

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ/CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1>

EDN: CIBIOT

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КВАРЦЕВОЙ И МРАМОРНОЙ МУКИ НА СВОЙСТВА
СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА И СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Научная статья

Матюшин Е.В.^{1,*}, Соловьев В.Г.²¹ORCID : 0000-0002-2529-8443;²ORCID : 0000-0001-9446-0689;^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (matyushinev[at]mgsu.ru)

Предложена: 12.04.2026; Принята: 29.09.2026; Опубликовано: 21.10.2026

Аннотация

Одним из основных компонентов сверхвысокопрочных бетонов и сталефибробетонов является инертная минеральная добавка, получаемая путем тонкого измельчения различных горных пород, основная роль которой заключается в увеличении плотности упаковки порошкообразных частиц и уменьшении расхода вяжущего. В статье представлены результаты сравнительных испытаний бетонов с кварцевой и мраморной мукой с удельной поверхностью и средним размером частиц в диапазоне 188,7–798,5 м²/кг и 3,3–22,7 мкм, соответственно. Были определены следующие характеристики: прочность при сжатии, изгибе, энергия разрушения при изгибе, прочность сцепления стальной волновой фибры с бетоном и водопоглощение. Установлено, что удельная поверхность инертного наполнителя не оказывает существенного влияния на указанные характеристики. Составы с кварцевой мукой имеют немного более высокую прочность при сжатии и изгибе (до 4,7–9,5%), чем составы с мраморной мукой. При введении стальной фибры разница в прочности полностью нивелируется, что обусловлено сопоставимыми значениями прочности сцепления фибры с бетоном. В результате проведенных исследований установлено, что для получения сверхвысокопрочных бетонов и фибробетонов возможна замена традиционной применяемой кварцевой муки на мраморную даже с более низкой удельной поверхностью, что позволит снизить себестоимость подобных бетонов.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон, фибробетон, кварцевая мука, мраморная мука.

A STUDY OF THE EFFECT OF QUARTZ AND MARBLE POWDER ON THE PROPERTIES OF ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETE AND STEEL-FIBRE-REINFORCED CONCRETE

Research article

Matiushin E.V.^{1,*}, Solovlev V.G.²¹ORCID : 0000-0002-2529-8443;²ORCID : 0000-0001-9446-0689;^{1,2} Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (matyushinev[at]mgsu.ru)

Suggested: 12.04.2026; Accepted: 29.09.2026; Published: 21.10.2026

Abstract

One of the key components of ultra-high-strength concrete and steel-fibre-reinforced concrete is an inert mineral additive, produced by finely grinding various types of rock, the primary role of which is to increase the packing density of the powdery particles and reduce the binder consumption. The article presents the results of comparative tests on concretes containing quartz and marble powder with specific surface areas and mean particle sizes in the range of 188.7–798.5 m²/kg and 3.3–22.7 μm, respectively. The following properties were determined: compressive strength, flexural strength, crushing energy, bond strength between steel corrugated fibres and concrete, and water absorption. It was found that the specific surface area of the aggregate does not have a significant effect on these properties. Mixtures containing quartz powder exhibit slightly higher compressive and flexural strengths (up to 4.7–9.5% higher) than those containing marble powder. When steel fibres are added, the difference in strength is completely eliminated, which is due to comparable values of the bond strength between the fibres and the concrete. The research has shown that, to produce ultra-high-strength concrete and fibre-reinforced concrete, it is possible to replace the traditionally used quartz powder with marble powder, even if it has a lower specific surface area, which will help to reduce the production cost of such concretes.

Keywords: ultra-high-strength concrete, fibre-reinforced concrete, quartz powder, marble powder.

Введение

С конца прошлого столетия активно исследуется и внедряется в строительную отрасль новый вид конструкционных материалов, сочетающий в себе все преимущества самоуплотняющихся, высокопрочных и дисперсно-армированных бетонов, который в отечественной научно-технической литературе обозначается как сверхвысокопрочный бетон (СВБ) и фибробетон (СВФБ) [1], [2], [3]. Вследствие высоких физико-механических характеристик и долговечности материал находит применение при строительстве объектов транспортной

инфраструктуры: элементов автомобильных, железнодорожных и пешеходных мостов с улучшенными прочностными характеристиками и долговечностью, оптимизированными геометрическими размерами и увеличенным сроком безремонтной эксплуатации [4]. Перспективным является использование СВФБ для устройства покрытия автомобильных дорог, что позволяет увеличить несущую способность конструкции основания и одновременно обеспечить надежную гидроизоляцию [5]. В работе [6] сообщается о возможности применения СВФБ для ремонта стальных конструкций, подвергнутых коррозии, что обеспечивает возможность полного восстановления их несущей способности. Также широко распространена практика омоноличивания стыков между сборными железобетонными элементами при помощи СВФБ [7].

