



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_114

FTAXP 61.35.33

ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДАН ЖАСАЛҒАН КОРУНД МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ ОТҚА ТӨЗІМДІ БЕТОНДЫ ӘЗІРЛЕУ

РАЗРАБОТКА ЖАРОСТОЙКОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ КОРУНДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT CONCRETE BASED ON CORUNDUM MATERIALS FROM MAN-MADE WASTE

Н.В. Серая ^{1*}, В.Ю. Чернавин ¹, Г.К. Даумова ^{1*},
С.И. Миргородский ¹, Р.А. Рамазанова ¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Даумова Гульжан Камалбекқызы, e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

отқа төзімді бетон, корунд,
техногендік қалдықтар,
алюминий-фосфатты
байланыстырғышы,
модификация, жылуға
төзімділік, физикалық-
механикалық қасиеттері.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада құрамында құрамында корунды бар техногендік қалдықтарды пайдалана отырып, отқа төзімді бетонды әзірлеу нәтижелері қарастырылған. Байланыстырғыш компонент ретінде алюминий-фосфаттық байланыстырғышы, ал құрамды моификациялау үшін отқа төзімді саз қолданылады. Эксперименттер сазды енгізу және компоненттердің арақатынасын оңтайландыру бетонның өнімділігін, атап айтқанда оның беріктігі мен термиялық жүктемелерге төзімділігін едәуір арттыруға ықпал ететінін көрсетті. Компоненттердің оңтайлы қатынасы қалыпты жағдайда қысу беріктігінің 62-65 МПа дейін жоғарылауын қамтамасыз ететіні анықталды, ал ең жақсы үлгілер 75 МПа беріктікке жетті. 1000 °С температурада термиялық өңдеуден кейін беріктік 30-40 МПа деңгейінде сақталды, бұл бастапқы мәннің 60 %-дан астамын құрайды. Үлгілердің бұзу жүктемесі 168 кН-ға жетті, бұл материалдың жоғары көтергіш қабілетін растайды. Үлгілердің тығыздығы 2,8-2,9 г/см³ құрады, суды сіңіру 6-7 %-дан аспады, бұл отқа төзімді композициялық материалдарға қойылатын талаптарға сәйкес келеді. Микроқұрылымдық талдау корунд бөлшектерінің біркелкі таралуымен қатар, отқа төзімді фосфат матрицасының түзілуін растады. Алынған деректер әзірленген материалды жоғары температурада пайдалану жағдайында, әсіресе металлургиялық өндірістердің жылу агрегаттарының футеровкасы кезінде қолдану мүмкіндігін растайды.

Ключевые слова:

жаростойкий бетон,
корунд, техногенные
отходы, алюмофосфатная
связка, модификация,
термостойкость, физико-
механические свойства.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются результаты разработки жаростойкого бетона с использованием техногенных отходов, содержащих корунд. В качестве вяжущего компонента применена алюмофосфатная связка, а для модификации состава использовалась огнеупорная глина. Эксперименты показали, что введение глины и оптимизация соотношения компонентов способствуют существенному повышению эксплуатационных характеристик бетона, в частности его проч-



ности и устойчивости к термическим нагрузкам. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов обеспечивает повышение предела прочности на сжатие до 62-65 МПа при нормальных условиях, а лучшие образцы достигали прочности 75 МПа. После термообработки при 1000 °С прочность сохранялась на уровне 30-40 МПа, что составляет более 60 % от исходного значения. Разрушающая нагрузка образцов достигала 168 кН, что подтверждает высокую несущую способность материала. Плотность образцов составила 2,8-2,9 г/см³, водопоглощение не превышало 6-7 %, что соответствует требованиям к жаростойким композиционным материалам. Микроструктурный анализ подтвердил формирование термостойкой фосфатной матрицы с равномерным распределением корундовых зерен. Полученные данные подтверждают возможность применения разработанного материала в условиях высокотемпературной эксплуатации, особенно при футеровке тепловых агрегатов металлургических производств.

keywords:

heat-resistant concrete,
corundum, technogenic
wastes, aluminophosphate
binder, modification,
thermal stability, physico-
mechanical properties.

ABSTRACT

The article presents the results of the development of heat-resistant concrete using technogenic wastes containing corundum. An aluminophosphate binder was employed as the binding component, while refractory clay was used to modify the composition. Experimental studies demonstrated that the incorporation of clay and the optimization of component ratios significantly improved the performance characteristics of the concrete, particularly its strength and resistance to thermal loads. It was established that the optimal ratio of components increased the compressive strength to 62–65 MPa under normal conditions, with the best specimens reaching up to 75 MPa. After heat treatment at 1000 °C, the compressive strength remained in the range of 30–40 MPa, which corresponds to more than 60% of the initial value. The ultimate load-bearing capacity of the specimens reached 168 kN, confirming the high structural performance of the material. The density of the specimens was 2.8–2.9 g/cm³, while water absorption did not exceed 6–7%, which meets the requirements for heat-resistant composite materials. Microstructural analysis confirmed the formation of a thermally stable phosphate matrix with a uniform distribution of corundum grains. The obtained results confirm the applicability of the developed material under high-temperature service conditions, particularly for the lining of thermal units in metallurgical industries..

