и расширить область применения к задачам защиты зданий на ограниченных по площади площадках в условиях плотной застройки.

Интеграция качественного инженерного обследования, грамотных вычислений с учетом специфики объекта, а также современных численных методов может обеспечить надежную защиту зданий и конструкций от вибрационного воздействия, соответствующую современным требованиям безопасности, экономичности и эксплуатационной надежности.

Список литературы

1. Евсеев, А.Е. Использование дифференциальных уравнений движения тела при определении параметров виброзащиты / А.Е. Евсеев, И.Н. Гарькин, Э.Ю. Абдуллазянов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 4 (50). – С. 127–131.
2. Саденко, Д.С. Виброметрические методы диагностики строительных конструкций / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 3 (59). – С. 175–189.
3. Евсеев, А.Е. Способ получения матрицы жёсткости стержневого конечного элемента для деформационного расчета по дифференциальному уравнению / А.Е. Евсеев, И.Н. Гарькин, Ф.М. Ахметов // Системные технологии. – 2024. – № 2 (51). – С. 5–13.
4. Кузин, Н.Я. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий / Н.Я. Кузин, С.Г. Багдоев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С.79–82.
5. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия идеально упругопластической сплошной среды для осесимметричного деформирования при аппроксимации диаграмм объемного и сдвигового деформирования квадратичными функциями. Часть 1 / С.В. Бакушев // Приволжский научный журнал. – 2024. – № 2 (70). – С. 121–131.
6. Евсеев, А.Е. Построение матрицы жёсткости сжато-изогнутого стержня по дифференциальному уравнению / А.Е. Евсеев, И.А. Евсеев, В.М. Машин // Моделирование и механика конструкций. – 2022. – № 15. – С. 43–47.

References

1. Evseev, A.E. Using differential equations of body motion in determining vibration protection parameters / A.E. Evseev, I.N. Garkin, E.Yu. Abdullazyanov // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2024. – No. 4 (50). – P. 127–131
2. Sadenko, D.S. Vibrometric methods for diagnostics of building structures / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. – 2023. – Vol. 15, No. 3 (59). – P. 175–189.
3. Evseev, A.E. Method for obtaining the stiffness matrix of a rod finite element for deformation calculation using a differential equation / A.E. Evseev, I.N. Garkin, F.M. Akhmetov // System technologies. – 2024. – No. 2 (51). – P. 5–13.
4. Kuzin, N.Ya. Assessment of external factors on the bearing capacity of civil building structures / N.Ya. Kuzin, S.G. Bagdоеv // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 2. – P. 79–82.
5. Bakushev, S.V. Differential equilibrium equations of an ideally elastic-plastic continuous medium for axisymmetric deformation when approximating volumetric and shear

deformation diagrams by quadratic functions. Part 1 / S.V. Bakushev // Privolzhsky Scientific Journal. – 2024. – No. 2 (70). – P. 121–131.

6. Evseev, A.E. Construction of the stiffness matrix of a compressed-bent rod using a differential equation / A.E. Evseev, I.A. Evseev, V.M. Mashin // Modeling and mechanics of structures. – 2022. – No. 15. – P. 43–47.

*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

Колесников Никита Викторович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

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

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

Kolesnikov Nikita Viktorovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»
E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

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

ПРИМЕНЕНИЕ ШАЙБ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.О. Мартышкин, И.В. Залилов, Н.В. Колесников, А.В. Меркушов

Рассмотрены соединения деревянных конструкций с применением шайб из различных материалов, а также соединения с металлическими и композитными шайбами. Представлены результаты испытаний образцов с шайбами при действии кратковременной нагрузки. Установлены величины несущей способности и критерий разрушения образцов. Показаны области применения несущих деревянных конструкций с шайбами из различных материалов.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, шайба, металл, стеклопластик, пластик, несущая способность

THE USE OF WASHERS MADE OF VARIOUS MATERIALS IN JOINTS OF WOODEN STRUCTURES

D.O. Martyshkin, I.V. Zalilov, N.V. Kolesnikov, A.V. Merkushov

The connections of wooden structures using washers made of various materials are considered. Connections with metal and composite washers are presented. The results of testing samples with washers under short-term load are presented. The values of the bearing capacity and the criterion of destruction of the samples are established. The fields of application of load-bearing wooden structures with washers made of various materials are presented.