Прочность при сжатии и растяжении СВФБ может достигать 192–250 и 14,0–19,6 МПа, соответственно [8], [9, С. 581], [10, С. 59, 62], что возможно благодаря тщательной оптимизации гранулометрического состава входящих в состав бетона компонентов, снижения водоцементного соотношения до экстремально низких значений (0,18–0,25) и применения стальной фибры различной формы и размеров до 6–11% от общего объема смеси [11, С. 152], [12, С. 28]. Одним из основных компонентов СВФБ является инертный наполнитель, в качестве которого обычно применяется кварцевая мука, роль которой заключается в увеличении плотности упаковки частиц тонкомолотых компонентов и улучшении за счет этого удобоукладываемости смеси, а также снижения расхода портландцемента, содержание которого может превышать 1000 кг/м³ [12, С. 28]. Кроме того, при тепловой обработке при температуре +250 °С кварцевая мука проявляет реакционную способность и приводит к дополнительному уплотнению структуры и увеличению прочностных характеристик сверхвысокопрочного бетона [13, С. 1507]. Как правило, удельная поверхность применяемой кварцевой муки выше, чем у цемента, что позволяет частицам наполнителя встраиваться между зернами портландцемента и эффективно снижать межзерновую пустотность. Однако помол кварцевой муки для получения частиц требуемого размера требует высоких энергозатрат, в результате чего стоимость муки и бетона, в составе которого она содержится, существенно возрастают. Одной из возможных альтернатив является мраморная мука, обладающая меньшей твердостью и прочностью, в результате чего энергозатраты на помол единицы массы оказываются существенно ниже. Кроме того, мраморная мука является отходом, образующимся при производстве облицовочных плит, песка или щебня, что дополнительно уменьшает ее стоимость. Так, например, 1 тонна кварцевой муки с удельной поверхностью 300–400 м²/кг стоит 10200–16400 руб., в то время как мраморная мука сопоставимой тонкости помола — 3500–9100 руб. в зависимости от производителя. В работе [14] проведено сравнительное исследование свойств СВБ с различными отходами камнедробления, таких как гранитная, базальтовая, мраморная и известняковая мука. Было установлено, что замена до 20% портландцемента на мраморную муку позволяет значительно улучшить реологические характеристики смеси при сохранении прочности и непроницаемости затвердевшего бетона относительно контрольного состава. В статье [15] авторами также обнаружен положительный эффект известняковой муки на механические свойства рядовых и высокопрочных бетонов при ее содержании до 15% от массы цемента и удельной поверхности не менее 600 м²/кг. Авторами [16, С. 167–168] получены схожие результаты, где замена 20% портландцемента на известняковую муку позволило незначительно повысить прочностные характеристики мелкозернистого бетона при одновременном уменьшении его себестоимости. В исследованиях [17, С. 262–263] и [18, С. 224–225] также отмечается возможность эффективного использования тонкомолотых карбонатных пород в технологии высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов, наличие которых в твердеющей цементной системе приводит к изменению кристаллохимического строения гидратных новообразований, уменьшению их толщины на поверхности зерен и образованию новых контактов срастания AFm фаз, Ca(OH)₂ и CaCO₃, что способствует уплотнению и упрочнению структуры.

Опыт отечественных и зарубежных исследований явно свидетельствует о перспективности использования карбонатных горных пород в качестве инертного наполнителя в сверхвысокопрочных бетонах и фибробетонах. При этом не было обнаружено работ, в которых бы было представлено сравнение свойств фибробетонов, содержащих кварцевый и карбонатный наполнитель, а также стальную волновую фибру в качестве дисперсного армирования, которая на сегодняшний день является одной из наиболее распространенных на территории Российской Федерации. Таким образом, в рамках данной работы были проведены испытания составов СВБ и СВФБ с кварцевой и мраморной мукой различной удельной поверхности, в рамках которых были определены основные физико-механические характеристики, такие как прочность при сжатии, изгибе, прочность сцепления стальной фибры с бетонной матрицей и водопоглощение. Целью работы являлось установление возможности замены дорогостоящей кварцевой муки на более дешевый и доступный аналог без существенного ухудшения основных свойств материала. Более подробное описание применяемых материалов и методов исследования представлено в следующих разделах.

Материалы и методы

2.1. Применяемые материалы и составы смесей

Для приготовления смесей использовался серый портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н производства ООО «Аккерман Цемент» с прочностью на сжатие в возрасте 28 суток, определенной по ГОСТ 30744, 55,0 МПа и удельной поверхностью по прибору ПСХ 353,3 м²/кг. В качестве заполнителя применялся кварцевый песок фракций 0,1–0,4 и 0,4–0,8 в соотношении 30:70 по объему, при котором обеспечивается наименьшая пустотность смеси в рыхло-насыпном состоянии. Объемное содержание кварцевого песка было принято постоянным во всех составах и составляло 0,4 м³. В качестве активной минеральной добавки использовался микрокремнезем МКУ-85, соответствующий ГОСТ Р 58894-2020. Удобоукладываемость смесей регулировалась при помощи суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов Sika® ViscoCrete® E-35 производства ООО «Зика» (Sika Россия). Содержание добавки подбирались таким образом, чтобы диаметр расплыва смеси, определенный по конусу Хегерманна, составлял 230–250 мм. Водоцементное соотношение с учетом содержания воды в суперпластифицирующей добавке не изменялось и для всех смесей составляло 0,22. В качестве инертных

наполнителей использовалась кварцевая мука с удельной поверхностью 188,7 и 429,6 м²/кг (средний диаметр частиц 22,70 и 12,77 мкм), в дальнейшем обозначаемые как КМ-200 и КМ-400, соответственно, и мраморная мука (микрокальцит) с удельной поверхностью 281,2 и 798,5 м²/кг (средний диаметр частиц 20,75 и 3,30 мкм), в дальнейшем обозначаемые как МКТ-300 и МКТ-800, соответственно. Содержание инертных минеральных добавок во всех составах составляло 20% от массы цемента. Интегральные кривые распределения частиц наполнителей по размерам, определенные методом лазерной дифракции на приборе Fritsch Analysette 22, представлены на графике рисунка 1.