КІРІСПЕ

Отқа төзімді бетондарды әзірлеу қазіргі заманғы материалтану, химиялық инженерия және құрылыс ғылымының басты міндеттерінің бірі болып қала береді. Металлургиялық, химиялық және энергетикалық өндірістерге қойылатын талаптардың өсу жағдайында жоғары температураның ұзақ әсеріне төтеп беріп, беріктік қасиеттерін сақтай алатын материалдарды жасау аса маңызды болып табылады.

Монолитті отқа төзімді бетондар дәстүрлі отқа төзімді кірпіштерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие: олар конструкцияларға тығызрақ жанасуды қамтамасыз етеді, монтаж жұмыстарын азайтады және күрделі пішінді бөлшектерде тігіссіз футеровкаларды жасауға мүмкіндік береді (Chen, 2023).

Отқа төзімді бетондарды қолданудың әлемдік тәжірибесі жаңа буын материалдарын әзірлеуге қызығушылықтың артып келе жатқанын көрсетеді, атап айтқанда олар жоғары физикалық-механикалық қасиеттерді термиялық жүктемелерге төзімділікпен үйлестіреді



(Otaqulov, 2025; Абдрахимов et al., 2021; Akimbekova et al., 2024). Қазіргі заманғы өндірістік агрегаттар (металлургиялық пештер, цемент зауыттарының айналмалы пештері, энергетикалық қазандықтар) 1000 °С жоғары температурада жұмыс істейді, бұл отқа төзімді материалдарға ерекше талаптар қояды. Дәстүрлі шамот және магнезит отқа төзімді материалдары біртіндеп жоғары отқа төзімді толтырғыштар мен синтетикалық байланыстырғыштардың жүйелеріне негізделген бетондарға біртіндеп жол беруде (Ghosh et al., 2022).

Фосфат байланыстырғыштарын, әсіресе алюминий фосфатын қолдану 1000 °С-тан жоғары температурада тұрақтылықты сақтайтын күшті бейорганикалық қосылыстар түзуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Корунд толтырғыштарымен бірге мұндай байланыстырғыштар жоғары тығыздығы мен минималды кеуектілігі бар материалдарды құрайды, бұл олардың ыстыққа төзімділігі мен беріктігін арттырады (Vlasov et al., 2021). Зерттеудің өзектілігін арттыратын қосымша факторға қайталама ресурстарды, атап айтқанда құнды толтырғыш ретінде қызмет ете алатын электрокорундтық өндіріс қалдықтарын (Tukhareli et al., 2018) пайдалану жатады.

Соңғы жылдары алюминий-фосфат және геополимер байланыстырғыштарына негізделген цемент-free жүйелері белсенді зерттелуде. Олар жылуға әсердің жоғарылауын және жарықшақтардың пайда болуына төзімділікті көрсетеді, бұл оларды циклдік қыздыру және салқындату жағдайында қолдануға мүмкіндік береді (Smirnova et al., 2021). Микроқұрылымды тұрақтандыратын және бетондағы кернеулердің біркелкі таралуын қамтамасыз ететін басқа да модификациялық қоспалар зерттелуде, бұл оның қызмет ету мерзімін арттырады (Altynbekova et al., 2022). Отқа төзімді сазды композицияларға қосуға арналған жұмыстар қызығушылық тудырады: бұл бетон құрылымының кеуектілігін төмендетуге және тығыздауға, оның беріктігі мен отқа төзімділігін жоғарылатады (Savina et al., 2024).

Дәстүрлі зерттеу әдістерімен қатар (механикалық сынақтар, термоциклдеу, фазалық талдау) отқа төзімді материалдарды әзірлеуде компьютерлік модельдеу және жасанды интеллект әдістері сияқты цифрлық технологиялар жиі қолданылады. Олар бетонның фазалық құрамы мен қыздыру әрекетін болжауға мүмкіндік береді, бұл құрамдарды оңтайландыру процесін едәуір жылдамдатады (Alimkulov et al., 2025).

Осылайша, бұл зерттеудің өзектілігі жақсартылған физика-механикалық қасиеттері және температуралық жүктемелерге төзімділігі бар қайта өңделген корунд материалдарының негізінде отқа төзімді бетон жасау қажеттілігімен анықталады. Алюминий-фосфаттық байланыстырғыштарын, техногендік қалдықтарды және отқа төзімді сазды пайдалануға негізделген кешенді тәсіл жоғары температуралы жабдықтың сенімділігі мен энергия тиімділігіне қойылатын заманауи талаптарға жауап беретін жаңа буын материалдарын алуды қамтамасыз етеді.