Keywords: wooden structures, joints, washers, metal, fiberglass, plastic, bearing capacity

В современной практике строительства наиболее распространёнными решениями узловых соединений деревянных конструкций (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 с внутренней резьбой [7], а также клеенные

шайбы из стеклотекстолита КАСТ-В и СТЭФ [8-9] и пластиков Res Formax, Res Friction [10]. Шайбы из металла и стеклотекстолита изготавливаются в заводских условиях, пластиковые – с применением аддитивных технологий. Общий вид металлических шайб показан на рис. 1.

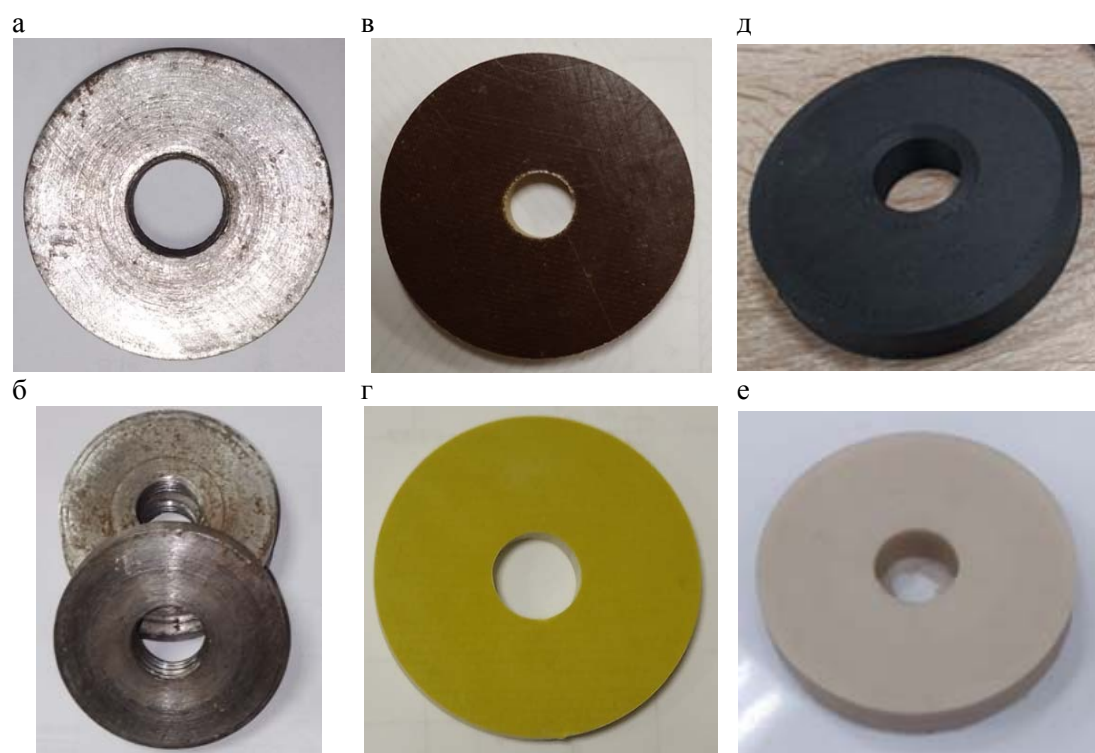


Рис. 1. Общий вид шайб:

а – металлические; б – металлические с внутренней резьбой; в – стеклотекстолит КАСТ-В; г – стеклотекстолит СТЭФ; д – пластик REC Formax; е – пластик REC Friction

Технология изготовления соединений с использованием шайб достаточно проста и предполагает вклеивание шайбы заподлицо в тело древесины. При этом гнездо предварительно заполняется клеевой смесью на основе эпоксидной смолы ЭД-20, которая после отверждения создает монолитное соединение шайбы с древесиной и обеспечивает упрочнение контактной поверхности. Для обеспечения безопасной работы древесины и исключения скалывания под центровочным болтом в тело древесины вклеиваются металлические (рис. 1, а, б), стеклотекстолитовые (рис. 1, в, г) и пластиковые (рис. 1, д, е) шайбы. Металлические шайбы с внутренней резьбой вкладываются в гнездо древесины и стягиваются болтом.

Практическая применимость металлических и композитных шайб подтверждена на основе натурных испытаний образцов [6-10]. Схема испытаний и общий вид образцов показаны на рис. 2.