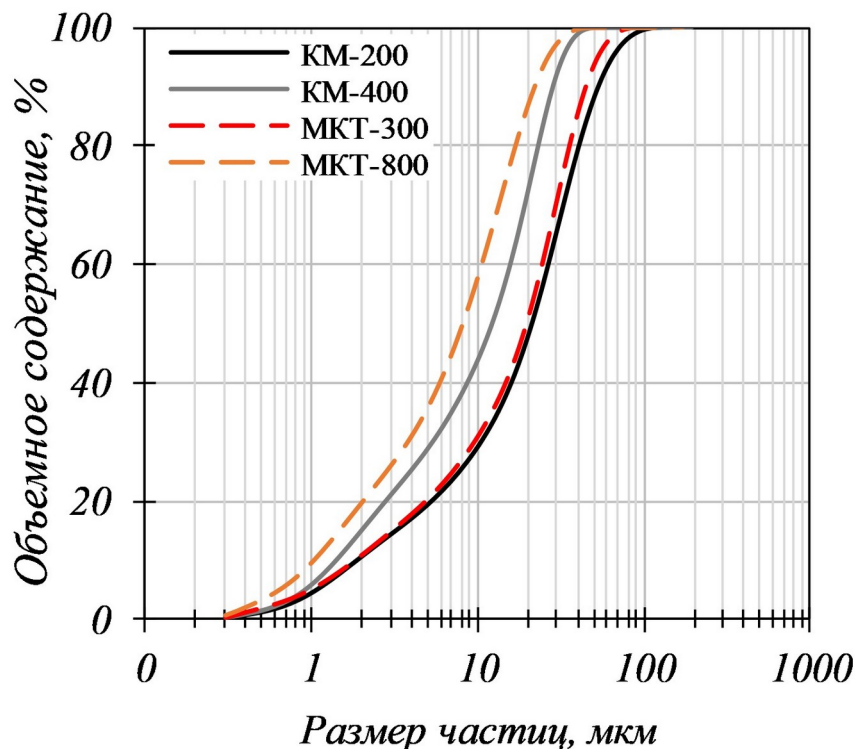


Рисунок 1 - Интегральные кривые распределения частиц наполнителей по размерам
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.1>

Было испытано две группы смесей: одна без стальной фибры, другая — с содержанием 2% стальной волновой фибры по объему. Диаметр и длина волокон составляли 0,3 и 22 мм, соответственно. В таблице 1 представлены составы, подвергнутые испытаниям, где «КМ» и «МКТ» обозначают кварцевую и мраморную муку, соответственно, а «Ф» - наличие стальной фибры в составе смеси.

Таблица 1 - Составы смесей, подвергнутых испытаниям

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.2>

Компонент	КМ	КМ-Ф	МКТ	МКТ-Ф
Цемент, кг	826	798	826	798
Вода, кг	173	168	173	168
Инертный наполнитель, кг	165	160	165	160
Микрокремнезем, кг	165	160	165	160
Кварцевый песок 0,1-0,4 мм, кг	315	315	315	315
Кварцевый песок 0,1-0,4 мм, кг	736	736	736	736
Суперпластификатор, кг	25	24	25	24
Стальная фибра, кг	-	156	-	156

Твердение образцов после их формования осуществлялось по следующему режиму: 48 часов - в лабораторных условиях, 48 часов — в камере тепловлажностной обработки при температуре +80°C. После пропаривания образцы плавно охлаждались до комнатной температуры и затем хранились в лаборатории в течение 3 суток до момента проведения испытаний.

2.2. Методы исследования

Прочность при сжатии определялась на образцах-кубах с размером ребра 50 мм. Скорость нагружения образцов во время испытаний составляла 2 МПа/с. Прочность при сжатии серии образцов определялась как среднее арифметическое результатов трех испытаний.

Прочность при изгибе определялась на образцах-призмах размером 40x40x160 мм. Испытание проводилось на электромеханическом прессе, при этом скорость перемещения траверсы составляла 0,4 мм/мин. Прочность при изгибе серии образцов определялась как среднее арифметическое результатов трех испытаний.

Прочность сцепления стальной фибры с бетоном определялась путем выдергивания единичного волокна, погруженного на 10 мм в бетонную матрицу. Для проведения испытания были подготовлены образцы в виде половинок восьмерок, внешний вид которых представлен на рисунке 2-а, а способ захвата образца в испытательной машине — на рисунке 2-б. Выдергивание фибры из бетона осуществлялось на разрывной машине Instron 3382, скорость перемещения траверсы при этом составляла 0,4 мм/мин. В процессе испытания регистрировалась диаграмма «нагрузка-перемещение», при помощи которой определялось значение максимальной нагрузки и затем рассчитывалась прочность сцепления по формуле:

$$\tau_f = \frac{F}{\pi \cdot d_f \cdot l_e},$$

где F — максимальное значение нагрузки по диаграмме, Н;

d_f — диаметр фибры, мм;

l_e — глубина заделки фибры в бетон, мм.