Зерттеудің мақсаты – қайта өңделген корунд материалдарын пайдалана отырып, отқа төзімді бетонның құрамын әзірлеу және құрамы, микроқұрылымдық және эксплуатациялық сипаттамалары арасындағы өзара байланысты анықтау. Белгіленген мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

1. алюминий-фосфаттық байланыстырғышының бетонның беріктік және жылуға төзімділік қасиеттеріне әсерін зерттеу;
2. сазды қоспалардың микроқұрылымға және жарықшықтарға төзімділікке ықпалын бағалау;
3. термоциклдардан кейінгі сынамалардағы фазалық құрамы мен морфологиясын талдау;
4. қажетті эксплуатациялық сипаттамаларды қамтамасыз ету үшін компоненттердің оңтайлы қатынасын анықтау.



МАТЕРИАЛДАР МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

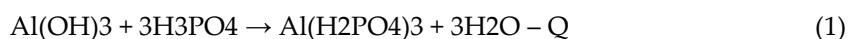
Шикізат материалдары.

Толтырғыштар және қоспалар. Ірі және ұсақ толтырғыш ретінде электрокорунд өндірісінің техногендік қалдықтары (α Al_2O_3) қолданылды. Ірі фракциясы скелет қалыптастыратын толтырғыш ретінде, ал ұсақ және ұнтақталған фракциясы корунд қоспасы негізінде пайдаланылды. Корунд қиыршық тасының номиналды төселген тығыздығы $2,7 \text{ г/см}^3$, ұнтақталған корундтың нақты тығыздығы $3,90\text{-}3,95 \text{ г/см}^3$ құрады. Фракция диапазоңдары: ірі қоспа – $5\text{-}10 \text{ мм}$; ұсақ қоспа – $0,63\text{-}5,0 \text{ мм}$; ұнтақталған қоспа $\leq 0,16 \text{ мм}$.

Байланыстырғыш. Байланыстырғыш фазасы алюминий-фосфаттық байланыстырғыш (АФБ) болып табылады, ол ортофосфор қышқылы (H_3PO_4) мен алюминий гидроксиді $\text{Al}(\text{OH})_3$ өзара әрекеттесуі арқылы *in situ* дайындалады. Дайындау үшін 77% және 87% ортофосфор қышқылы (техникалық), шөгінді алюминий гидроксиді және тұрмыстық ауыз су қолданылды.

Алюминий-фосфаттық байланыстырғышты (АФБ) дайындау.

Алюминийдің бастапқы фосфаттарының түзілуі келесі (1) реакциясы арқылы жүреді:



Ары қарай қыздыру кезінде қышқыл фосфаттар дегидратацияланып, полифосфаттар мен AlPO_4 түзеді, бұл термиялық тұрақты байланыстырғыш матрицасын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бу арқылы қыздырылатын араластырғышты реакторға (араластырғыш жылдамдығы $150\text{-}250 \text{ айн/мин}$) кезекпен су мен ортофосфор қышқылын салды (жергілікті шамадан тыс қызуды болдырмау үшін). Температура $40\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ кезінде тұрақты араластыру арқылы $\text{Al}(\text{OH})_3$ ұнтақталған суспензиясын енгізді. Температура $60\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$ -де алюминий қышқыл фосфаттарының біркелкі ерітіндісі алынғанша ұсталды; pH $1,2\text{-}1,6$ деңгейі және ерімеген агломераттардың болмауы бақыланды. АФС $25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ дейін салқындатылды; қолданбас бұрын тұтқырлықты тұрақтандыру үшін $12\text{-}24$ сағат ұсталды. Реактордың толтырылуы 80% -дан аспауы қадағаланды.

Компоненттердің шығындары:

1 л 77% H_3PO_4 үшін: $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $0,33\text{-}0,35 \text{ кг}$; су – $0,7\text{-}0,9 \text{ л}$.

1 л 87% H_3PO_4 үшін: $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $0,38\text{-}0,40 \text{ кг}$; су – $0,8\text{-}1,0 \text{ л}$.

Нақты қатынас ағымдағы тұтқырлыққа және қоспаның тұну уақытына сәйкес түзетіледі.

Бетон қоспаларының құрамы.

Композиция минималды кеуектілікпен құрылымды қамтамасыз ете отырып, толтырғыштардың көлемдік үлестері бойынша жобаланған. 1 м^3 отқа төзімді бетон үшін материалдардың болжамды шығындары (кг) құрады:

ортофосфор қышқылы (АФБ енгізуді ескере отырып) – 250 ;

өте ұнтақталған корунд қоспасы – 236 ;

ұсақ корунд толтырғышы – 1000 ;

ірі корунд толтырғышы – 1539 .

Ірі толтырғыштың көлемдік үлесі қоспаның $0,85 \text{ м}^3/\text{м}^3$ қабылданды; ұсақ көлем - ірі фракцияның қаңқасының қуысына сәйкес. Қақпалы су - суға төзімділігі мен минималды ашық кеуектілігін сақтай отырып, қажетті жұмыс қабілеттілігі бойынша (шамамен $2\text{-}4 \text{ см}$). Модификацияланған композиция үшін $3\text{-}8$ массасы енгізілді. Микроқұрылымдық тығыздау үшін $\%$ отқа төзімді саз (өте ұнтақталған қоспаның массасынан) қолданылды.