Образцы испытывались на сжатие с равномерной нагрузкой до полного разрушения. В процессе испытаний фиксировались величины нагрузок и деформации образцов. Графики распределения деформаций сдвига в образцах на вклеенных шайбах (рис. 3–5) представлены для трехсоставных образцов с вклеенными металлическими шайбами и односоставных с вклеенными стеклопластиковыми и пластиковыми шайбами. Характер работы и величины разрушающих нагрузок для трехсоставных (рис. 2, а) и образцов, испытанных через металлическую раму (накладку) (рис. 2, б), различаются незначительно [8]. Для обеспечения коррозионной стойкости в соединениях деревянных конструкций целесообразно использовать болты, оцинкованные или подвергшиеся гальванической обработке. В качестве альтернативы – болты из композитных материалов [11].

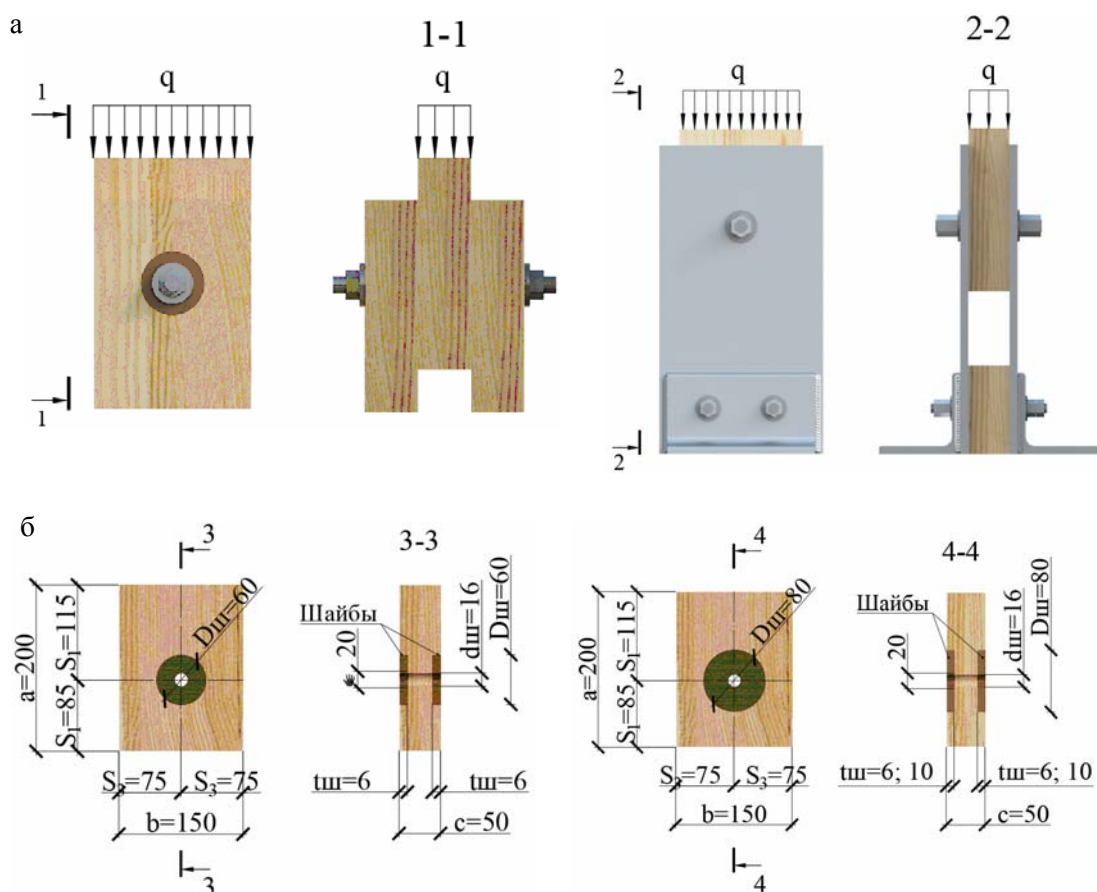


Рис. 2. Испытания образцов на клеенных шайбах:

а – схема нагружения одноставного и трехставного образцов через металлические накладки; б – общий вид и размеры образцов

Согласно графикам распределения деформаций, у металлических шайб (рис. 3, а) присутствуют колебания при нагружении до 15 кН, что объясняется обмятием внутреннего отверстия шайб под центровым болтом, после чего происходит линейный рост нагрузки и деформаций. У шайб с внутренней резьбой (рис. 3, б) отмечаются рост нагрузки и отсутствие деформаций, после чего наблюдается скачкообразный рост нагрузки, что объясняется возникновением распора в болте и шайбах.

