

Статья поступила в редакцию: 09.06.2026

Статья принята к публикации: 16.06.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 691.3+666.9

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23016

## Влияние микроволокон волластонита на свойства цементных композитов

**Сатторов Зафар Мурадович**  
проф.

*Кафедры Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-строительный университет  
Республика Узбекистан, г. Ташкент  
E-mail: mr.s.zafar@mail.ru*

**Отажонов Олмосбек Аскарали угли**  
*ст. преп., Ферганский государственный технический университет  
Республика Узбекистан, г. Фергана  
E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com*

## The effect of wollastonite microfibers on the properties of cement composites

**Sattorov Zafar Muradovich**  
*prof. of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of  
Architecture and Civil Engineering  
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

**Otajonov Olmosbek Askarali ugli**  
*senior Lecturer  
Fergana State Technical University  
Republic of Uzbekistan, Fergana*

### Аннотация

В данной статье представлен анализ современных исследований, посвящённых применению микроволокон волластонита в цементных композиционных материалах и газобетоне. Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения расхода природных ресурсов и уменьшения выбросов углекислого газа, связанных с производством цемента. В качестве перспективного минерального компонента рассматриваются микроволокна волластонита — природного минерала на основе метасиликата кальция, обладающего высокими эксплуатационными и экологическими преимуществами. На основе обзора научной литературы рассмотрено влияние волластонитовых микроволокон на процессы схватывания цементных композитов, прочность при сжатии, карбонизацию, а также на формирование микроструктуры материала. Установлено, что введение волластонита

---

**Библиографическое описание:** Сатторов З.М., Отажонов О.А.У. Влияние микроволокон волластонита на свойства цементных композитов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23016>

оказывает существенное влияние на свойства цементных систем. При оптимальном содержании микроволокон наблюдается уплотнение структуры цементного камня, повышение трещиностойкости, улучшение прочности при изгибе и увеличение долговечности композитов. Результаты электронно-микроскопических исследований подтверждают армирующую функцию волластонитовых волокон и их способность препятствовать развитию и распространению микротрещин. Проведённый анализ показал, что наиболее эффективным является замещение цемента волластонитовыми микроволокнами в количестве 5–15 %. При превышении данного уровня возможно снижение прочности при сжатии вследствие уменьшения количества продуктов гидратации цемента. Отмечено также, что применение волластонита способствует сокращению расхода цемента и снижению экологической нагрузки на окружающую среду. Полученные результаты подтверждают перспективность использования микроволокон волластонита при разработке современных энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов.

### Abstract

This article presents an analysis of recent studies devoted to the application of wollastonite microfibers in cement-based composite materials and aerated concrete. The relevance of the research is associated with the need to reduce the consumption of natural resources and decrease carbon dioxide emissions related to cement production. Wollastonite microfibers, a natural calcium metasilicate mineral with favorable mechanical and environmental properties, are considered a promising mineral additive for sustainable construction materials.

Based on a review of scientific literature, the influence of wollastonite microfibers on the setting behavior of cement composites, compressive strength, carbonation processes, and microstructure development was investigated. The analysis revealed that the incorporation of wollastonite significantly affects the properties of cementitious systems. At optimal dosage levels, wollastonite microfibers contribute to the densification of the cement matrix, enhancement of crack resistance, improvement of flexural strength, and increased durability of composite materials. Scanning electron microscopy studies confirmed the reinforcing role of wollastonite fibers and their ability to inhibit the initiation and propagation of microcracks within the cement matrix.

The conducted review demonstrated that the most effective replacement level of cement with wollastonite microfibers ranges from 5 % to 15 %. Higher replacement ratios may lead to a reduction in compressive strength due to the decreased formation of cement hydration products. Furthermore, the use of wollastonite contributes to lowering cement consumption and reducing the environmental impact of construction materials. The obtained results confirm the potential of wollastonite microfibers for the development of modern energy-efficient, durable, and environmentally friendly building materials.