Қоспаларды дайындау. Құрғақ толтырғыштар (үлкен, содан кейін ұсақ және өте ұнтақталған корунд) араластырғышқа құйылды, $1\text{-}2$ минут араластырылды; есептелген АФБ енгізілді; консистенциясы сумен жеткізілді. Жалпы араластыру уақыты $4\text{-}6$ минутты



құрады. Қалыптау үшін 30-60 с уақыт аралығында дірілдеуден өткізілді. Қышқылдың булануын болдырмау үшін үлгілер жабылды.

Ұстау режимі. Бастапқы экспозиция $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 24 сағат, әрі қарай 40-60 $^\circ\text{C}$ температурада алдын ала кептіру, 24 сағ; қыздыру (өнім бағдарламасы бойынша): 110 $^\circ\text{C}$ (4 сағ) $\rightarrow$ 300 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) $\rightarrow$ 600 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) $\rightarrow$ 800-1000 $^\circ\text{C}$ (2-4 сағат) табиғи салқындатумен 20-25 $^\circ\text{C}$ дейін, термиялық циклдегі қадамдар арасындағы кезеңдерден тұрды.

Сынақ әдістері

Үлгілер. 70×70×70 мм текшелер (жұмыс құрамы бойынша) - беріктік пен тығыздық үшін; 40×40×160 мм пластиналар - термошокта жарықшақтар пайда болу үшін; 10×10×10 мм фрагменттер — XRD/SEM-EDS үшін.

Қысу беріктігін гидравликалық престо (номиналды жүктеме ≥ 500 кН) 0,5–0,8 МПа/с жүктеме кезінде анықталды. Бақылау уақыты 24 сағат ұстағаннан кейін (20 $^\circ\text{C}$), 110 $^\circ\text{C}$ (4 сағат), 600 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) және 1000-1100 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) кезеңінен кейін толық салқындағаннан кейін болды.

Орташа тығыздық және суды сіңіру. Тығыздық массасы және геометриялық өлшемдері бойынша, ашық кеуектілік және суды сіңіру құрғақ/қаныққан үлгілердің массалық айырмашылықтарын есепке ала отырып, судағы тұрақты массаға (24 сағат, 20 $^\circ\text{C}$) дейін қанығу бойынша анықталынды.

Жылуға төзімділік (су жылу алмастырғыштар). Цикл режимі: үлгілерді пеште 800-1000 $^\circ\text{C}$ дейін қыздыру (30-60 мин ұстау) $\rightarrow$ беткі температура тұрақтанғанға дейін қазу және суда салқындату ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) $\rightarrow$ 110 $^\circ\text{C}$ -та (2 сағат) кептіру. Жарықшақтар/сынықтар пайда болғанға дейін циклдар санын және беріктіктің салыстырмалы төмендеуі тіркелді.

Рентгендік фазалық талдау (XRD). Ұнтақтардың рентгенографиясы (< 63 мкм фракциясы) $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуі бар дифрактометрде $2\theta = 10-80^\circ$ бұрыштар интервалында 0,02–0,03° сканерлеу қадамында алынды. Фазалық сәйкестендіру стандартты мәліметтер базасы бойынша жүргізілді, AlPO_4 (кристобалитикалық модификация), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, сондай-ақ фосфатты сусыздандыру өнімдерінің болуы анықталды.

Сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) және энергия дисперсиялық талдау (EDS). Зерттеу термоциклден кейін сынамалардың сынықтарында жүргізілді. Қажет кезінде көміртек/алтынмен вакуумдық бүрку қолданылды. Үлкейту $200\times$ – $5000\times$ масштабында болды. Элементтік талдау фосфат матрицасының үздіксіздігін, «толтырғыш–матрица» шекараларының сипатын, сондай-ақ микрожарықшақтар мен балқыманың жергілікті учаскелерінің болуын бағалау мақсатында тарату карталары бойынша (P, Al, O) орындалды.

Қабылдау критерийлері. Термоциклдерден кейінгі минималды беріктік бөлме температурасында бастапқы температурадан 60-70% төмен емес; жарықшақтар мен сынықтардың болмауы; суды сіңіру $\leq 6-8\%$; фазалық құрамның тұрақтылығы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ және термостабильді фосфаттардың үстемдігі).

ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Эксперименттік зерттеулер жүргізу үшін байланыстырғыш және толтырғыштың құрамымен ерекшеленетін корундты отқа төзімді бетонның екі сериясы дайындалды.

1) үлгілердің бірінші сериясы негізгі құрамды қамтыды: негізгі толтырғыш ретінде техногендік корунд, ал байланыстырушы компонент алюминий-фосфаттық байланыстырғышы (АФБ) қолданылды. Бұл құрам бетонның қасиеттерін қосымша модификациялық қоспаларсыз бағалауға мүмкіндік беретін бастапқы құрам болды.