В [9] установлено, что разрушающая нагрузка образцов на клеенных стеклопластиковых шайбах принята при деформациях, не превышающих 2 мм (см. рис. 3-5). С учетом полученных данных, средняя разрушающая нагрузка (несущая способность (НС)) образцов равна:

- металлические шайбы ВШ-60-6-Б – 56,25 кН, ВШ-80-6-Б – 62,5 кН, ВШ-80-10-Б – 60,0 кН;
- металлические шайбы с внутренней резьбой ШР-60-6 – 61,21 кН, ШР-80-6 – 68,57 кН, ШР -80-10 – 84,82 кН.

Величины несущей способности пары шайб с внутренней резьбой выше, чем у клеенных металлических, что объясняется отсутствием клеевой прослойки и возникновением горизонтального распора. Это, в свою очередь, увеличивает трение у внутренней поверхности гнезда древесины. Отмечается, что шайба в процессе испытаний не разрушается.

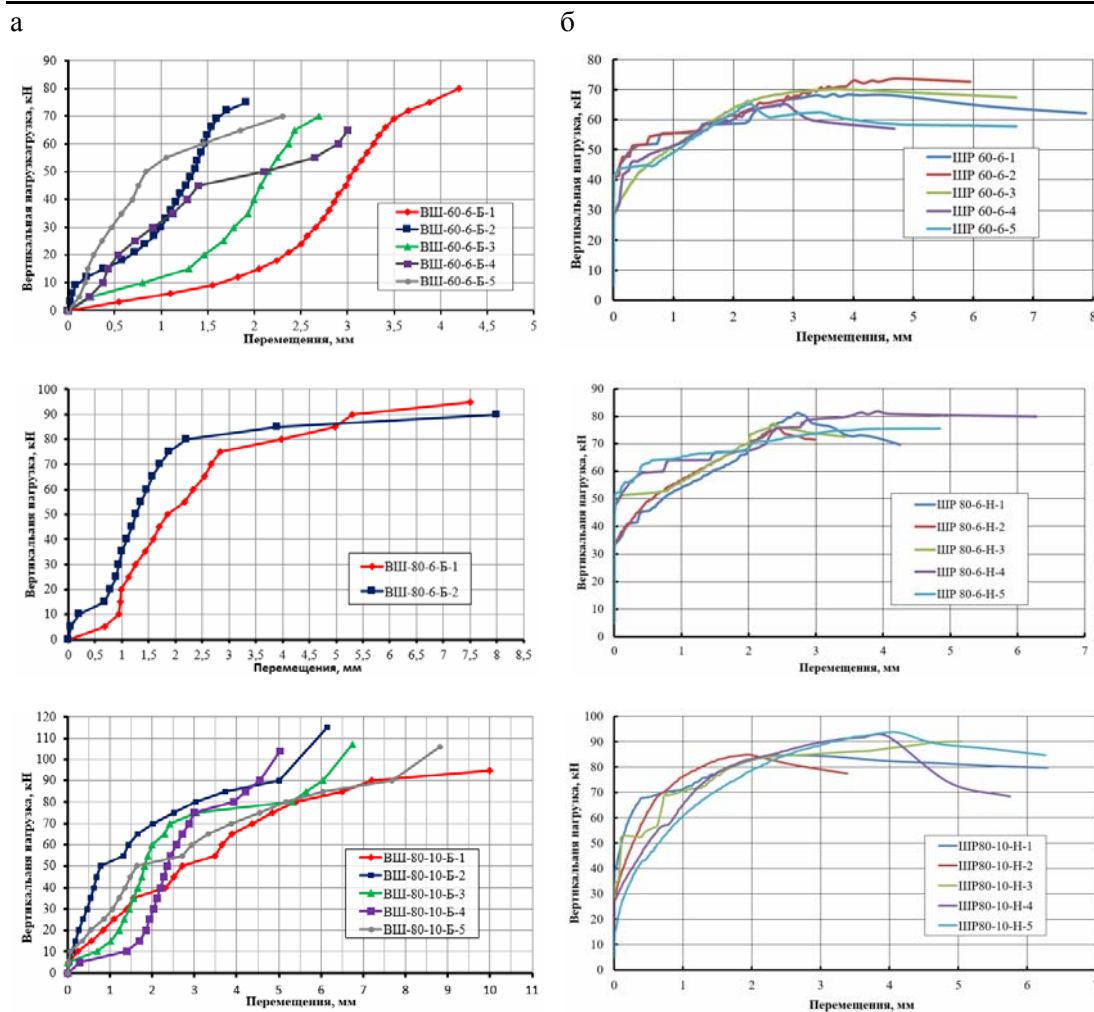


Рис. 3. Деформации сдвига в образцах на клеенных металлических шайбах без внутренней резьбы (а) и шайбах с внутренней резьбой (б)

Согласно рис. 4, характер работы образцов с клееными шайбами из стеклотекстолитов КАСТ-В и СТЭФ аналогичен. При нагружении образцов происходит обмятие шайб по аналогии с металлическими (см. рис. 3, а), далее отмечается линейный рост нагрузки и деформаций. Деформации сдвига в образцах на клеенных из стеклотекстолита СТЭФ шайбах (см. рис. 3, б) представлены для первичных испытаний. За разрушающую нагрузку (несущую способность) принимается такая 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 равна:

- 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 рассмотрим деформации сдвига при испытаниях образцов с клееными пластиковыми шайбами (рис. 5) [10].