**Ключевые слова:** цементный композит, волластонит, газобетон, время схватывания, прочность, карбонизация.

**Keywords:** cementitious composite, wollastonite, aerated concrete, setting time, strength, carbonation.

## Введение

Бурное развитие бетонной промышленности сопровождается значительным потреблением природных ресурсов и оказывает существенное воздействие на окружающую среду. В связи с этим в последние годы особое внимание уделяется поиску альтернативных материалов, способных частично заменить цемент и природный песок в составе бетонных смесей, что позволяет повысить экологическую устойчивость строительных материалов.

Одним из перспективных направлений является использование микроволокон волластонита — природного минерала на основе метасиликата кальция, обладающего широким распространением и доступной сырьевой базой. Благодаря своим физико-механическим характеристикам волластонит может применяться в качестве частичной замены цемента в цементных композиционных материалах. В последние годы данное направление исследований привлекает всё больший интерес научного сообщества во многих странах мира.

Газобетон представляет собой легкий пористый строительный материал, обладающий высокими теплоизоляционными свойствами и способностью поглощать ударную энергию. Благодаря этим качествам он широко применяется в системах наружного утепления зданий, при устройстве оснований, шумозащитных и аэродромных конструкциях, а также в других инженерных сооружениях. По сравнению с традиционным бетоном, газобетон лучше отвечает современным требованиям энергоэффективности и экологической безопасности строительства.

Однако затвердевший газобетон характеризуется развитой многомасштабной пористой структурой, вследствие чего он более подвержен образованию трещин под действием нагрузок, температурных колебаний и влажности по сравнению с обычными бетонами. Возникновение микротрещин негативно отражается на его эксплуатационных характеристиках.

Для повышения прочности и трещиностойкости газобетона в его структуру вводят равномерно распределенные волокна. Такие волокна способны уменьшать усадку при высыхании, повышать прочность на растяжение и сжатие, улучшать пластичность, вязкость разрушения и препятствовать развитию микротрещин. Волокнистое армирование делает процесс разрушения материала менее хрупким.

Волокна, применяемые для модификации газобетона, подразделяются на макроволокна, микроволокна и нановолокна. К макроволокнам относятся неорганические волокна (базальтовые, стеклянные, керамические, металлические) и органические волокна (полипропиленовые, поливинилспиртовые и др.). В качестве нановолокон наиболее часто используют углеродные нанотрубки и графеновые наноструктуры.

Большинство микроволокон волластонита получают путем переработки природной руды, образовавшейся в результате взаимодействия кремнезема и известняка при высокотемпературных магматических процессах. Производство порошка волластонита включает дробление, сортировку, обогащение и последующий помол до получения различных фракций.

Крупнейшими мировыми производителями волластонита являются Китай и США. Начиная с 1970-х годов, волластонит активно используется в промышленности как безопасная альтернатива асбесту. Согласно токсикологическим исследованиям, максимально допустимая концентрация волластонитовой пыли в воздухе примерно в два раза выше, чем для асбеста, что свидетельствует о значительно меньшей опасности материала. Учёные, изучая токсикологические и эпидемиологические аспекты применения волластонита, пришли к выводу о его относительной безопасности для здоровья человека.

Волластонит отличается хорошей биосовместимостью, низким коэффициентом теплового расширения, невысокой теплопроводностью и высокой термической стабильностью. Кроме того, его использование способствует улучшению механических характеристик материалов. Добавление волластонитовых микроволокон позволяет повысить трещиностойкость, прочность на растяжение и вязкость разрушения цементных материалов. В исследовании Лу [10] было установлено, что замещение до 7 % цемента волластонитом способствует улучшению микроструктуры и снижению усадочных деформаций цементных композитов.

С экологической точки зрения использование волластонитовые микроволокна в цементных материалах позволяет уменьшить расход цемента и сократить выбросы  $\text{CO}_2$ , возникающие при его производстве. Поэтому применение волластонита в строительных композитах вызывает все больший интерес у исследователей. Несмотря на большое количество исследований, посвященных использованию волластонитовые микроволокна в цементных материалах, применение волластонитовых микроволокон для модификации газобетона до настоящего времени изучено недостаточно.

### Материалы и методы

**Время схватывания.** Применение микроволокон волластонита в качестве добавки к композиционным материалам на основе обычного портландцемента (ОПС) оказывает существенное влияние на время схватывания смесей. В исследовании Ransinchung и Kumar [12] изучалось влияние различных дозировок микроволокон волластонита на время схватывания цементных композитов. Экспериментальные результаты показали, что при одинаковой нормальной густоте цементного теста увеличение содержания микроволокон волластонита приводит к увеличению как начального, так и конечного времени схватывания.

