

UDC 711  
IRSTI 67.07.11  
RESEARCH ARTICLE

## QUALITY IMPROVEMENT EFFECTIVENESS OF ROAD SLABS PRODUCED USING MICROSILICA AND FIBER

B.T. Kopzhassarov<sup>1</sup> , D.A. Akhmetov<sup>2</sup> , A.M. Zhagifarov<sup>2\*</sup> , I.E. Abdraimov<sup>1</sup> ,  
M.T. Kutybai<sup>1</sup> , Z.O. Zhumadilova<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> South Kazakhstan University named after M.Auezov, 160012, Shymkent, Kazakhstan  
<sup>2</sup> Satbayev University, 050013, Almaty, Kazakhstan

---

**Abstract.** *Here we present the results of testing the concrete physical and mechanical properties for road slabs reinforced with bulk fiber, including polypropylene macro- and microfibers. We have analyzed the effect of the use of macrofibers and microfibers in the concrete composition. There was established the impact of low-modulus synthetic fibers on the characteristics of strength, density, water resistance and frost resistance of concrete for road pavement. It was established that polypropylene macrofibers impact on the physical and technical characteristics of concrete, increase compressive and bending strength, and polypropylene microfibers improve the structure of the cement component of concrete, optimize the pore space, increase the frost resistance and water resistance of concrete. It has been experimentally proved that owing to the combined use of various sized fiber fibers, it is possible to produce concrete that has good characteristics in strength, density and frost resistance. It was established that with the combined concrete fiber reinforcement with microsilica addition, we get the possibility of increasing bending strength up to 35%, frost resistance up to F375 and water resistance up to W14. The research results make it possible to recommend multi-dimensional polypropylene fibers for volumetric reinforcement and microsilica to create additional crystallization centers and reduce the pore space in the concrete body at road slabs manufacture.*

**Keywords:** *fibroconcrete, low-modulus synthetic fibers, flexural strength, frost resistance, water resistance, microsilica.*

---

**\*Corresponding author**  
Adlet Zhagifarov, e-mail: [adletzhagifar@gmail.com](mailto:adletzhagifar@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-06>

Received 16 April 2024; Revised 29 April 2024; Accepted 17 May 2024.

## КРЕМНИЯЛЫҚ ТАЛШЫҚТАРДЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ЖОЛ ТАҚТАЙШАЛАРЫНЫҢ САПАСЫН АРТТЫРУ ТИІМДІЛІГІ

Б.Т. Копжасаров<sup>1</sup> , Д.А. Ахметов<sup>2</sup> , А.М. Жагифаров<sup>2\*</sup> , И.Е. Абдраимов<sup>1</sup> ,  
М.Т. Құттыбай<sup>1</sup> , Ж.О. Жұмаділова<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>М.О. Әуезов атындағы Қазақ зерттеу университеті, 160012, Шымкент, Қазақстан

<sup>2</sup>Сәтбаев университеті, 050013, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Мұнда полипропилен макро- және микроталшықтарымен көлемді талшықты арматураланған жол плиталарына арналған бетонның физикалық-механикалық қасиеттерін сынау нәтижелері берілген. Бетондағы макро- және микроталшықты қолданудың әсері талданады. Төмен модульді синтетикалық талшықтардың жол төсемдеріне арналған бетонның беріктігі, тығыздығы, суға төзімділігі және аязға төзімділігі сипаттамаларына әсері анықталды. Полипропилен микроталшықтары бетонның физикалық және техникалық сипаттамаларына әсер ететіні, қысу және иілу беріктігін жоғарылататыны, ал полипропиленді микроталшықтар бетонның цемент құрамдас бөлігінің құрылымын жақсартатыны, кеуекті кеңістікті оңтайландыратыны, бетонның аязға төзімділігі мен суға төзімділігін арттыратыны анықталды. . Әртүрлі өлшемдегі талшықтарды біріктіріп қолдану арқылы беріктігі, тығыздығы және аязға төзімділігі бойынша жақсы сипаттамалары бар бетон алуға болатыны тәжірибе жүзінде дәлелденген . Микрокремний қосындысымен бетонды талшықты талшықпен біріктірілген арматура иілу беріктігін 35%-ға дейін, аязға төзімділікті F375-ке дейін және суға төзімділікті W14-ке дейін арттыруы мүмкін екендігі анықталды . Зерттеу нәтижелері көлемді арматура үшін көп өлшемді полипропилен талшықтарын және қосымша кристалдану орталықтарын құру және жол плиталарын өндіруде бетон корпусындағы кеуекті кеңістікті азайту үшін микрокремнийді ұсынуға мүмкіндік береді .

**Түйін сөздер:** талшықты темірбетон , төмен модульді синтетикалық талшықтар, иілу беріктігі, аязға төзімділік.

\*Автор-корреспондент

Адлет Жагифаров, e-mail: [adletzhagifar@gmail.com](mailto:adletzhagifar@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-06>

Алынды 16 сәуір 2024; Қайта қаралды 29 сәуір 2024; Қабылданды 17 мамыр 2024.

УДК 711  
МРНТИ 67.07.11  
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДОРОЖНЫХ ПЛИТ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И ФИБРОВЛОКНА

Б.Т. Копжасаров<sup>1</sup> , Д.А. Ахметов<sup>2</sup> , А.М. Жагифаров<sup>2\*</sup> , И.Е. Абдраимов<sup>1</sup> ,  
М.Т. Куттыбай<sup>1</sup> , Ж.О. Жумадилова<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Южно-казахстанский университет им. М.Ауэзова, 160012, Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Сатпаев университет, 050013, Алматы, Казахстан

---

**Аннотация.** *Представлены результаты испытаний физико-механических свойств бетона для дорожных плит с объемным армированием полипропиленовыми макро- и микроволокнами. Нами проанализирован эффект от использования макроволокон и микроволокон в составе бетона. Установлено влияние низкомодульных синтетических волокон на характеристики прочности, плотности, водостойкости и морозостойкости бетона для дорожных покрытий. Установлено, что полипропиленовые макроволокна влияют на физико-технические характеристики бетона, повышают прочность на сжатие и изгиб, а полипропиленовые микроволокна улучшают структуру цементной составляющей бетона, оптимизируют поровое пространство, повышают морозостойкость и водостойкость бетона. Экспериментально доказано, что за счет комбинированного использования волокнистых волокон различного размера можно изготавливать бетон, обладающий хорошими характеристиками по прочности, плотности и морозостойкости. Установлено, что при комбинированном армировании бетона фиброволокном с добавкой микрокремнезема получаем возможность повышения прочности на изгиб до 35 %, морозостойкости до F375 и водостойкости до W14. Результаты исследований позволяют рекомендовать многомерные полипропиленовые волокна для объемного армирования и микрокремнезем для создания дополнительных центров кристаллизации и уменьшения порового пространства в теле бетона при изготовлении дорожных плит.*