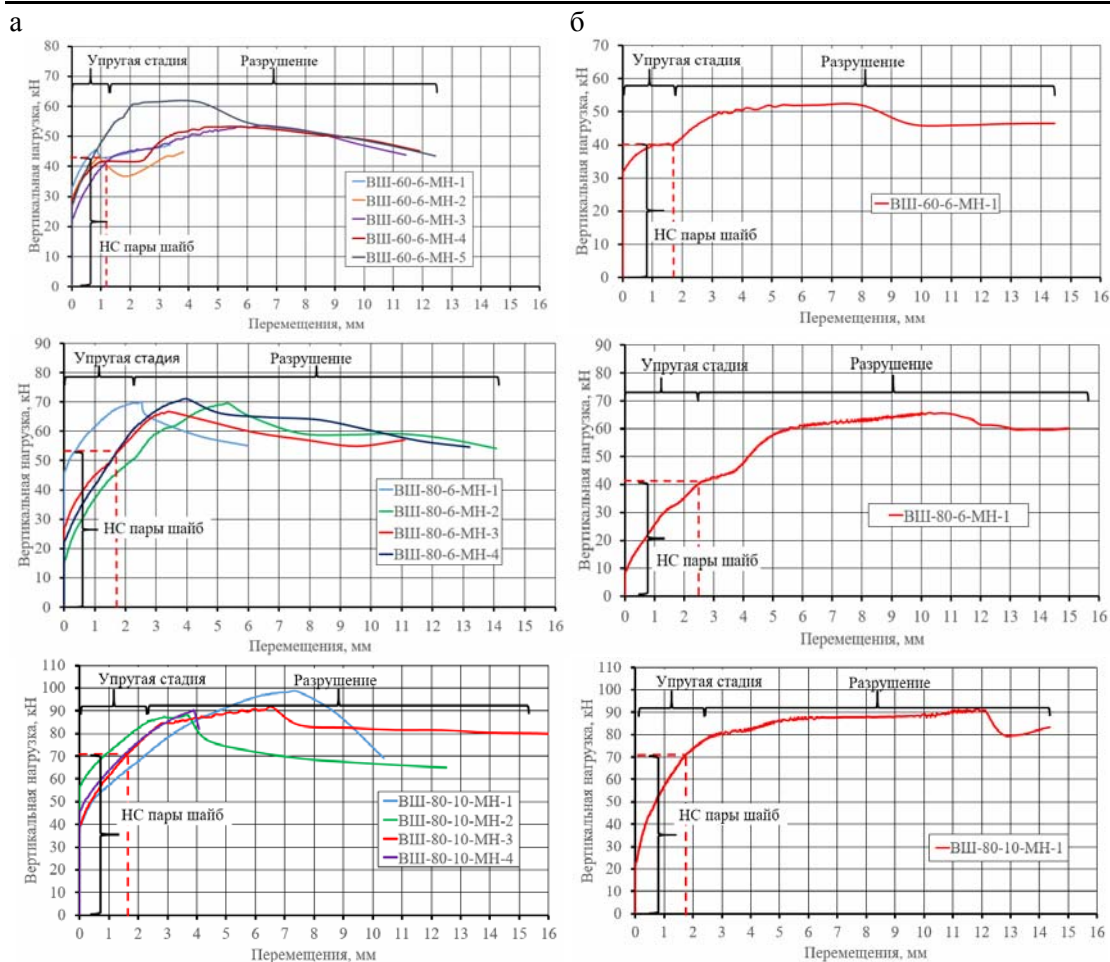


Рис. 4. Деформации сдвига в образцах на клеенных стеклотекстолитовых шайбах КАСТ-В (а) и СТЭФ (б)

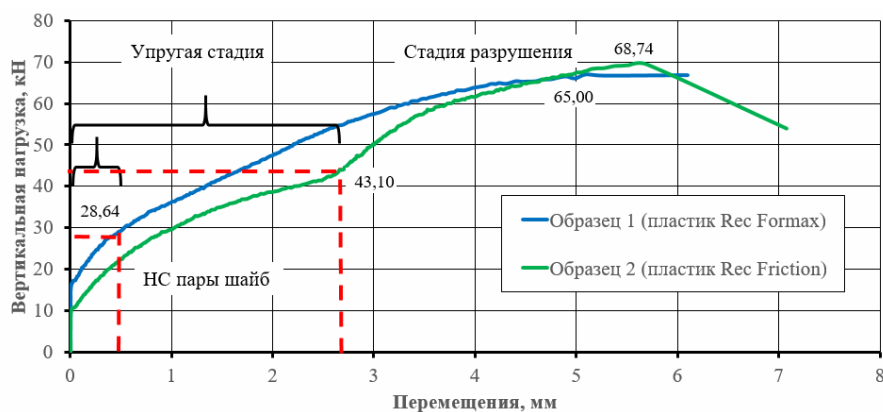


Рис. 5. Деформации сдвига в образцах на клеенных шайбах из пластиков Rec Formax, Rec Friction

Как видно из графика (см. рис. 5), деформации в образце 1 возникают при нагрузке 15,86 кН, в образце 2 – при нагрузке 10,08 кН. При дальнейшем нагружении наблюдается рост деформаций: образец 1 – до нагрузки 28,16 кН и полученных перемещениях 0,43 мм, образец 2 – до нагрузки 43,10 кН и полученных перемещениях 2,63 мм, что можно считать упругой работой и принять за несущую способность пары шайб. Далее происходит смятие шайб (без разрушения), о чем свидетельствует перегиб на графике, и в работу включается древесина, что было отмечено при испытаниях. Очевидно, это связано с пониженными значениями прочности и модуля упругости

пластиков. Затем наблюдается значительный рост деформаций при увеличении нагрузки до полного разрушения образцов по аналогии с образцами с клееными стеклотекстолитовыми шайбами (см. рис. 4).

Таким образом, согласно результатам испытаний образцов с металлическими и композитными шайбами установлена удовлетворительная несущая способность. В связи с чем соединения с применением шайб из различных материалов целесообразно использовать в несущих деревянных конструкциях (фермы, рамы, арки, балки). Также следует отметить, что применение шайб позволяет выполнять конструкции в сборно-разборном виде. Шайбы и центровой болт, изготовленные из композитных материалов, целесообразно использовать в объектах с агрессивной средой.

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. Клееные 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 клеиметаллических соединений деревянных конструкций с применением стальных шайб : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Арискин Максим Васильевич. – Пенза : ПГУАС, 2011. – 190 с.
7. Ванин, И.В. Соединение деревянных конструкций с применением клеенных стальных шайб с внутренней резьбой / И.В. Ванин, М.В. Арискин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2022. – №4(35). – С. 30–39.
8. 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.
9. 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.
10. Арискин, М.В. Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций / М.В. Арискин, И.В. Залилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №3(56). – С. 144–151.
11. 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.

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 sciences: 05.23.01/ Ariskin Maxim Vasilyevich. – Penza : PGUAS, 2011. – 190 p.
 7. 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.
 8. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and construction. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.
 9. 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.
 10. Ariskin, M.V. Additive technologies in the manufacture of washers for joints of wooden structures / M.V. Ariskin, I.V. Zalilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – No3(56). – P. 144–151.
 11. 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.