Для смесей ОПС–волластонит–микрокремнезем наблюдалась обратная тенденция: повышение содержания микрокремнезема сокращало время схватывания. Это объясняется тем, что введение микрокремнезема увеличивает количество активного  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$  в системе, что ускоряет процессы гидратации цемента.

Согласно данным Wahab и соавт. [16], при постоянном водоцементном отношении 0,5 введение микроволокон волластонита вместо цемента в количестве 10 %, 20 % и 30 % увеличивало начальное время схватывания соответственно на 1,3 %, 2,7 % и 4,6 %. В целом повышение доли волластонитовых микроволокон в составе цементного композита приводит к замедлению процессов схватывания. С одной стороны, это связано с эффектом разбавления:



уменьшается количество цемента на единицу объема смеси [12]. С другой стороны, ультратонкие волокна образуют плотные оболочки вокруг цементных частиц, препятствуя проникновению воды и замедляя гидратацию цемента [16].

Прочность при сжатии. Количество микроволокон волластонита существенно влияет на прочность цементных композитов при сжатии. По данным Wahab и соавт. [16], при замещении цемента волластонитовыми микроволокнами на 10 %, 20 % и 30 % прочность раствора в возрасте 28 суток уменьшалась соответственно на 12 %, 35 % и 35 % по сравнению с контрольным составом. Аналогичные результаты были получены Ransinchung и соавт. [12], которые также отметили значительное снижение прочности при увеличении содержания волластонита.

В ряде исследований установлено, что введение волластонитовых микроволокон лишь незначительно снижает прочность композитов. Так, Khan и соавт. [7] показали, что при замещении 30 % цемента микроволокнами размером 3,5 мкм прочность раствора на сжатие снизилась всего на 3 % через 7 суток и на 10 % через 28 суток. Zareei и соавт. [18] установили, что бетон с содержанием 50 % волластонитовых микроволокон имел прочность всего на 6 % ниже контрольного образца в возрасте 28 суток.

Снижение прочности объясняется уменьшением количества гидросиликатов кальция (C-S-H-геля), образующихся в процессе гидратации цемента. Эффект наполнителя, создаваемый микроволокнами, не способен полностью компенсировать снижение объема гидратационных продуктов.

Несмотря на это, отдельные исследования показывают положительное влияние волластонита на раннюю прочность. Soliman и Nehdi [14] установили, что ультравысокопрочный бетон (UHPC), содержащий 4 % и 12 % микроволокон волластонита, через 12 часов демонстрировал увеличение прочности примерно на 21 % и 61 % соответственно по сравнению с контрольным составом. Авторы связывают это с армирующим и мостиковым эффектом микроволокон.

По данным Wahab и соавт. [16], при замещении цемента на 10 %, 20 % и 30 % прочность раствора через 2 суток увеличивалась на 24 %, 64 % и 63 % соответственно. Это объясняется уплотнением структуры цементного камня за счет эффекта заполнителя.

Некоторые исследования посвящены также долговременной прочности. Mathur и соавт. [11] сообщили об увеличении прочности бетона на 28–35 % при введении 10 % микроволокон волластонита через 28 и 56 суток твердения. Kalla и соавт. исследовали бетон с различным содержанием волластонита (5–25 %) и установили, что прочность через 90 суток сначала возрастала, а затем снижалась. Максимальные значения были достигнуты при содержании волластонита около 10 %. При превышении уровня 15 % прочность становилась ниже, чем у контрольного бетона.

Yücel и соавт. [17] получили синтетический волластонит из кварца и кальцита и исследовали его влияние на прочность растворов. При содержании синтетического волластонита 9 % прочность на сжатие увеличивалась на 42,8 % через 7 суток и на 39,7 % через 28 суток по сравнению с контрольным составом. Высокая эффективность была обусловлена повышенной активностью синтетического материала.