**Ключевые слова:** *фибробетон, низкомодульные синтетические волокна, прочность на изгиб, морозостойкость, водостойкость, микрокремнезем.*

---

\*Автор-корреспондент

Адлет Жагифаров, e-mail: [adletzhagifar@gmail.com](mailto:adletzhagifar@gmail.com)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-06>

Поступило 16 апреля 2024 г.; Пересмотрено 29 апреля 2024 г.; Принято 17 мая 2024 г.

## **ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING**

This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR21882292 – “Integrated development of sustainable construction industries: innovative technologies, optimization of production, effective use of resources and creation of technological park”).

## **CONFLICT OF INTEREST**

The authors state that there is no conflict of interest.

---

## **АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ**

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (BR 21882292 тақырыбы бойынша: "тұрақты құрылыс саласын интеграцияланған дамыту: инновациялық технологиялар, өндірісті оңтайландыру, ресурстарды тиімді пайдалану және технологиялық парк құру")

## **МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ**

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

---

## **БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант BR 21882292 по теме: «Интегрированное развитие устойчивой строительной отрасли: инновационные технологии, оптимизация производства, эффективное использование ресурсов и создание технологического парка»).

## **КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

## 1 КІРІСПЕ

Зерттеу құрылыс жобаларында жол тақталарын пайдаланатын компаниялардың көптеген сұраныстары бойынша жүргізілді. Құрылысшылар осы өнімдердің қалыңдығы мен салмағын азайта отырып, беріктігі, тығыздығы және аязға төзімділігі жақсартылған физикалық-техникалық көрсеткіштері бар жол тақталарын алғысы келеді. Бұл физика-механикалық сипаттамалары жақсартылған көп компонентті құрылымның бетондарының белсенді дамуының арқасында мүмкін болды. Оларға танымал болып келе жатқан әртүрлі мақсаттағы көлемді талшықты арматурасы бар ауыр бетондар жатады. Арматуралық талшықтардың ең перспективалы түрлері полипропилен талшықтары болып табылады, олар жақында Құрылыс бұйымдары мен бетон конструкцияларын өндіруде кеңінен қолданылады ([Zhavoronkov, 2017](#)). Сонымен қатар, полимерлі талшық, мысалы,  $pH > 7$ -де бетонның сілтілі ортасында оңай коррозияға ұшырайтын шыны талшықпен салыстырғанда коррозияға төзімділікпен сипатталады. Дегенмен EN 197-1:2011 стандартын қолдана отырып, полипропилен талшықтары бар фибробетонның ыдырау процесін егжей-тегжейлі зерттеу деформацияның келесі кезеңдерінде талшықтың мінез-құлқы өзгерісін зерттеу нәтижелері бойынша салынған графикте көрсетілген ([сурет 1](#)).



**Сурет 1** - Төмен модульді талшықтың көлемдік құрамына байланысты фибробетон беріктігінің өзгеру сипаты (авторлар материалы).

Қоспадағы талшықтардың аз мөлшерінен композиттің беріктігі өзгермейтінін [1 суреттен](#) көруге болады, талшықтардың шығыны ұлғайған сайын беріктіктің шамалы төмендеуі байқалады, бірақ олардың саны одан әрі ұлғайған кезде бұл төмендеу талшықтың бетіне жақын цемент тасының құрылымын тығыздау және қатайту арқылы өтеледі және ол 17% - ға дейін артуы мүмкін. Болашақта цемент матрицасының беріктігі технологиялық себептерден туындаған оның құрылымындағы ақаулар мен стратификациялардың пайда болуына байланысты төмендейді. Цемент матрицасының құрамындағы төмен модульді талшықтардың мұндай аралас мінез-құлқы қосымша зерттеулерді қажет етеді ([Ismailov et al., 2018](#)).

Бетонның физикалық-техникалық сипаттамаларын жақсартуға және цемент матрицасының кеуекті мөлшерін азайтуға ферросилиций өндірісінің қалдық өнімі ультра жұқа белсенді кремний диоксиді қосу арқылы қол жеткізіледі ([Puharenko et al., 2020](#)). Бұл мақалада беріктіктің, тығыздықтың және аязға төзімділіктің физикалық және техникалық көрсеткіштерін жақсарту мақсатында көлемді талшықты күшейту және цемент матрицасын микрокремниймен модификациялау арқылы жасалған жол плиталарына арналған ауыр бетонның физикалық, механикалық және пайдалану сипаттамалары қарастырылады. Мақалада өнімдегі цемент пен арматуралық металдың мөлшерін азайту, технологиялық процесті жеңілдету және өндірістік процестерді автоматтандыру арқылы қол жеткізілетін шығындарды азайту мәселелері де жанама түрде қарастырылған ([Puharenko et al., 2008](#); [Puharenko et al., 2020](#); [Akhmetov et al., 2022](#)).

Зерттеудің мақсаты жоғары өнімділік қасиеттері бар жол плиталарын жасау үшін бетонның оңтайлы құрамын табу болды.

Осы мақсатқа жету үшін бірнеше шешімдер ұсынылды:

- әртүрлі мөлшердегі талшықтары бар 2 компонентті талшықты қолдана отырып, ауыр бетондардың құрамын таңдау және EN 197-1:2011 стандартын пайдаланып, олардың сипаттамаларын зерттеу;

- микрокремнеземді қосу арқылы цемент матрицасын өзгерту және алынған нәтижелерді бағалау.

- кезектесіп мұздату және еріту әдісімен аязға төзімділікті сынау, соңғы конгломераттың тығыздығы мен суға төзімділігін бағалау арқылы алынған композициялардың қызмет ету мерзімін зерттеу ([Ismailov et al., 2018](#)).