2) екінші серия модификацияланған құраммен ерекшеленді. Оған қосымша компонент ретінде отқа төзімді саз енгізіліп, АФБ үлесі азайтылды. Құрамды мұндай



модификациялау материалдың құрылымын жақсартуға, кеуектілікті азайтуға, сондай-ақ оның жылуға төзімділігін арттыруға бағытталған.

Осылайша, үлгілердің екі сериясын салыстырмалы талдау құрамды модификациялаудың беріктік сипаттамаларына, жылу цикліне төзімділікке және отқа төзімді бетонның микроқұрылымдық ерекшеліктеріне әсерін анықтады.

Зерттелетін үлгілердің қысу беріктігі ПСУ-50Т гидравликалық пресстегі бұзу әдісімен де, ИПС-МГ4.01 ультрадыбыстық құралын қолданатын бұзбайтын әдіспен де анықталды. Сынақ нәтижелері сериялар арасындағы айтарлықтай айырмашылықты көрсетті. Бірінші сериядағы үлгілер салыстырмалы түрде төмен беріктікке ие болды, бұл байланыстырғыштың едәуір құрамымен және аз тығыз құрылымымен түсіндіріледі. Екінші сериядағы үлгілерде беріктік екі есеге жуық өсті (1-2 кестелер). Бұл отқа төзімді сазды енгізудің оң әсерін көрсетеді, яғни толтырғыш бөлшектері мен байланыстырғыштар арасындағы берік байланыс аймақтарының пайда болуына және микроқуыстардың азаюына ықпал етті.

Осылайша, модификацияланған құрам отқа төзімді бетонның көтергіш қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бұл әсіресе жоғары температура мен механикалық жүктемелер жағдайында жұмыс істеу үшін өте маңызды.

Жылуға төзімділік үлгілерді 800-1100 °C температураға дейін циклдік қыздыру, содан кейін бөлме жағдайларына дейін салқындату арқылы бағаланды. Бұл әдіс материал күрт жылу жүктемелеріне ұшырайтын жылу қондырғыларындағы төсеу материалдарының нақты жұмыс жағдайларын имитациялайды. Сынақ нәтижелері бірінші сериядағы үлгілердің тезірек бұзылғанын және жылу ауысымына аз төтеп беретінін көрсетті. Екінші серия жылуға төзімділіктің жоғарылауын көрсетті: ұсталған циклдар саны бір жылу ауысымына дейін өсті (3-кесте). Бұл өзгеріс материалдың неғұрлым тығыз микроқұрылымымен қатар жоғары температуралық әсер ету кезінде тұрақты фазалардың қалыптасуымен де түсіндіріледі.

1-кесте. Ультрадыбыстық жылдамдық бойынша бұзбайтын әдіспен (ИПС-МГ4.01) алынған бетонның болжамды беріктігінің эксперименттік мәндерінің нәтижелері

Үлгі №	Бірінші серия				Екінші серия		
	Бетонның болжамды беріктігі R_{us} , МПа						
	1 жақ		2 жақ	3 жақ	1 жақ	2 жақ	3 жақ
1.1	$R_{us(1)}$	10,00	16,40	14,90	31,20	33,70	25,60
	$R_{us(2)}$	17,40	24,40	12,10	21,70	14,50	14,00
	$R_{us(3)}$	17,40	12,00	11,10	35,90	33,20	23,20
	$R_{us(ср)}$	14,93	17,60	12,70	29,60	27,13	20,93
1.2	$R_{us(1)}$	10,60	8,40	12,40	25,60	35,70	25,10
	$R_{us(2)}$	10,60	11,90	28,00	20,20	21,80	25,10
	$R_{us(3)}$	9,70	6,60	14,40	18,50	38,80	26,40
	$R_{us(ср)}$	10,30	8,97	18,27	21,43	32,10	25,53
1.3	$R_{us(1)}$	5,30	28,60	11,70	31,90	33,60	36,50
	$R_{us(2)}$	9,80	21,20	9,70	21,20	27,70	35,40
	$R_{us(3)}$	13,10	17,70	5,70	30,30	31,60	20,10
	$R_{us(ср)}$	9,40	22,50	9,03	27,80	30,97	30,67
2.1	$R_{us(1)}$	16,40	16,40	13,80	20,40	35,70	31,00
	$R_{us(2)}$	22,00	19,00	8,40	33,10	21,90	26,60
	$R_{us(3)}$	10,60	15,20	18,40	35,10	39,80	33,10
	$R_{us(ср)}$	16,33	16,87	13,53	29,53	32,47	30,23