Размер частиц волластонита также оказывает заметное влияние. Khan и соавт. [7] показали, что микроволокна размером 3,5 мкм обеспечивали более высокую прочность по сравнению с частицами размером 9 мкм. Deу и соавт. [3] установили, что оптимальное содержание составляло 5 % для крупных волокон (2000 и 850 мкм) и 10 % для мелких волокон (55 и 33 мкм).

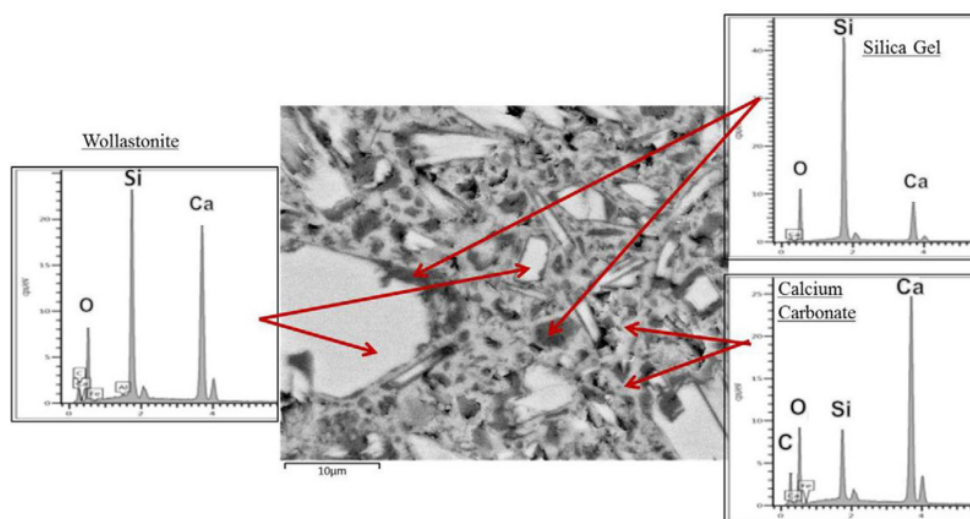
Карбонизация. Карбонизация цементных композитов представляет собой физико-химический процесс взаимодействия углекислого газа воздуха с продуктами гидратации цемента. В результате уменьшается содержание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , снижается pH порового раствора, повышается вероятность коррозии арматуры и образования трещин в железобетонных конструкциях [13].

Kalla и соавт. [5, 6] исследовали глубину карбонизации бетонов с различными водоцементными отношениями и содержанием волластонитовых микроволокон. Было установлено, что глубина карбонизации возрастает с увеличением возраста карбонизации и водоцементного отношения. Однако введение 5–15 % микроволокон волластонита способствовало снижению глубины карбонизации.

Карбонизация может использоваться и как способ твердения материалов с одновременным связыванием  $\text{CO}_2$  [19]. Huang и соавт. [4] проводили ускоренную карбонизацию волластонит-портландцементных композитов в герметичной камере с атмосферой  $\text{CO}_2$  чистотой более 99 %. Продолжительность обработки составляла 10, 30 и 120 минут при давлении 0,5–2,5 МПа.

Результаты показали, что при умеренном давлении поглощение  $\text{CO}_2$  достигало 20 %. При этом прочность при сжатии возрастала до 80 МПа, что более чем на 350 % превышало показатели образцов, твердеющих в воздушной среде.

Ashraf и соавт. [2] с использованием методов XRD, SEM/EDS, статистического наноиндентирования и микромеханического моделирования установили, что карбонизация волластонита приводит к образованию карбоната кальция и аморфного силикагеля (Рисунок 1). Авторы также отметили, что модуль упругости карбонизированных паст увеличивается с ростом степени карбонизации. Аналогичные выводы были получены Svensson и соавт. [15].