## 2 МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Бетон қоспасы үшін шикізат пен басқа компоненттерді талдау және таңдау халықаралық стандарттар талаптарын ескере отырып, өндірушілер ұсынған мәліметтер бойынша жүзеге асырылды. Содан кейін сынау үшін зауытта жол плиталарын шығаратын C25/30 класты ауыр бетонның бақылау құрамы таңдалды. Әрі қарай, осы зерттеу саласындағы авторлардың бұрын жарияланған жұмыстарын ескере отырып, цементтің бір бөлігін кремний диоксидімен ауыстыруды қамтитын ауыр бетонның құрамын есептеуге бағытталған теориялық зерттеу жүргізілді. Содан кейін алынған нәтижелер өңделіп, талданды және алынған композициялардың беріктігін, тығыздығын, аязға төзімділігін және суға төзімділігін арттыру үшін екі түрлі өлшемдегі полипропилен талшығының оңтайлы мөлшерін бетонға енгізу үшін жұмыс бағытын одан әрі таңдау анықталды. Қолданбалы зерттеулер теориялық әдістерді тәжірибе жүзінде растауға және өндірістік сынақтан өткізуге бағытталған.

Зерттеу 6 кезеңде жүргізілді, олардың әрқайсысы нақты міндеттерді шешуге бағытталған:

- 1 кезең: осы материалдардың нормативтік құжаттарына сәйкес зерттеу үшін негізгі материалдарды таңдау.

- 2 кезең: микрокремнеземнің оңтайлы мөлшерін пайдалана отырып, C25/30 класты ауыр бетондардың тәжірибелік құрамдарын бағалау және іріктеу, EN 12390-3:2019 стандартын қолдана отырып негізгі физикалық-техникалық көрсеткіштерді анықтау.

- 3 кезең: полипропилен талшығының 2 танымал түрінің есептік санын кезең-кезеңмен және бірлесіп қосу және 28 күндік бетонның негізгі физикалық-техникалық параметрлерін анықтау.

- 4 кезең: бетонның тығыздығын, аязға төзімділігін, көлемді суды сіңіруді сынау және өлшеу арқылы үлгілерді пайдалану сенімділігіне сынау.

- 5 кезең: алынған нәтижелерді салыстыру, талқылау және талдау.

- 6 кезең: пайдалану бойынша негізгі тұжырымдар мен ұсыныстар.

Пайдаланылған материалдардың сипаттамасы төменде келтірілген.

1-кестеде EN 12620:2013 стандартына сәйкес қабылданған байланыстырғыштың (цементтің) сипаттамалары көрсетілген.

Цементтің сипаттамасын.

Цемент маркасы - ЦЕМ I 42,5Н, өндіруші - "Гейдельберг" ЖШС (Шымкент, Қазақстан), қысу беріктігі 28 тәулік жасында - 50,1 МПа кем емес, бастапқы қатуы - 100 мин кем емес, 1 м<sup>3</sup> ауыр бетонға шығын – 350-450 кг. Көрсетілген цемент сипаттамаларын EN 196-2:2013 стандартынан алынған. (ЦЕМ I 52,5 Н егжей-тегжейі: ([Ristavletov et al., 2019](#)) мақалада келтірілген - гипстің құрамы бойынша бірінші типті білдіреді (SO<sub>3</sub>-ке сәйкес), ол 1,5%-тан төмен емес және 3,5-4,0% - тан жоғары болмауы керек; 42,5-қысу беріктігінің минималды нормативтік мәніне сәйкес келетін беріктік класын білдіреді; N-ерте жаста қалыпты беріктігі бар сыныпты білдіреді).

Кестеде 1 ЦЕМ I 42,5 N химиялық құрамы көрсетілген. Химиялық құрамы EN 933-1:2012 стандартына сәйкес берілген.

**Кесте 1**

CEM I массалық үлесінің мазмұны 42,5 N, % (авторлар материалы)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Басқа қоспалар
20.30	5.75	5.36	63.18	3.07	0.77	0.78	0.48	0.36

Таңдалған байланыстырғыштың талаптарға және стандартқа сәйкестігін растау үшін, EN 12620:2013 стандартын қолданып бірқатар сынақтар жүргіздік. EN 933-1:2012 және BS EN 13263-1:2005+A1:2009 стандарттарына енгізілген әдістер келесі параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді:

1) ұнтақтау жұқалығы:

Сыналған байланыстырғыш 92,9% ұнтақтауды көрсетті.

2) Цемент пастасының қалыпты тығыздығы және қату уақыты:

Сыналған байланыстырғыш қалыпты тығыздықты 26,1% көрсетті. 2 сағат 01 минут, ал орнату өлшеу сәтінен бастап 4 сағат 18 минуттан кейін аяқталды. Алынған көрсеткіштерді EN 933-1:2012 және өндірушіден құм BS EN 13263-1:2005+A1:2009 стандарттарына сәйкес келеді.

Өндіруші «Марка» ЖШС (Алматы облысы, Қазақстан) құмы пайдаланылды. Бұл толтырғыш стандарт талаптарына сәйкес келеді. 3-кестеде қолданылатын ұсақ толтырғыштың (құмның) сипаттамалары көрсетілген.

Құмның қасиеттері.

Құм тобы – дөрекі, Өндіруші – «Марка» ЖШС (Алматы, Қазақстан), Дән мөлшері – 2,55 мм, № 063 елеуіштегі жалпы қалдық – 61,4 %, Шаң және саз қоспаларының мөлшері – 1,03 % Ауыр бетонның 1 м<sup>3</sup> шығыны – 800 -1000 кг.

Бетон қоспасы мен бетонның қанағаттанарлық сипаттамаларын алу үшін шаң тәрізді қосындылардың мөлшері 1,5% аспайтын құмды пайдалану қажет. Зерттелетін құмдағы шаң мен саз қоспаларының мөлшері 1,03% құрады. Құмның ұсақтық модулі 2,55 болды. Бұл көрсеткіштер EN 13263-1:2005+A1:2009 стандарты бойынша ауыр бетонда зерттелетін толтырғышты қолдану үшін қолайлы.

5-10 мм, 10-15 мм, 10-20 мм, 15-20 мм, 20-40 мм, 40-80 мм фракцияларын және 5-20 мм фракцияларының қоспаларын себу кезінде бақылау електеріндегі қалдық сомасының бетон қоспасының қанағаттанарлық сипаттамаларын алғанға дейін ауыр бетондардың ірі агрегаттары (қиыршық тас) үшін 2-кестеде көрсетілгендерге сәйкес келуі тиіс, мұндағы d және D – мм-дегі ең кіші және ең үлкен номиналды астық мөлшері.