Прочность сцепления фибры с бетоном определялась как среднее арифметическое результатов 6 параллельных испытаний.

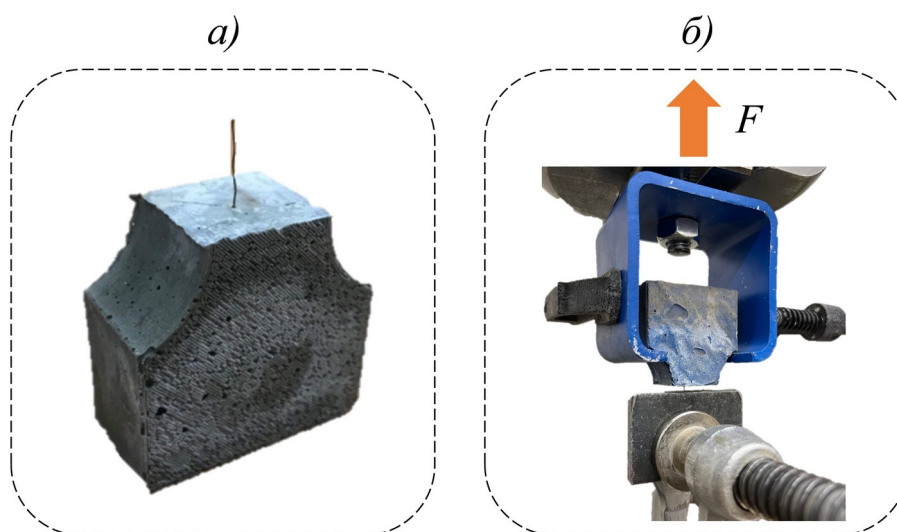


Рисунок 2 - Определение прочности сцепления фибры с бетоном:
а – внешний вид образца; б – внешний вид образца в захватах испытательной машины
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.3>

Поверхность стальной фибры исследовалась при помощи растрового электронного микроскопа FEI Quanta 250.

Для составов, не содержащих стальную фибру, определялось водопоглощение по массе и объему в соответствии с ГОСТ 12730.3. Среднее значение каждого из параметров определялось по результатам 3 параллельных испытаний образцов-кубов с размером ребра 50 мм.

Результаты и обсуждение

3.1. Прочность при сжатии

Результаты определения прочности при сжатии составов с стальной фиброй и без фибры представлены на рисунке 3-а и 3-б, соответственно.

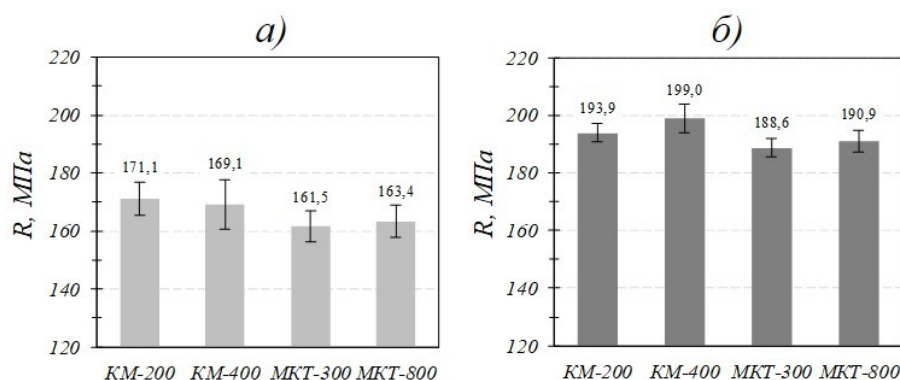


Рисунок 3 - Результаты определения прочности при сжатии:
 а – составов без стальной фибры; б – составов с стальной фиброй
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.4>

При увеличении удельной поверхности кварцевой и мраморной муки не было обнаружено существенного изменения прочности на сжатие ни в составах без стальной фибры, ни при ее добавлении. При этом образцы, содержащие кварцевую муку в своем составе, обладают на 3,7–4,5% более высокой прочностью, чем образцы с мраморной мукой. Более высокая прочность составов с кварцевой мукой, предположительно, может объясняться уменьшением соотношения атомов кальция к атомам кремния (Ca/Si) в образующихся при гидратации портландцемента гидросиликатов кальция (C-S-H). Различными исследователями экспериментально доказано, что при уменьшении указанного соотношения происходит улучшение упругих и прочностных характеристик C-S-H на микроуровне вследствие увеличения степени полимеризации силикатных цепей [19], [20, С. 17407], что в конечном итоге выражается и в увеличении прочности бетона на макроуровне.

3.2. Прочность сцепления волновой стальной фибры с бетоном

На графиках рисунка 4-а-г представлены диаграммы «нагрузка-смещение фибры», полученные при выдергивании волокон из бетонных матриц с различным видом инертного наполнителя, а на диаграмме рисунка 4-д — среднее значение прочности сцепления волновой фибры для всех испытанных серий образцов, определенное по формуле (1).