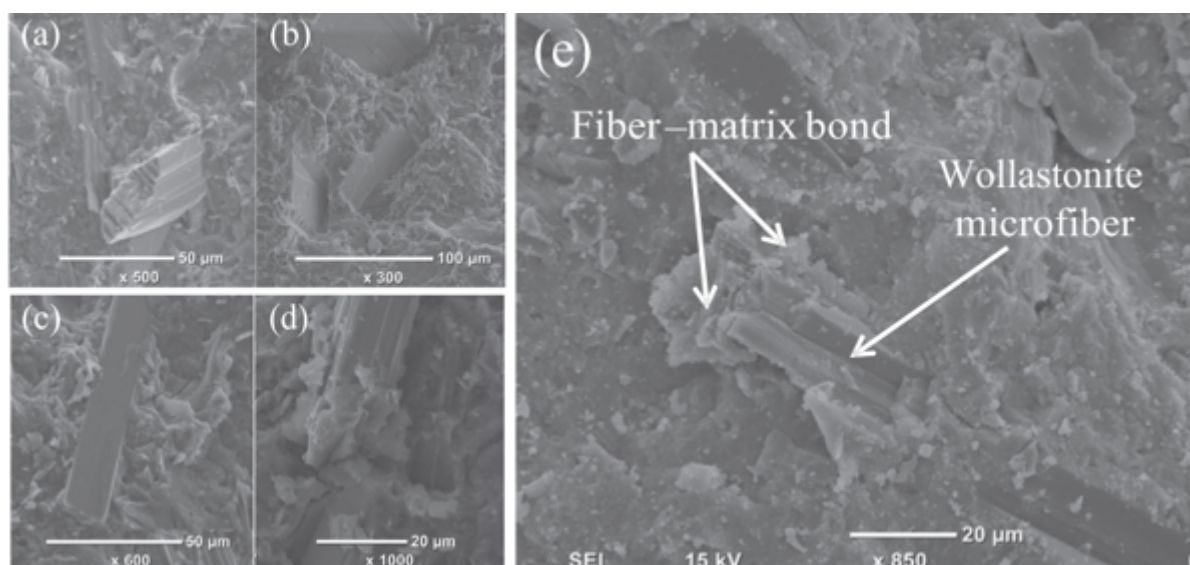
**Рисунок 1. Изображение микроструктуры карбонизированной волластонитовой пасты, полученное методом сканирующей электронной микроскопии в режиме обратно рассеянных электронов (SEM) [18]**

SEM-анализ. Согласно исследованиям [8], механизм действия волластонитовых микроволокон в цементных композитах активно изучался с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Low и Beaudoin [9] показали, что волластонитовые микроволокна сохраняют стабильность в высоко щелочной цементной среде. На поверхности волокон не было выявлено признаков разрушения или образования посторонних отложений. Авторы также отметили равномерное и хаотичное распределение микроволокон в цементной матрице.

Исследование Khan и соавт. [7] показало, что добавление микроволокон размером 3,5 и 9 мкм способствует повышению плотности структуры цементного композита. Аналогичные результаты получили Kalla и соавт. [12]. Эти эффекты объясняются малым размером частиц и их способностью уплотнять структуру материала.

Микроволокна, размеры которых сопоставимы или превышают размеры цементных зерен, проявляют выраженные армирующие свойства [8]. SEM-анализ показал наличие механизмов разрушения, характерных для волокнистых композитов: разрыв волокон, их выдергивание, отклонение трещин и образование прочных межфазных связей между волокном и матрицей (Рисунок 2).



**Рисунок 2. Микроструктурные изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), отражающие механизмы армирования цементных композитов микроволокнами волластонита: (а) разрушение волокна; (б) выдергивание волокна из матрицы; (в) отклонение траектории распространения трещины; (г, д) адгезионное взаимодействие на границе раздела «микроволокно – цементная матрица» [16]**

Волокнистая структура волластонита препятствует распространению микротрещин, что способствует повышению прочности на растяжение, изгиб и ударной вязкости цементных композитов.

Однако определить взаимодействие продуктов гидратации цемента с поверхностью волластонита методом SEM затруднительно, поскольку волокна обычно покрыты слоем гидратационных продуктов.

### Результаты и обсуждение

Проведённый анализ научной литературы подтверждает возможность эффективного использования микроволокон волластонита в качестве частичного заменителя цемента при производстве цементных композитов. Вместе с тем ряд вопросов, связанных с механизмами взаимодействия волластонита с цементной матрицей, оптимальными дозировками и долгосрочными эксплуатационными характеристиками материалов, требует дальнейшего углублённого изучения.