**Кесте 2**

Дөрекі толтырғыш үшін ұсынылатын скрининг көрсеткіштері\* (авторлар материалы)

Бақылау електерінің тесіктерінің диаметрі, мм	Бақылау електеріндегі қалдықтардың сомасы, массасы бойынша %
г	90- нан 100- ге дейін
0,5( d+D )	30- дан 60-ға дейін _
D	10- ға дейін
1,25D	0,5 дейін

\* 5-10 мм фракциялардың қиыршық тастары және 5-20 мм фракциялардың қоспалары үшін қосымша: 2,5 мм (немесе 1,25 мм) төменгі елеуіштер, олардың жалпы қалдығы 95% -дан 100% -ға дейін болуы керек.

Көрсеткіштерді BS EN 13263-1:2005+A1:2009 осы стандартқа сәйкес қолдандық. Өндіруші мен тұтынушы арасындағы келісім бойынша електің жалпы қалдығы 0,5 ( d+D ) массасы бойынша 30-дан 80%-ға дейін қиыршық тас өндіруге рұқсат етіледі.

## Кесте 3

Сипаттамалар үлкен толтырғыш (авторлар материалы)

Астық мөлшері, мм	Өндіруші	Електердегі толық қалдықтар 0,5 (д+Д), % (норма 30-60)	Електегі толық қалдық 1,25 Д, % (норма 0,5 аспайды)	Ауыр бетонның 1 м <sup>3</sup> шығыны, кг
5-10	Балтабай, ЖШС	56,22	0,37	200-400
10-20	(Алматы, Қазақстан)	58,97	0,45	500-700

(Bazhenov, 2011) сәйкес қабылданған модификациялаушы қоспаның (кремний газының түтінінің) сипаттамалары көрсетілген.

## Кесте 4

Микрокремнийдің сипаттамалары (авторлар материалы)

Түр	Өндіруші	Белсенді SiO <sub>2</sub> массалық үлесі, салмағы бойынша%, кемінде 95	Ауыр бетонның 1 м <sup>3</sup> шығыны, кг
МК-95	«Тау-Кен Темір» ЖШС, Қарағанды к., ҚР	95,9	50-ге дейін

Микрокремнийдің құрамында диаметрі 0,1 мкм, меншікті бетінің ауданы 15-25 м<sup>2</sup>/г және одан жоғары сфералық бөлшектер бар. Сусымалы тығыздығы 150-ден 250 кг/м<sup>3</sup>-ге дейін. Химиялық құрамы бойынша микрокремний негізінен кристалды емес кремний диоксидімен ұсынылған, оның мөлшері әдетте 85-тен асады және 98% жетеді. Микрокремнийдің меншікті бетінің ауданы «Тау Күн Темір» ЖШС мәліметтері бойынша 3980 см<sup>2</sup>/г, Қарағанды, Қазақстан (Ristavletov et al., 2019).

(Reddy & Naqash, 2020) сәйкес қабылданған микрокремнийдің химиялық құрамы көрсетілген.

## Кесте 5

Микрокремнийдің химиялық құрамы МК-95,% (авторлар материалы)

SiO <sub>2</sub>	C	Ылғал	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	pH	ρ, г / см <sup>3</sup>	п.п.п.
95,9	1,3	1,07	0,07	0,2	0,46	7,89	0,44	2,68

Микрокремнеземнің сапа стандарттарымен салыстырғанда Interstate Standard GOST21924.0-84 пайдалана отырып өндіруші ұсынған химиялық құрамнан микрокремнезем құрамындағы оксидтердің мөлшері қойылған міндеттердің нәтижелерін алу үшін жеткілікті екендігі шығады.

Кестеде 6-да (Bazhenov, 2011) сәйкес қабылданған химиялық қоспаның (поликарбонатты гиперпластификатор) сипаттамалары келтірілген.

## Кесте 6

Поликарбонаттың сипаттамасы гиперпластификатор РКЕ (авторлар материалы)

Түрі	Өндіруші	Аддитивті тиімділік критерийлері	Ауыр бетонның 1 м <sup>3</sup> шығыны, кг
AR 122	«ARPG» ЖШС Астана, Қазақстан	П1-ден П5-ке дейін	5-тен 8-ге дейін

1 және 28 күндік қатаю кезеңдеріндегі тәжірибелік құрамдармен салыстырғанда негізгі құрамдардағы беріктігінің өзгеруімен ( $\Delta R_t$ , %) бағаланды (формула 1).



$$\Delta R_t = \left( \frac{R_t^{\text{контр}} - R_t^{\text{осн}}}{R_t^{\text{контр}}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Қайда  $R_t^{\text{осн}}$  және  $R_t^{\text{контр}}$  - t, МПа қатаю уақыты бойынша негізгі және тәжірибелік құрамдағы бетонның немесе ерітінділердің беріктігі.

Геометриялық сипаттамалардағы айырмашылық негізінде арматуралық талшықтар шартты түрде микроталшықтарға (диаметрі ондаған микрометрге жетеді, ал ұзындығы, әдетте, 25 мм-ге дейін болады) және макроталшықтарға (диаметрі бірнеше миллиметрге жетеді, ұзындығы - ондаған миллиметр). Эксперименттік зерттеулер кезінде синтетикалық күшейтетін талшықтардың екі түрі қолданылды - макроталшықтар FibroLux және микрофибрлер Фибрин «Фибролюкс» ЖШҚ, Санкт-Петербург, өндіруші мәлімдеген олардың сипаттамалары 7-кестеде көрсетілген.

### Кесте 7

Қолданылатын талшықтардың техникалық сипаттамалары (авторлар материалы)

Сипаттама	Мағынасы	
Талшықтың атауы	FibroLux	Fibrin
Талшық түрі	Макрофибра	Микрофибра
Материал	өзгертілген полипропилен	өзгертілген полипропилен
Орташа тығыздығы, кг/м <sup>3</sup>	920	907
Ұзындығы, мм	50	15
Эквивалентті диаметрі, мм	0,75	0,02
Созылу беріктігі, МПа	415	385
Химиялық әсерге төзімділік	-	-
Балку температурасы, °С	170	170
Жану температурасы, °С	> 350	> 350
Серпімділік модулі, МПа	-	-
Өткізгіш қуат	-	-

Бұдан әрі 8-кестеде ПД 1-6 және ПД 2-6 жол плиталарын өндіру үшін пайдаланылатын цемент тұтқыр затты және EN 206:2013+A1:2016 осы стандартты пайдаланып жасалған С25/30 класты өнеркәсіптік бетонның құрамы келтірілген. Бұл композицияны біз одан әрі эксперименттер үшін бақылау ретінде қабылдадық.