1-кестенің соңы

Үлгі №	Бірінші серия				Екінші серия		
	Бетонның болжамды беріктігі R_{us} , МПа						
	1 жақ		2 жақ	3 жақ	1 жақ	2 жақ	3 жақ
2.2	$R_{us(1)}$	7,00	6,70	15,50	39,60	22,00	40,70
	$R_{us(2)}$	8,00	10,60	8,10	51,80	44,50	48,00
	$R_{us(3)}$	8,00	11,60	12,40	40,30	27,10	48,10
	$R_{us(ср)}$	7,67	9,63	12,00	43,90	31,20	45,60
2.3	$R_{us(1)}$	9,00	9,10	22,00	31,90	48,50	39,80
	$R_{us(2)}$	11,60	18,40	19,20	27,50	23,50	32,90
	$R_{us(3)}$	8,00	13,10	16,20	18,60	15,90	36,10
	$R_{us(ср)}$	9,53	13,53	19,13	26,00	29,30	36,27
3.1	$R_{us(1)}$	22,40	21,70	17,70	42,10	52,00	39,20
	$R_{us(2)}$	16,40	20,50	15,90	25,70	32,60	20,00
	$R_{us(3)}$	19,20	17,10	33,40	39,10	47,10	53,00
	$R_{us(ср)}$	19,33	19,77	22,33	35,63	43,90	37,40
3.2	$R_{us(1)}$	27,10	15,10	16,50	28,40	55,60	54,50
	$R_{us(2)}$	27,00	29,00	23,50	49,30	47,20	50,50
	$R_{us(3)}$	19,20	15,40	23,50	32,20	38,10	55,30
	$R_{us(ср)}$	24,43	19,83	21,17	36,63	46,97	53,43
3.3	$R_{us(1)}$	26,10	14,40	21,10	50,50	55,10	62,80
	$R_{us(2)}$	17,90	21,20	12,40	56,00	59,00	68,60
	$R_{us(3)}$	12,60	22,10	29,10	60,60	64,30	56,10
	$R_{us(ср)}$	18,87	19,23	20,87	55,70	59,47	62,50
	$R_{us(2)}$	22,40	15,00	18,60	75,50	53,60	67,00
	$R_{us(3)}$	19,44	18,20	22,90	74,70	54,20	59,20
	$R_{us(ср)}$	20,08	18,80	19,20	66,40	49,50	70,97
Ескерту – авторлармен құрастырылған							

2-кесте. ПСУ-50Т пресінде бұзу әдісімен алынған бетонның
нақты қысу беріктігінің эксперименттік мәндерінің нәтижелері

Үлгі №	Бұзу жүктемесі, F , кН		Қысу беріктігі, R_s , кН/см ²	
	Бірінші серия	Екінші серия	Бірінші серия	Екінші серия
1.1	68	168	14,15	34,96
1.2	72	169	14,98	35,17
1.3	68	150	14,15	33,22
2.1	-	130	-	27,05
2.2	-	147	-	30,59
2.3	-	138	-	28,72
3.1	116	160	24,14	33,30
3.2	110	130	22,89	27,05
3.3	125	153	26,01	31,84
Ескерту – авторлармен құрастырылған				

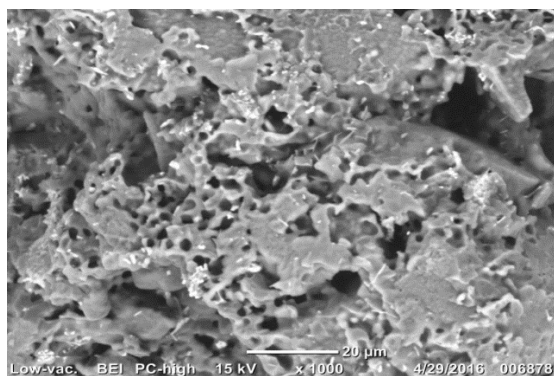


3-кесте. Құрамына байланысты үлгілердің бұзылуын тудырған жылу ауысым саны

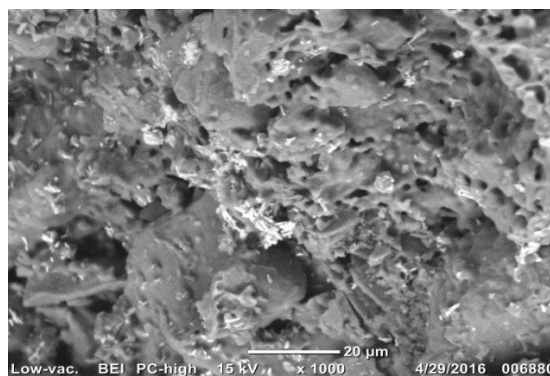
1 серия	2 серия
3 жылу ауысым	4 жылу ауысым
Ескерту – авторлармен құрастырылған	

Демек, бетон құрамына отқа төзімді сазды енгізу жылудың ауытқуы кезінде ішкі кернеулерді азайтуға көмектеседі және материалдың қызмет ету мерзімін ұзартады.