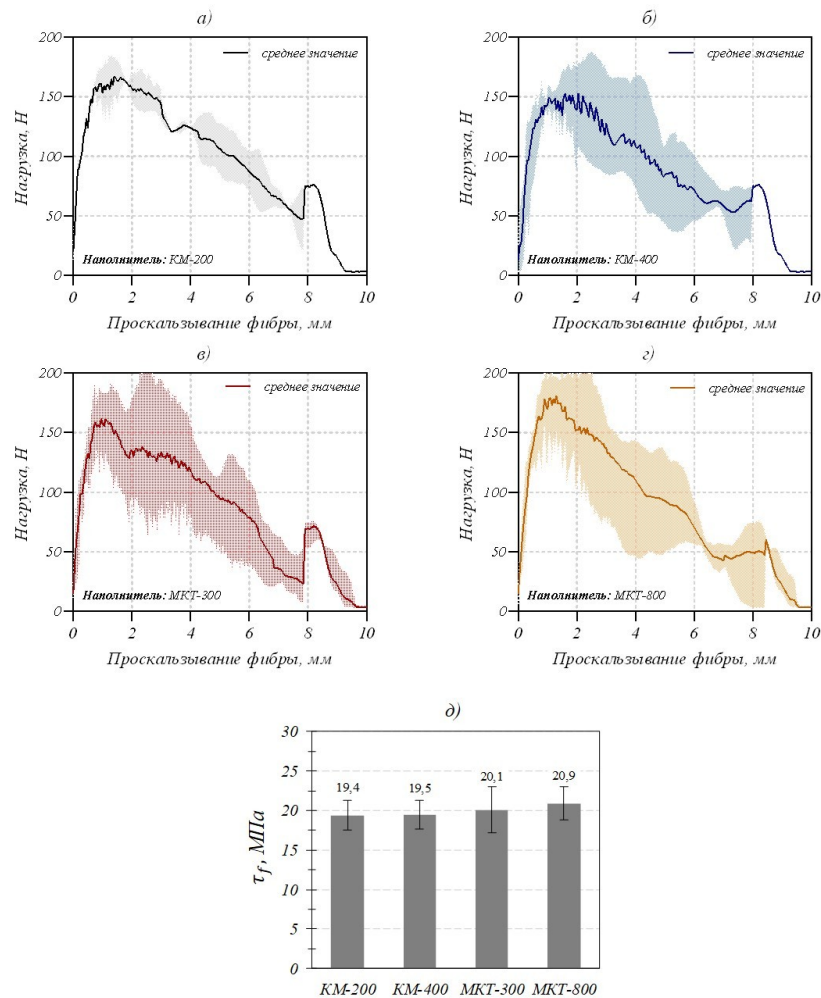


Рисунок 4 - Результаты определения прочности сцепления стальной волновой фибры с бетоном:

а – диаграмма «нагрузка-смещение фибры» для состава с наполнителем КМ-200; б – диаграмма «нагрузка-смещение фибры» для состава с наполнителем КМ-400; в – диаграмма «нагрузка-смещение фибры» для состава с наполнителем МКТ-300; г – диаграмма «нагрузка-смещение фибры» для состава с наполнителем МКТ-800

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.5>

Все полученные диаграммы имеют схожий внешний вид вне зависимости от вида наполнителя, содержащегося в бетонной матрице. До значения проскальзывания волокна 0,15–0,30 мм наблюдается линейный участок диаграммы, соответствующий упругой работе контактной зоны «фибра-цементно-минеральный камень», после чего угол наклона начинает постепенно снижаться. Изменение угла наклона диаграммы свидетельствует о начале разрушения связей между цементно-минеральным камнем и поверхностью волокна и началу движения фибры в теле бетонной матрицы. Максимальные значения нагрузки достигаются при проскальзывании на величину 0,8–2,0 мм, при котором происходит окончательное разрушение адгезионных связей в контактной зоне, сопровождающееся одновременной пластической деформацией трех отгибов волокна, погруженных в бетон. После достижения пикового значения нагрузка начинает постепенно снижаться при увеличении проскальзывания фибры, при этом наблюдаются две площадки при смещениях 3,35–3,70 мм и 7,75–8,50 мм, при которых происходит повторная пластическая деформация оставшихся в бетонной матрице двух и одного отгиба волокна, соответственно.

При изменении вида инертного наполнителя прочность сцепления волновой фибры изменяется в узком диапазоне 19,4–20,9 МПа, при этом немного большая величина сцепления была получена при использовании мраморной муки, обладающей большей удельной поверхностью и, соответственно, меньшим средним размером частиц. В процессе производства стальной фибры на её поверхности могут возникать различные дефекты, такие как царапины и вмятины. На фотографиях рисунка 5-а представлены характерные дефекты, обнаруженные на поверхности стальной фибры. На диаграмме рисунка 5-б представлена частота распределения ширины дефектов, которая определялась при помощи программы ImageJ по полученным снимкам. Из представленного графика видно, что ширина дефектов варьируется в диапазоне 0,4–2,2 мкм. При увеличении удельной поверхности наполнителя увеличивается доля частиц, способных заполнить указанные дефекты и, таким образом, увеличить механическую анкеровку фибры в бетонной матрице. Однако в связи с небольшим количеством дефектов на поверхности волокна увеличение тонкости помола не приводит к существенному улучшению сцепления, а наблюдаемая разница между различными составами лежит в пределах стандартного отклонения отдельных серий образцов, которое составляет 1,8–2,9 МПа.