Результаты исследований показали, что с увеличением доли замещения цемента волластонитом удобоукладываемость смесей, как правило, снижается. Основной причиной этого является высокая удельная поверхность тонкодисперсных волластонитовых микроволокон, требующая большего количества воды для смачивания частиц.

### Заключение

Истощение природных ресурсов и значительные выбросы углекислого газа являются одними из основных факторов, оказывающих влияние на производство цемента. В связи с этим поиск альтернативных цементу материалов и разработка экологически безопасных композиционных вяжущих систем в последние годы стали одним из приоритетных направлений научных исследований.

Анализ литературных данных свидетельствует о наличии определённых расхождений в оценке влияния волластонита на прочность цементных композитов при сжатии. В большинстве случаев установлено, что замещение цемента небольшими количествами волластонита позволяет либо повысить прочность на сжатие, либо сохранить её на уровне традиционных цементных материалов. Однако при увеличении степени замещения наблюдается тенденция к снижению прочности. Кроме того, результаты большинства исследований подтверждают, что оптимальное содержание и правильно подобранный размер частиц волластонитовых микроволокон способствуют повышению прочности при изгибе, улучшению сопротивления усадочному растрескиванию и увеличению долговечности цементных композитов. Особое внимание было уделено изучению влияния волластонита на микроструктуру цементного камня. Полученные данные показывают, что волластонит является относительно инертным материалом и обладает ограниченной способностью вступать в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

На основании анализа существующих исследований установлено, что наиболее эффективный уровень замещения цемента микроволокнами волластонита находится в пределах 5–15 %. Оптимальный размер частиц волластонита следует выбирать с учётом функционального назначения цементного композита. Более мелкие частицы преимущественно выполняют роль микронаполнителя, уплотняя структуру материала, тогда как частицы, размеры которых сопоставимы или превышают размеры цементных зёрен, в большей степени проявляют армирующий эффект и функционируют как волокнистый компонент.

### Список литературы

1. Сатторов З.М., Отажонов О.А. Изучение микроморфологии волластонита при улучшении свойств ячеистых бетонов // Вестник науки Южного Казахстана. – 2025. – № 2. – С. 45–50.
2. Ashraf W., Olek J., Tian N.N. Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus // Cem. Concr. Compos. – 2016. – Т. 72. – Р. 284–298.
3. Dey V., Kachala R., Bonakdar A., Mobasher B. Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites // Constr. Build. Mater. – 2015. – Т. 82. – Р. 351–359.
4. Huang H., Guo R.N., Wang T., Hu X.T., Garcia S., Fang M.X. et al. Carbonation curing for wollastonite-Portland cementitious materials: CO<sub>2</sub> sequestration potential and feasibility assessment // J. Clean. Prod. – 2019. – Т. 211. – Р. 830–841.
5. Kalla P., Rana A., Chad Y.B., Misra A., Csetenyi L. Durability studies on concrete containing wollastonite // J. Clean. Prod. – 2015. – Т. 87. – Р. 726–734.
6. Kalla P., Misra A., Gupta R.C., Csetenyi L., Gahlot V., Arora A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination // Constr. Build. Mater. – 2013. – Т. 40. – Р. 1142–1150.

7. Khan R.I., Ashraf W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 218. – P. 150–161.
8. Kwon S., Nishiwaki T., Choi H., Mihashi H. Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system // *J. Adv. Concr. Technol.* – 2015. – Т. 13. – P. 332–344.
9. Low N.M.P., Beaudoin J.J. Stability of Portland cement-based binders reinforced with natural wollastonite micro-fibres // *Cem. Concr. Res.* – 1994. – Т. 24. – P. 874–884.
10. Lu Z.Y., Yao J., Leung C.K.Y. Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC // *Cem. Concr. Res.* – 2019. – Т. 126.
11. Mathur R., Misra A.K., Goel P. Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete // *J. Sci. Ind. Res.* – 2007. – Т. 66. – P. 1029–1034.
12. Ransinchung G.D., Kumar B. Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2010. – Т. 22. – P. 305–313.
13. Shi C.J., Wang D.H., Jia H.F., Liu J.H. Role of limestone powder and its effect on durability of cement-based materials // *J. Chin. Ceram. Soc.* – 2017. – Т. 45. – P. 1582–1593.
14. Soliman A.M., Nehdi M.L. Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2012. – Т. 24. – P. 816–824.
15. Svensson K., Neumann A., Menezes F.F., Lempp C., Pöllmann H. The conversion of wollastonite to CaCO<sub>3</sub> considering its use for CCS application as cementitious material // *Appl. Sci-Basel.* – 2018. – Т. 8.
16. Wahab M.A., Latif I.A., Kohail M., Almasry A. The use of wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – Т. 152. – P. 304–309.
17. Yücel H.E. Özcan S. Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 223. – P. 165–176.
18. Zareei S.A., Ameri F., Shoaie P., Bahrami N. Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Т. 201. – P. 11–32.
19. Zhang D., Ghoulah Z., Shao Y.X. Review on carbonation curing of cement-based materials // *J. CO<sub>2</sub> Util.* – 2017. – Т. 21. – P. 119–131.