### Кесте 8

С25/30 класындағы бетонның бақылау құрамы (авторлар материалы)

Цемент		Құм		Қиыршық тас (5-10 мм)		Қиыршық тас (10-20 мм)		PCE - AR 122		Су		Тығыздық
кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг / м <sup>3</sup>
400	16.1	971	39.2	287	11.6	667	26.9	5.9	0.24	148	6	2382,3

Микросилика цемент, толтырғыш және толтырғыш конгломератының кеуектерінде бола отырып, бетонның тығыздығын арттыру үшін қолданылады, микрокремний композицияның қатты фазасын жоғарылатады және оны тығыздайды, осылайша бетонның тығыздығын арттырады және бетонның реологиялық қасиеттерін өзгертеді ([Raza et al., 2022](#)).

Содан кейін үлгілер EN 1992-1-1:2004/AC:2008 стандартына сәйкес беріктікке, орташа тығыздыққа, аязға төзімділікке және суға төзімділікке сыналған ([Uteпов et al., 2020](#)).

Талшықты темірбетон үлгілерін сынау нәтижесінде алынған тәжірибелік мәліметтерді талдау бір өлшемдегі талшық тәжірибелік бетонның кейбір сипаттамаларын ғана жақсартатынын көрсетті, ал басқа қасиеттері іс жүзінде өзгеріссіз қалады. Мысалы, полипропиленді макроталшықтар бетонның беріктігін арттырады, бірақ талшықты темірбетонның аязға төзімділігі мен суға төзімділік сипаттамаларына іс жүзінде әсер етпейді. Микрофибр сонымен қатар аязға төзімділікті, суға төзімділікті және тозуға төзімділікті арттырады (Anas et al., 2022), бірақ беріктіктің артуы 10% -дан аспайды. Нәтижесінде беріктігі де, беріктігі де жоғары бетон алу үшін әртүрлі өлшемдегі талшықтарды бір конгломератқа біріктіру туралы шешім қабылданды.

Қолда бар мәліметтерге сәйкес әртүрлі қатынаста ұсынылған төмен модульді макро- және макроталшықтармен бір мезгілде күшейтілген талшықты темірбетонның физикалық және техникалық параметрлеріне эксперименталды зерттеулер жүргізілді. Төменде келтірілген әдістемені пайдаланатын факторлар.

## 2.1 ИІЛУ КЕЗІНДЕГІ ҚЫСУ ЖӘНЕ СОЗЫЛУ БЕРІКТІГІНІҢ НЕГІЗГІ СИПАТТАМАЛАРЫН АНЫҚТАУ

Сығылу және созылу кезінде иілу сынақтарының бөлігі ретінде 100×100×100 мм және 100 × 100 × 400 мм пішіндегі үлгілер тәжірибелік құрамның қоспасынан, содан кейін EN 12350-2:2019 стандартына сәйкес әрбір келесі сынақ композициясынан қалыптастырылды. Содан кейін үлгілер 28 күнге жеткенде сынақтар жүргізілді.

Осы сынақтардың нәтижелерін өңдеу және бағалау мына формула бойынша жүргізілді: Бетонның қысу беріктігі ( $R$ , МПа) формула бойынша 0,01 МПа дәлдікпен есептелді.

$$R = \alpha \frac{F}{A} K_W \quad (2)$$

мұндағы:  $F$  – үзу жүктемесі, N;  $A$  – үлгінің жұмыс бөлігінің ауданы, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  - 100x100x100 мм өлшемдегі үлгілердегі бетонның беріктігін бетонның беріктігіне дейін төмендетуге арналған масштабтық факторлар;

Бетонның иілу кезіндегі созылу беріктігі формула бойынша 0,01 МПа дәлдікпен есептелді.

$$R_{bt} = \delta \frac{Fl}{ab^2} K_W \quad (3)$$

мұндағы:  $F$  – үзу жүктемесі, N;

$a$ ,  $b$ ,  $l$ , - сынамаларды созу иілісіне сынау кезінде сәйкесінше призма қимасының ені, биіктігі және тіректер арасындағы қашықтық, мм;

$\delta$  - негізгі өлшемдер мен пішіндердің үлгілеріндегі бетонның беріктігін бетонның беріктігіне дейін төмендетуге арналған масштабтық коэффициенттер;

$K_W$ - сынау кезінде үлгілердің ылғалдылығын ескере отырып, ұяшықты бетон үшін түзету коэффициенті (ауыр, ұсақ түйіршікті және ALP үшін қолданылмайды).

микрокремнийі мен көлемді талшықты арматураның иілу кезіндегі қысу және созылу беріктігіне әсерінің тәуелділігі анықталды.

## 2.2 БЕТОННЫҢ СУ ӨТКІЗБЕЙТІНДІГІН АНЫҚТАУ

Бетонның суға төзімділігін анықтауға арналған сынақтар EN 12350-2:2019 стандартына сәйкес жүргізілді, мұнда суға төзімділік бойынша бетонның сыныбын анықтау кезінде су қысымы әрбір 1-5 минут сайын 0,2 МПа қадаммен көтеріледі және әр қадам сайын сақталады, белгілі бір уақытқа. Сынақ үлгінің жоғарғы шеткі бетінде тамшылар түрінде суды сүзу белгілері немесе ылғалды дақ пайда болғанша жүргізіледі (Muhammad et al., 2015). Бетонның

су өткізбейтіндігі  $W$  дәрежесі судың максималды қысымына (0,1 МПа) сәйкес келетін бетонның су өткізбейтіндігінің көрсеткіші ретінде түсініледі, бұл кезде (визуалды бағалау бойынша) дымқыл нүкте әдісімен сыналған үлгі арқылы суды сүзу болмайды (Li et al., 2023).

Әрбір үлгінің суға төзімділігі оның үлгі арқылы сүзілуі әлі байқалмаған судың максималды қысымымен бағаланады.

Үлгілер жиынтығының суға төзімділігі алты үлгінің кем дегенде төртеуінде сүзу байқалмаған судың максималды қысымымен бағаланады.