Бетонның микроқұрылымы электронды микроскоптың көмегімен 500-3000 есеге дейін масштабта зерттелді. Бірінші сериядағы үлгілерде құрылымның айтарлықтай кеуектілігі мен құрылымның біртекті еместігі байқалды: саңылаулар мен микрожарықшақтар материалды әлсіретіп, қыздыру кезінде оның тұрақтылығын төмендетуіне әкелуі мүмкін. Үлгілердің екінші сериясында микроқұрылым тығыз және біркелкі болды. Саңылаулар кішірек және біркелкі таралды, бұл құрылымның қалыптасу процесінің жақсарғанын көрсетеді (1-сурет). Бұл отқа төзімді сазды енгізу байланыстырғыштың толтырғыш бөлшектерінің адгезиясына оң әсер ететінін және монолитті құрылымның пайда болуына ықпал ететіндігін растайды. Осылайша, микроқұрылымдық зерттеулер беріктік пен жылуға төзімділік сынақтарының нәтижелерін тікелей растады.



1 серия
Құрам (корунд + АФБ)



2 серия
Құрам (корунд + АФБ + отқа төзімді саз)

1-сурет. JSM-6390 LV сканерлеуші электрондық микроскопта (үлкейту $\times 1000$) алынған бетон үлгілерінің микроқұрылымдары

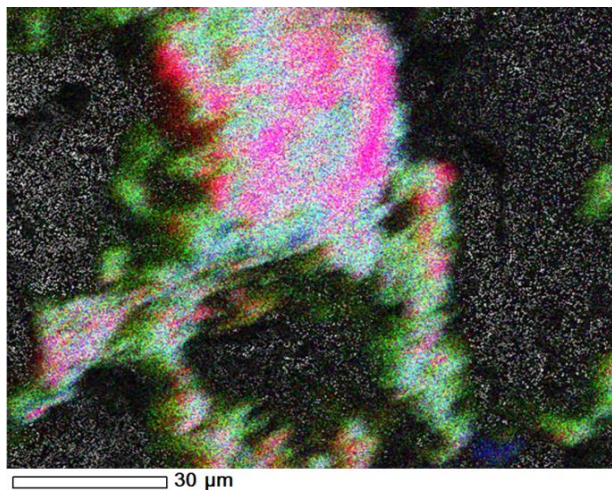
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Сандық энергия дисперсиялық талдау (EDS) бетонның элементтік құрамын анықтауға мүмкіндік берді. Екі серия үшін де корундты отқа төзімді бетонға тән алюминий, кремний, фосфор және оттегі сияқты негізгі элементтер тіркелді. Сонымен қатар, бірінші сериядағы үлгілерде элементтердің таралуы біркелкі болмады, бұл жанама түрде құрылым ақауларының болуын растайды. Екінші серияда, керісінше, алюминий мен кремнийдің біркелкі таралуы байқалды (2-3 суреттер). Мұндай біркелкі таралу бетонның агрессивті жұмыс жағдайларына, атап айтқанда жоғары температура мен жылулық циклге төзімділігін арттырады. Осылайша, химиялық талдау екінші сериядағы құрамның тиімділігін растады.

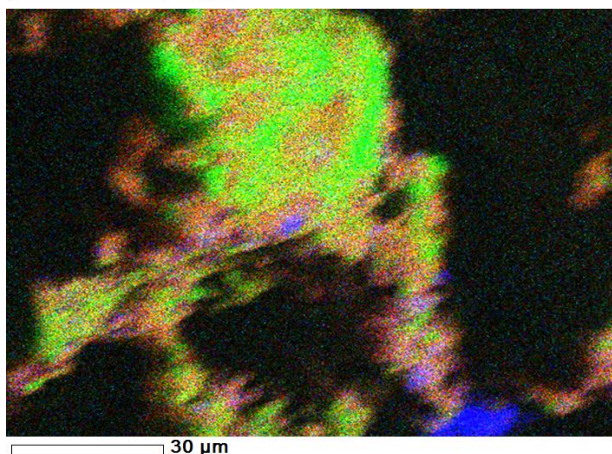
Рентгендік фазалық талдау (XRD) екі сериядағы негізгі кристалдық фаза материалдың жоғары отқа төзімділігін қамтамасыз ететін корунд (Al_2O_3) екенін көрсетті.

Алайда, серияларды салыстыру кезінде екінші серияда тұрақты фазалық қосылыстардың пайда болуы байқалады. Мұндай қосылыстардың болуы жоғары температурада құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді және жарықшақтардың қарқынды дамуына жол бермейді. Бұл отқа төзімді сазды енгізу материалдың микроқұрылымдық артықшылықтарын ғана емес, сонымен қатар фазалық артықшылықтарын да қамтамасыз ететіндігін растайды.