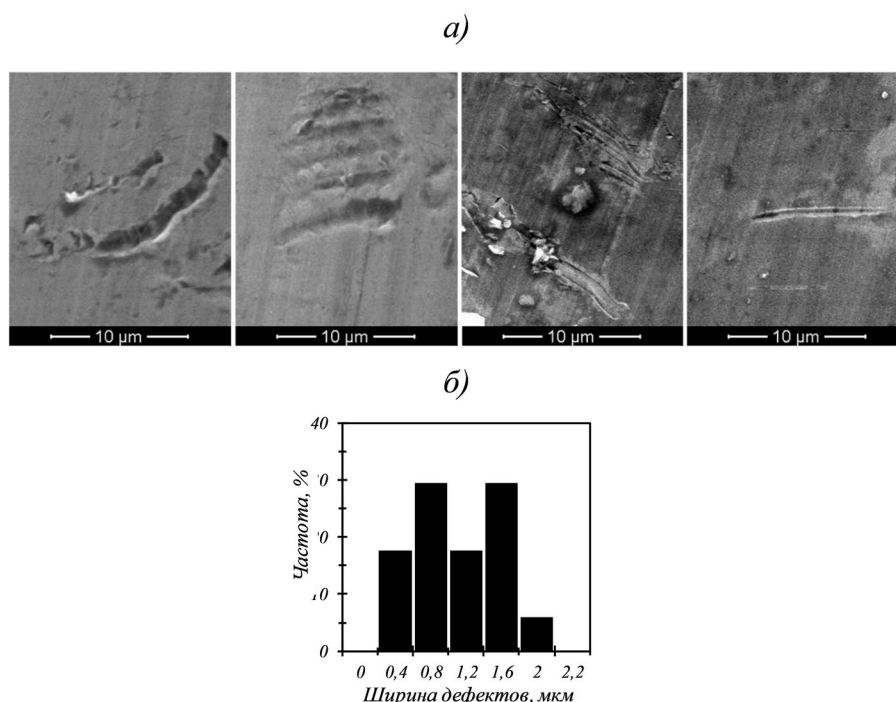


Рисунок 5 - Результаты исследования поверхности стальной фибры:

а – характерные дефекты на поверхности волокна; б – частота распределения ширины дефектов на поверхности волокна

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.6>

3.3. Прочность при изгибе

Результаты определения прочности при изгибе образцов со стальной фиброй и без представлены на рисунке 6-а и 6-б, соответственно.

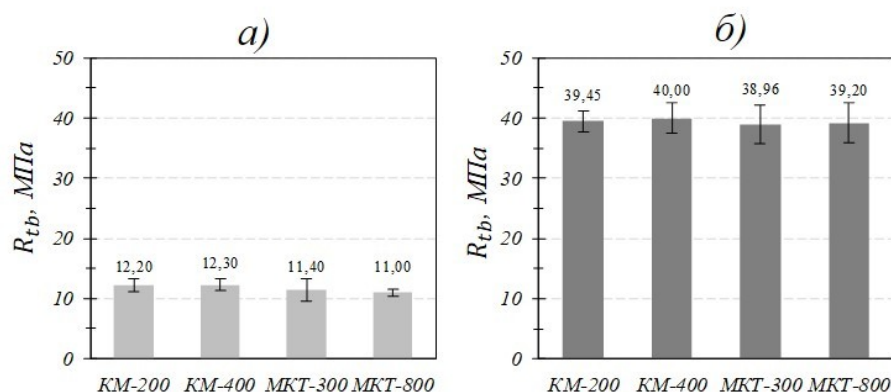


Рисунок 6 - Результаты определения прочности при изгибе:

а – составов без стальной фибры; б – составов с стальной фиброй

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.7>

Удельная поверхность кварцевой и мраморной муки не оказывает влияния на прочность при изгибе бетонной матрицы. При этом составы с кварцевой мукой обладают в среднем на 9,5% более высокой прочностью, что также может объясняться образованием С-С-Н с более высокими физико-механическими характеристиками в присутствии тонкомолотых кварцевых частиц, как и в случае прочности при сжатии. Однако при введении стальной фибры не было обнаружено разницы между прочностью при изгибе различных составов, которая изменяется в узком диапазоне 38,96–40,00 МПа, что коррелирует с результатами определения прочности сцепления отдельного волокна (рисунок 4-д). Это объясняется тем, что максимальное напряжение при изгибе фибробетона достигается при высоких значениях прогиба/ширины раскрытия магистральной трещины образца, при которых бетонная матрица практически полностью выключается из работы, а вся нагрузка воспринимается группой фибр, пересекающих эту трещину.

3.4. Водопоглощение

Результаты определения водопоглощения образцов сверхвысокопрочного бетона представлены на рисунке 7.

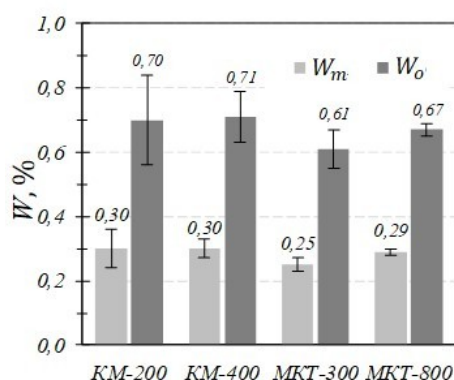


Рисунок 7 - Результаты определения водопоглощения образцов сверхвысокопрочного бетона по массе и объему
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.77.1.8>

Водопоглощение образцов по массе находится в диапазоне 0,25–0,30%, по объему — 0,61–0,71% и практически не зависит от вида инертного наполнителя. Это связано с тем, что СВБ обладает низкой общей пористостью, причем преимущественно закрытой, в результате чего вода проникает вглубь материала только в поверхностной зоне. В статье [21] приведены результаты определения общей пористости сверхвысокопрочных фибробетонов с прочностью на сжатие 125–155 МПа, которая составила 4,0–7,6%, в то время как открытая, доступная для проникания воды, не превысила 1–2%, что соответствует полученным в данной работе результатам.