Суға төзімділік үшін бетонның маркасы 9-кестеге сәйкес қабылданады

### Кесте 9

Бетонның суға төзімділігі (авторлар материалы)

Үлгілер жиынтығының суға төзімділігі, МПа	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Су өткізбейтін бетон маркасы	W2	W4	W6	W8	W10	W12	W14	W16	W18	W20

## 2.3 БЕТОННЫҢ ОРТАША ТЫҒЫЗДЫҒЫН АНЫҚТАУ

Бетонның орташа тығыздығын анықтау үшін сынақтар жүргізілді, онда қалыпты пішінді үлгілердің көлемі олардың геометриялық өлшемдері негізінде есептеледі. Үлгілердің өлшемдері қателігі 1% аспайтын сызғыш немесе штангенциркуль көмегімен анықталады. Үлгілердің массасы 0,1%-дан аспайтын қателікпен өлшеу арқылы анықталады.

орташа тығыздығы  $\rho_w$ , кг/м<sup>3</sup> келесі формула бойынша 1 кг/м<sup>3</sup> дейінгі қателікпен есептеледі:

$$\rho_w = m / V * 1000 \quad (4)$$

мұндағы  $m$  – үлгінің массасы, кг;  $V$  – үлгі көлемі, м<sup>3</sup>. Бетонның орташа тығыздығы жинақтың барлық үлгілерінің сынау нәтижелерінің орташа арифметикалық мәні ретінде есептеледі.

Орташа тығыздық бойынша барлық мәліметтерді алғаннан кейін (13,14-кестелер) әртүрлі өлшемдегі полипропилен талшықтарымен талшықты арматураның әсерінің және бір мезгілде полиарматуралық әсердің бетонның орташа тығыздығына тәуелділігі анықталды.

## 3 НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУ

Зертханалық сынақтар кезінде алынған үлгілердің физикалық-механикалық сипаттамаларының мәндері кестеде келтірілген. 10. 1м<sup>3</sup> микрокремний қосындылары бар бетонның құрамдары және 7 және 28 күндік беріктік деректері.

### Кесте 10

МК-95 микрокремниймен С25/30 класты бетонның құрамы (авторлар материалы)

№	W/C	Цемент		Құм		Қиыршық тас (5-10 мм)		Қиыршық тас (10-20 мм)		AR-122		MC-95		Су		2 күндік қысу күші		7 күндік қысу күші	
		кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	МПа	%	МПа	%
1*	0.37	400	16.1	971	39.2	287	11.6	667	26.9	5.9	0.24	-	-	148	6.0	23.3	71,3	33.1	101,1
2	0.37	400	16.0	971	38.5	287	11.5	667	26.8	5.9	0.24	10	0.4	152	6.1	24.8	75,7	34.2	104.6
3	0.36	390	15.7	971	39.0	287	11.5	667	26.8	5.9	0.24	20	0.8	147	5.9	25.2	77,1	36.6	111.9
4	0.36	380	15.3	971	39.0	287	11.5	667	26.8	5.9	0.24	30	1.2	147	5.9	26.0	79,6	37.9	115.8
5	0.35	370	14.9	971	39.1	287	11.6	667	26.8	5.9	0.24	40	1.6	144	5.8	26.6	81,4	39.3	120.2
6	0.35	360	14.5	971	39.1	287	11.6	667	26.8	5.9	0.24	50	2.0	144	5.8	27.2	83,3	41.8	127.7

\* пилоттық композиция

C25/30 класындағы тәжірибелік бетон құрамының 32,7 МПа орташа қысу беріктігі 100% деп алынды.

Үстелден 10-суретте цементтің бір бөлігін микрокремний тотығымен МК-95 алмастырған кезде бастапқы кезеңде беріктіктің жоғарылауының жалпы тенденциясы көрсетілген, ал микрокремний тотығының көбеюімен әсер күшейеді, белсенді SiO<sub>2</sub> қосылуы түзілу үшін жағдай жасайды. негізінен төмен негізді элементтерден тұратын кристалдардың ең тығыз қаптамасы бар құрылым кальций гидросиликаттары (кальций силикат гидроксиді гидраты) Ca<sub>5</sub>(OH)<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>\*4H<sub>2</sub>O(CaO/SiO<sub>2</sub><1,5), бұл авторлардың (Puharenko & Kostrikin; 2020)-да баяндалған теориясын растайды.

3-суретте цементті кремнеземмен ішінара алмастыратын тәжірибелік бетон құрамы мен құрамдары үшін 7 және 28 күндік жаста беріктіктің пайыздық өсімі анық көрсетілген.



Сурет 2 - Микрокремний қосындылары бар үлгілердің сығымдалу беріктігі (авторлар материалы)

50 кг-ға дейінгі мөлшердегі микрокремний МК-95пен ауыстыру 7 күндік жаста беріктік өсімін 12%-ға дейін арттыруға мүмкіндік беретінін көруге болатынын және EN 12350-2:2019 стандартына сәйкес 28 күндік жаста 25%-ға дейін және тармағында көрсетілген реологиялық және беріктік сипаттамаларын сақтай отырып, ЦЭМ цемент I 1 м<sup>3</sup>-ке 42,5 н шығынын 400 кг-нан 360 кг-ға дейін төмендетеді.

Талшықты темірбетон композицияларының жиынтық физикалық және техникалық сипаттамалары 11-кестеде келтірілген.

Бетонды талшықтармен арматуралау нәтижесінде алынған тәжірибелік мәліметтердің сынақ нәтижелерін талдау және кестеде келтірілген. 11 талшықтардың кейбір түрлері бастапқы бетонның кейбір қасиеттерін ғана жақсартатынын көрсетті, ал оның басқа қасиеттері іс жүзінде өзгеріссіз қалады. Мысалы, автор бұрын (Akhmetov et al., 2022) көрсеткендей, полипропилен микроталшықтары талшықты темірбетонның төзімділік сипаттамаларына аздаған әсер етіп, қысу және иілу кезінде беріктік сипаттамаларын орта есеппен 27%-ға арттыратынын анықталды. Керісінше, микроталшықтарды пайдалану аязға төзімділікті, суға төзімділікті және тозуға төзімділікті жақсартуға әкеледі, ал беріктіктің артуы 10% -дан аспайды, бұл бұрын жарияланған жұмыстарға сәйкес келеді.