## References

1. Z.M. Satterov O.A. Otazhonov [Study of Wollastonite Micromorphology in Improving the Properties of Cellular Concretes] *Journal: Bulletin of Science of South Kazakhstan*. No.2(30) 2025 (In Russ.)
2. W. Ashraf, J. Olek N.N. Tian, Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus, *Cem. Concr. Compos.* 72 (2016) P. 284–298.

3. V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, B. Mobasher, Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) P. 351–359.
4. H. Huang R.N. Guo, T. Wang X.T. Hu, S. Garcia M.X. Fang, et al., Carbonation curing for wollastonite-Portland cementitious materials: CO<sub>2</sub> sequestration potential and feasibility assessment, *J. Clean. Prod.* 211 (2019) – P. 830–841.
5. P. Kalla, A. Rana Y.B. Chad, A. Misra, L. Csetenyi, Durability studies on concrete containing wollastonite, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) P. 726–734.
6. P. Kalla, A. Misra R.C. Gupta, L. Csetenyi, V. Gahlot, A. Arora, Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) – P. 1142–1150.
7. R.I. Khan, W. Ashraf, Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development, *Constr. Build. Mater.* 218 (2019) – P.150–161.
8. S. Kwon, T. Nishiwaki, H. Choi, H. Mihashi, Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system, *J. Adv. Concr. Technol.* 13 (7) (2015) P. 332–344.
9. N.M.P. Low J.J. Beaudoin, Stability of Portland cement-based binders reinforced with natural wollastonite micro-fibres, *Cem. Concr. Res.* 24 (5) (1994) P.- 874–884.
10. Z.Y. Lu, J. Yao C.K.Y. Leung, Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC, *Cem. Concr. Res.* 126 (2019) 105899.
11. R. Mathur A.K. Misra, P. Goel, Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete, *J. Sci. Indus. Res.* 66 (2007) – P. 1029–1034.
12. G.D. Ransinchung R.N., B. Kumar, Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (4) (2010) – P. 305–313.
13. C.J. Shi D.H. Wang H.F. Jia J.H. Liu, Role of limestone powder and its effect on durability of cement-based materials, *J. Chin. Ceram Soc.* 45 (11) (2017) – P. 1582–1593 (in Chinese).
14. A.M. Soliman M.L. Nehdi, Effect of natural wollastonite microfibers on earlyage behavior of UHPC, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (7) (2012) – P. 816–824.
15. K. Svensson, A. Neumann F.F. Menezes, C. Lempp, H. Pöllmann, The conversion of wollastonite to CaCO<sub>3</sub> considering its use for CCS application as cementitious material, *Appl. Sci-Basel.* 8 (304) – (2018) – P.18.
16. M.A. Wahab I.A. Latif, M. Kohail, A. Almasry, The use of Wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes, *Constr. Build. Mater.* 152 (2017) P. 304–309.
17. H.E. Yücel, S. Özcan, Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique, *Constr. Build. Mater.* 223 (2019) – P. 165–176.
18. S.A. Zareei, F. Ameri, P. Shoaee, N. Bahrami, Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study, *Constr. Build. Mater.* 201 (2019) – P. 11–32.

- 
19. D. Zhang, Z. Ghoul, Y.X. Shao, Review on carbonation curing of cementbased materials, J. CO<sub>2</sub> Util. 21 (2017) – P. 119–131.