Заключение

В статье приведены результаты определения физико-механических свойств сверхвысокопрочных бетонов (СВБ) и фибробетонов (СВФБ) с кварцевым и мраморным наполнителем. По полученным данным могут быть сделаны следующие выводы:

1. Прочность при сжатии СВБ и СВФБ не зависит от удельной поверхности кварцевой или мраморной муки. При использовании кварцевой муки взамен мраморной прочность при сжатии на 3,7–4,5% выше.
2. Вид инертного наполнителя не оказывает существенного влияния на прочность сцепления между стальной волновой фиброй и сверхвысокопрочным бетоном. Экспериментальное значение прочности составляет 19,4–20,9 МПа, а разница между составами лежит в пределах стандартного отклонения серии испытаний, которое составило 1,9–2,9 МПа.
3. Прочность при изгибе сверхвысокопрочного бетона без фибры в среднем на 9,5% выше в случае, если в качестве инертного наполнителя используется кварцевая мука. Прочность при изгибе сталефибробетона не зависит от вида минеральной добавки, что находится в соответствии с прочностью сцепления отдельного волокна.
4. Водопоглощение по массе и объему также не зависит от вида инертного наполнителя и для испытанных составов составляет в среднем 0,28 и 0,66%, соответственно.

Было установлено, что удельная поверхность и вид инертного наполнителя не оказывают существенного влияния на ключевые свойства СВБ и СВФБ, что позволяет рекомендовать мраморную муку в качестве альтернативы вследствие ее более низкой стоимости по сравнению с кварцевой.

Финансирование

Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bajaber M.A. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review / M.A. Bajaber, I.Y. Hakeem // Journal of Materials Research and Technology. — 2021. — 10. — P. 1058–1074. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051



2. Azmee N.M. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications / N.M. Azmee, N. Shafiq // *Case Studies in Construction Materials*. — 2018. — 9. — DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Zhou J. Experimental investigation on torsional behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete hollow beams / J. Zhou, C. Li, Z. Feng et al. // *Cement and Concrete Composites*. — 2022. — 129. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104504
4. Xue J. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering / J. Xue, B. Briseghella, H. Huang et al. // *Construction and Building Materials*. — 2020. — 260. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844
5. Ye W. Study on the Structural Performance of UHPC Pavement and Hinge Joint Reinforcement for Hollow Slab Girder Bridges / W. Ye, F. Li // *Applied Sciences*. — 2022. — 12 (23). — DOI: 10.3390/app122312008
6. Mash J.A. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems / J.A. Mash, K.A. Harries, C. Rogers // *Journal of Constructional Steel Research*. — 2023. — 207. — DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107975
7. Hung C.C. A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design / C.C. Hung, S. El-Tawil, S.H. Chao // *Journal of Structural Engineering*. — 2021. — 147. — DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073
8. Yang J. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT / J. Yang, B. Chen, X. Wu et al. // *Construction and Building Materials*. — 2023. — 368. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
9. Paschalis S. Fiber content and curing time effect on the tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete / S. Paschalis, A. Lampropoulos // *Structural Concrete*. — 2017. — 18. — P. 577–588. — DOI: 10.1002/suco.201600075
10. Wille K. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading / K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman // *Cement and Concrete Composites*. — 2014. — 48. — P. 53–66. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
11. Farhat F.A. High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) — Performance and application to retrofitting / F.A. Farhat, D. Nicolaides, A. Kanellopoulos et al. // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2007. — 74. — P. 151–167. — DOI: 10.1016/j.engfractmech.2006.01.023
12. Rossi P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite / P. Rossi, A. Arca, E. Parant et al. // *Cement and Concrete Research*. — 2007. — 35. — P. 27–33. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
13. Richard P. Composition of reactive powder concretes / P. Richard, M. Cheyrezy // *Cement and Concrete Research*. — 1995. — 25. — P. 1501–1511. — DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2
14. Wu D. Valorization of silicate and carbonate stone powder in ultra-high performance concrete (UHPC): performance, microstructure, and sustainability / D. Wu, X. He, X. Hua et al. // *Journal of Building Engineering*. — 2026. — 124. — DOI: 10.1016/j.jobeb.2026.116043
15. Zhang M. Effect of Limestone Powder Fineness on the Physical and Mechanical Performance of Concrete / M. Zhang, Y. Yang, Y. Wu et al. // *Materials*. — 2025. — 18 (4). — DOI: 10.3390/ma18040835
16. Красиникова Н.М. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий / Н.М. Красиникова, Н.М. Морозов, О.В. Хохряков и др. // *Известия КГАСУ*. — 2014. — 2(28). — С. 166–172.
17. Тараканов О.В. К вопросу о расширении базы минеральных добавок используемых в технологии бетонов / О.В. Тараканов // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. — 2018. — 4(17). — С. 258–263.
18. Тараканов О.В. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения / О.В. Тараканов, В.И. Калашников // *Известия КГАСУ*. — 2017. — 1(39). — С. 223–229.
19. Chiang Y. Bridging the gap between NMR measured mean silicate chain length and nano-scale silicate polymorphism of calcium silicate hydrates / Y. Chiang, S.W. Chang // *Cement and Concrete Research*. — 2021. — 140. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106268
20. Kunther W. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders / W. Kunther, S. Ferreira, J. Skibsted // *Journal of Materials Chemistry A*. — 2017. — 5. — P. 17401–17412. — DOI: 10.1039/C7TA06104H
21. Valcuende M. Porous Structure of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concretes / M. Valcuende, J.R. Lliso-Ferrando, M. Roig-Flores et al. // *Materials*. — 2021. — 14(7). — DOI: 10.3390/ma14071637