Бір құрамдағы, бірақ әртүрлі пропорциядағы әртүрлі өлшемдегі талшықтарды бір мезгілде қолдану арқылы талшықты темірбетонды құрамдарды сынау нәтижелері көрсетілген.

#### Кесте 11

Полипропилен талшықтарымен нығайтылған бетонды сынау нәтижелері (авторлар материалы)

№	Көрсеткіштер	Талшықтарды пайдалану кезіндегі көрсеткіштердің мәні				
		Талшықсыз Бетон	Фибрин микроталшық (0,1 %)	Фибрин микроталшық (0,2 %)	ФibroLux микроталшық (0,8 %)	ФibroLux микроталшық (1,1 %)
1	Орташа тығыздығы ρ, кг / м <sup>3</sup>	2346	2371	2368	2379	2400
2	Сығымдау беріктігі	33.9	37.2	36.9	40.7	43.2

Рсж, МПа						
3	Иілу беріктігі R, МПа	5.44	5.47	5.52	6.61	7.23
4	Аязға төзімділік F, цикл	220	280	340	225	230
5	Суға төзімділік класы, Вт	W8	W14	W14	W8	W10
6	Абразивті қабілеті G, г/см <sup>2</sup>	0,77	0,58	0,56	0,72	0,74

## Кесте 12

Әртүрлі өлшемдегі талшықтармен күшейтілген үлгілердің физикалық-механикалық сипаттамалары (авторлар материалы)

№	Көрсеткіштер	Талшықтарды пайдалану кезіндегі көрсеткіштердің мәні				
		Талшық-сыз Бетон	Фибрин микроталшық (0,1 %) + FibroLux макроталшық (0,8 %)	Фибрин микроталшық (0,2 %) + FibroLux макроталшық (0,8%)	Фибрин микроталшық (0,1 %) + FibroLux макроталшық (1,1 %)	Фибрин микроталшық (0,2%) + FibroLux макроталшық (1,1 %)
1	Орташа тығыздығы $\rho$ орташа, кг / м <sup>3</sup>	2346	2365	2341	2381	2372
2	Сығымдау беріктігі Рсж, МПа	33.9	41.3	41,0	42.6	41.3
3	Иілу беріктігі R, МПа	5.44	6.83	7.03	7.31	7.11
4	Аязға төзімділік F, цикл	220	330	355	360	375
5	Суға төзімділік класы, Вт	W8	W12	W14	W14	W12
6	Абразивті қабілеті G, г/см <sup>2</sup>	0,77	0,51	0,51	0,46	0,44

Алынған мәліметтерден бетонды төменгі модульді талшықтармен арматуралау ауыр бетонның сапасын арттырудың перспективті бағыты болып табылатыны шығады. Әртүрлі өлшемдегі талшықтардың комбинациясын оңтайлы мөлшерде қолдана отырып, макроталшықпен нығайтылған бетонға тән жоғары беріктік сипаттамаларын және полипропилен микроталшықтарымен арматураланған бетон алатын жоғары беріктік көрсеткіштерін біріктіретін бетон алуға болады, бұл стандартты талаптарға сәйкес келеді. (Ristavletov et al., 2019)-де баяндалған авторлардың пікірі. Композициялар қысу беріктігінің орташа есеппен 25%-ға және бақылау құрамға қатысты иілу беріктігінің орташа есеппен 30%-ға артуы, сәйкесінше суға төзімділіктің 3 класқа (W8-ден W14-ке дейін) жоғарылауы нәтижелерімен ұқсас сипаттамаларды көрсетті.), аязға төзімділігі 61%, тозуға төзімділігі 40%. Алынған нәтижелер жол плиталарын көлемді күшейту үшін, әсіресе әртүрлі өлшемдегі талшықтармен полиарматура арқылы төмен модульді синтетикалық талшықтарды қолданудың орындылығын көрсетті (Rabinovich, 2004).

## 4 ҚОРЫТЫНДЫЛАР

Көптеген зертханалық және өндірістік сынақтарға сүйене отырып, бетон құрамындағы цементтің бір бөлігін кремний диоксидімен алмастыру экономикалық және ғылыми тұрғыдан негізделген деп қорытынды жасауға болады. Осылайша, әдеттегі бетон композицияларынан айырмашылығы, модификацияланған бетондар цементті 20% -ға дейін үнемдеуге мүмкіндік береді, сонымен бірге жақсы тығыздық, аязға төзімділік және судың көлемдік сіңіру қабілеті жоғарырақ өнімділік сипаттамаларын көрсетеді. Сынақ нәтижелері көрсеткендей, алынған деректер микрокремний қосындысы бар бетонды бұрын жүргізілген зерттеулермен және цементтің бір бөлігін реактивті пуццоланмен ауыстыру арқылы қосымша кристалдану орталықтарының пайда болуы және бетон корпусындағы кеуек кеңістігінің азаюы туралы теориялық болжамдармен сәйкес келеді. қоспалар (белсенді кремнезем SiO<sub>2</sub>), химиялық байланыс процесі ретінде Са (ОН)<sub>2</sub> белсенді минералды қоспамен - SiO<sub>2</sub> аз еритін қосылысқа

- кальций гидросиликатына теңдеу бойынша жүреді:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \times \text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ .

Қатайтын бетонда әрқашан микрожарықтар пайда болады, олар ерте мәжбүрлі кернеулер мен өздігінен кернеулер, цементті гидратациялау кезінде бетонның шөгуі немесе жылуды кетіру нәтижесінде пайда болады. Көп жағдайда олар кеуекті байланыс аймағында «цемент тасы - агрегаттық астық» пайда болады. Жарықшықтың негізі талшыққа тигенде, жарықшықтың одан әрі кеңеюі біраз уақытқа тоқтайды, өйткені талшық жарықшақтың негізіне әсер ететін созу күштерін сіңіреді; сызат тұрақтанады. Қысқа, өте жұқа көрінбейтін микрожарықтар көп болғандықтан, мұндай сызаттардың дамуын тиімді болдырмау үшін, ең алдымен, шағын диаметрлі талшықтардың көп болуы маңызды фактор болып табылады. Бұл жағдайда талшықтардың ұзындығы екінші дәрежелі мәнге ие, өйткені жарықшақтардың дамуының осы кезеңінде талшықтар мен цемент тасының матрицасы арасында салыстырмалы қозғалыстар болмайды, бұл біздің зерттеулеріміздің нәтижелеріне сәйкес келеді, одан ол талшықтардың мөлшері мен құрамының ұлғаюымен шөгу деформацияларының төмендеуіне жалпы тенденция бар және сәйкесінше талшықты арматураланған бетон конструкцияларындағы жарықтар ықтималдығы төмендейді және құрамға талшықтың белгілі бір мөлшерін енгізу бетон қоспалары конгломераттың шөгу деформацияларына төзімділігін арттырады және крекингті азайтады. Ғылыми тәжірибелердің нәтижелері полипропилен талшықтары бар жол плиталарына арналған бетонның көлемді талшықты арматурасының уәдесін көрсетті. Полипропиленді макроталшықтар бетонның беріктігі мен деформациялық сипаттамаларын жақсартатыны, ал полипропилен макроталшықтары цемент матрицасының құрылымын өзгертетіні, осылайша аязға төзімділік, суға төзімділік және тозуға төзімділік сияқты бетонның төзімділік көрсеткіштерін жақсартатыны анықталды. Тәжірибелер оңтайлы пропорцияда әртүрлі шөгінді талшықтарды бір мезгілде біріктіру арқылы беріктік сипаттамалары жоғары және беріктігі жоғары талшықты темірбетон алуға болатынын көрсетті. Бұл көрсеткіштерді жоғары беріктігі мен аязға төзімділігі жоғары жол плиталарын өндіруде қолдануға болады.

Қорытындылай келе, қысу беріктігі 25%-ға дейін, иілу беріктігі 35%-ға дейін, аязға төзімділігі F375-ке дейін және суға төзімділігі W14-ке дейін жоғарылаған бетон жол тақталары үшін алынған тәжірибелік деректер бізге ұсынуға мүмкіндік беретінін атап өткім келеді. қимасы қысқартылған және салмағы қазіргі кезде қолданылып жүргендерден 10-20%-дан аз жол плиталарының жарықшақтарға төзімділігін одан әрі өндірістік сынақтар үшін осы құрамдар.

## ӘДЕБИЕТТЕР

1. Akhmetov, D., Akhazhanov, S., Jetpisbayeva, A., Pukharenko, Y., Root, Y., Uteпов, Y. & Akhmetov, A. (2022). Effect of low-modulus polypropylene fiber on physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00814. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00814>
2. Akhmetov, D. A., Pukharenko, Y. V., Vatin, N. I., Akhazhanov, S. B., Akhmetov, A. R., Jetpisbayeva, A. Z. & Uteпов, Y. B. (2022). The Effect of Low-Modulus Plastic Fiber on the Physical and Technical Characteristics of Modified Heavy Concretes Based on Polycarboxylates and Microsilica. *Materials (Basel)*, 15(7), 2648. <https://doi.org/10.3390/ma15072648>
3. Anas, M., Khan, M., Bilal, H., Jadoon, S. & Khan, M. N. (2022). Fiber Reinforced Concrete: A Review, *MDPI*, 22, 3. <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>
4. Bazhenov, Y. M. (2011). *Concrete Technology*. ASV. Moscow, Russia. ISBN 978-5-93093-138-9. (In Russ.).
5. Ismailov, A. A., Ristavletov, R., Kopzhasarov, B., Baybolov, K., Kudabayev, R. &

- Mominova, S.** (2018). Effect of cost-effective alkaline additives on the hydration of slag-cement mixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(9), 429-440. <https://doi.org/10.3151/jact.16.429>
6. **Li, H., Zhou, A., Wu, Y., Deng, L., Zhu, K. & Lu, F.** (2023). Research and Development of Self-Waterproofing Concrete for Tunnel Lining Structure and Its Impermeability and Crack Resistance Characteristics. *Materials*, 16, 5557. <https://doi.org/10.3390/ma16165557>
  7. **Muhammad, N. Z., Keyvanfar, A., Zaimi, M., Abd.Majid, M.Z., Shafaghat, A. & Mirza, J.** (2015). Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches, 1(101), 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048>
  8. **Puharenko, Y. V., Sternin, V. S., & Legalov, I. N.** (2008). Opyit proektirovaniya i proizvodstva effektivnyih stroitelnyih konstruksiy iz fibroarmirovannyih betonov. *Populyarnoe betonovedenie*, 4, 113–117. Saint Petersburg, Russia. (In Russ.).
  9. **Puharenko, Y. V., Morozov, V. I. & Panteleev, D. A.** (2020). Opreделение prochnosti stsepleniya armi- ruyuschih volokon s matritsey v fibrobetone. *Stroitelnye materialy*, 3, 30–43. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-39-43> (In Russ.).
  10. **Puharenko, Y. V., & Kostrikin, M. P.** (2020). Stoykost fibrobetona k vyisokotemperaturnomu vozdeystviyu. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. No.2(88). 96–106. <https://oreluniver.ru/science/journal/sir/archive?p=29> (In Russ.).
  11. **Rabinovich, F. N.** (2004). Kompozityi na osnove dispersno-armirovannyih betonov: voprosyi teorii i proektirovaniya, tehnologii, konstruksii. ASV. Moscow, Russia. (In Russ.).
  12. **Raza, S. S, Amir, M. T., Azab, M., Ali, B., Abdallah, M., El Ouni, M. H. & Elhag, A. B.** (2022). Effect of micro-silica on the physical, tensile, and load-deflection characteristics of micro fiber-reinforced high-performance concrete (HPC), *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01380. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01380>
  13. **Reddy, B. N. & Naqash, J. A.** (2020). Review on Early Strength Concrete. *EPR International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*. <https://eprajournals.com/IJMR/article/4116>
  14. **Ristavletov, R., Baybolov, K., Kopzhasarov, B., Abshenov, K. & Kudabayev, R.** (2019). Effective multifunctional additives for concrete based on the wasters of the oil industry. *Structural Concrete*, 20(5), 1541-1550. <https://doi.org/10.1002/suco.201700284>
  15. **Uteпов, Y., Akhmetov, D. & Akhmatshaeva, I.** (2020). Effect of fine fillers from industrial waste and various chemical additives on the placeability of self-compacting concrete. *Computers and Concrete*. 25, 59–65. <https://doi.org/10.12989/cac.2020.25.1.059>
  16. **Zhavoronkov, M. I.** (2017). Razvitie metodov opredeleniya harakteristik treschinostoykosti fibrobetona. St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering., Saint Petersburg, Russia. (In Russ.).