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bajaber M.A. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review / M.A. Bajaber, I.Y. Hakeem // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2021. — 10. — P. 1058–1074. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
2. Azmee N.M. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications / N.M. Azmee, N. Shafiq // *Case Studies in Construction Materials*. — 2018. — 9. — DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Zhou J. Experimental investigation on torsional behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete hollow beams / J. Zhou, C. Li, Z. Feng et al. // *Cement and Concrete Composites*. — 2022. — 129. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104504
4. Xue J. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering / J. Xue, B. Briseghella, H. Huang et al. // *Construction and Building Materials*. — 2020. — 260. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844
5. Ye W. Study on the Structural Performance of UHPC Pavement and Hinge Joint Reinforcement for Hollow Slab Girder Bridges / W. Ye, F. Li // *Applied Sciences*. — 2022. — 12 (23). — DOI: 10.3390/app122312008



6. Mash J.A. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems / J.A. Mash, K.A. Harries, C. Rogers // *Journal of Constructional Steel Research*. — 2023. — 207. — DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107975
7. Hung C.C. A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design / C.C. Hung, S. El-Tawil, S.H. Chao // *Journal of Structural Engineering*. — 2021. — 147. — DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073
8. Yang J. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT / J. Yang, B. Chen, X. Wu et al. // *Construction and Building Materials*. — 2023. — 368. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
9. Paschalis S. Fiber content and curing time effect on the tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete / S. Paschalis, A. Lampropoulos // *Structural Concrete*. — 2017. — 18. — P. 577–588. — DOI: 10.1002/suco.201600075
10. Wille K. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading / K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman // *Cement and Concrete Composites*. — 2014. — 48. — P. 53–66. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
11. Farhat F.A. High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) — Performance and application to retrofitting / F.A. Farhat, D. Nicolaidis, A. Kanellopoulos et al. // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2007. — 74. — P. 151–167. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.01.023
12. Rossi P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite / P. Rossi, A. Arca, E. Parant et al. // *Cement and Concrete Research*. — 2007. — 35. — P. 27–33. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
13. Richard P. Composition of reactive powder concretes / P. Richard, M. Cheyrezy // *Cement and Concrete Research*. — 1995. — 25. — P. 1501–1511. — DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2
14. Wu D. Valorization of silicate and carbonate stone powder in ultra-high performance concrete (UHPC): performance, microstructure, and sustainability / D. Wu, X. He, X. Hua et al. // *Journal of Building Engineering*. — 2026. — 124. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2026.116043
15. Zhang M. Effect of Limestone Powder Fineness on the Physical and Mechanical Performance of Concrete / M. Zhang, Y. Yang, Y. Wu et al. // *Materials*. — 2025. — 18 (4). — DOI: 10.3390/ma18040835
16. Krasnikova N.M. Optimizaciya sostava cementnogo betona dlya ae'rodromny'x pokry'tij [Optimization of composition of cement concrete for airfield coverings] / N.M. Krasnikova, N.M. Morozov, O.V. Xoxryakov et al. // *News of KSUAE*. — 2014. — 2(28). — P. 166–172. [in Russian]
17. Tarakanov O.V. K voprosu o rasshirenii bazy' mineral'ny'x dobavok ispol'zuemy'x v tehnologii betonov [To the question of expansion of base of mineral additives of the concrete used in technology] / O.V. Tarakanov // *Education and Science in the Modern World. Innovations*. — 2018. — 4(17). — P. 258–263. [in Russian]
18. Tarakanov O.V. Perspektivy' primeneniya kompleksny'x dobavok v betonax novogo pokoleniya [Prospects of application of complex additives in new generation concretes] / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov // *News of KSUAE*. — 2017. — 1(39). — P. 223–229. [in Russian]
19. Chiang Y. Bridging the gap between NMR measured mean silicate chain length and nano-scale silicate polymorphism of calcium silicate hydrates / Y. Chiang, S.W. Chang // *Cement and Concrete Research*. — 2021. — 140. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106268
20. Kunther W. Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders / W. Kunther, S. Ferreiro, J. Skibsted // *Journal of Materials Chemistry A*. — 2017. — 5. — P. 17401–17412. — DOI: 10.1039/C7TA06104H
21. Valcuende M. Porous Structure of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concretes / M. Valcuende, J.R. Lliso-Ferrando, M. Roig-Flores et al. // *Materials*. — 2021. — 14(7). — DOI: 10.3390/ma14071637