Бірінші серия
(корунд + АФБ)



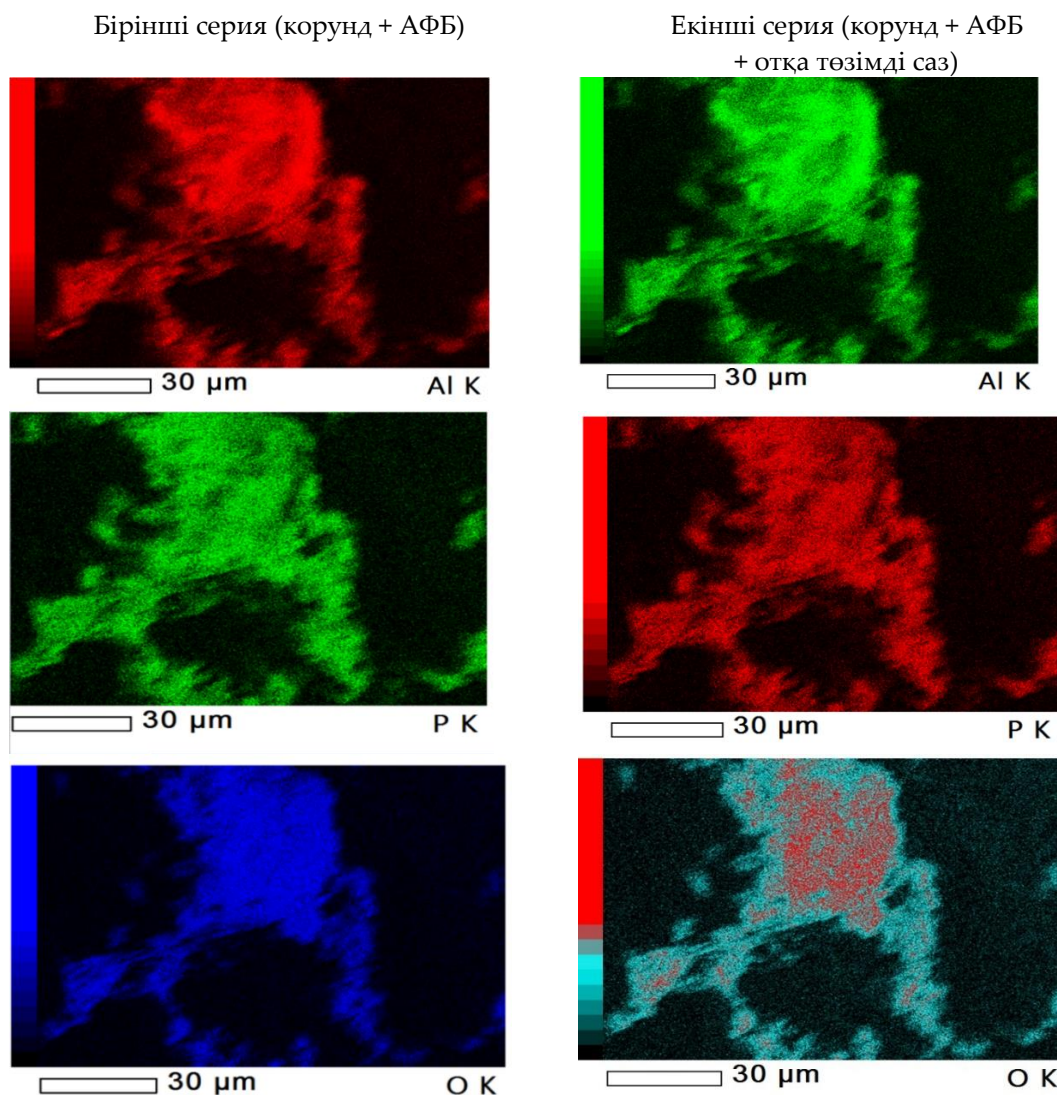
Екінші серия
(корунд + АФБ +
отқа төзімді саз)



2-сурет. Элементтердің біріктірілген таралу карталары (EDS):
бетон үлгілеріндегі Al, P, Si, O

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелері рентгендік фазалық зерттеу деректерін сандық түрде растауға мүмкіндік береді. Сонымен, екі серияда да алюминий мен оттегінің шыңдары басым: Al массалық үлесі отқа төзімді саз үлгісі үшін 26,83 % және сазсыз үлгі үшін 21,08 % құрайды, ал оттегі сәйкесінше 51,07 % және 63,42 % құрайтыны анықталынды (4-кесте, 4-5-суреттер). Сериялар арасындағы түбегейлі айырмашылықтар фосфор мен кремнийдің болуымен көрінеді. Отқа төзімді саз қосылған корунд және АФБ негізіндегі серияда фосфордың массалық үлесі 18,74 % (P/Al қатынасы $\approx 0,70$), ал кремний 2,23 % жетеді. Салыстыру үшін, сазсыз үлгіде фосфор аз концентрацияда болады (13,16 %, P/Al қатынасы $\approx 0,62$), ал кремний 1,57 % деңгейінде анықталынды. Осылайша, сазды енгізу фазалық түзуші элементтердің (Si және P) үлесінің айтарлықтай өсуіне әкеледі, бұл қосымша алюминий-фосфат және силикат қосылыстарының түзілуін көрсетеді.



3-сурет. Энергия дисперсиялық талдау (EDS) деректері бойынша элементтердің таралу картасы: бетон үлгілеріндегі Al, P, O

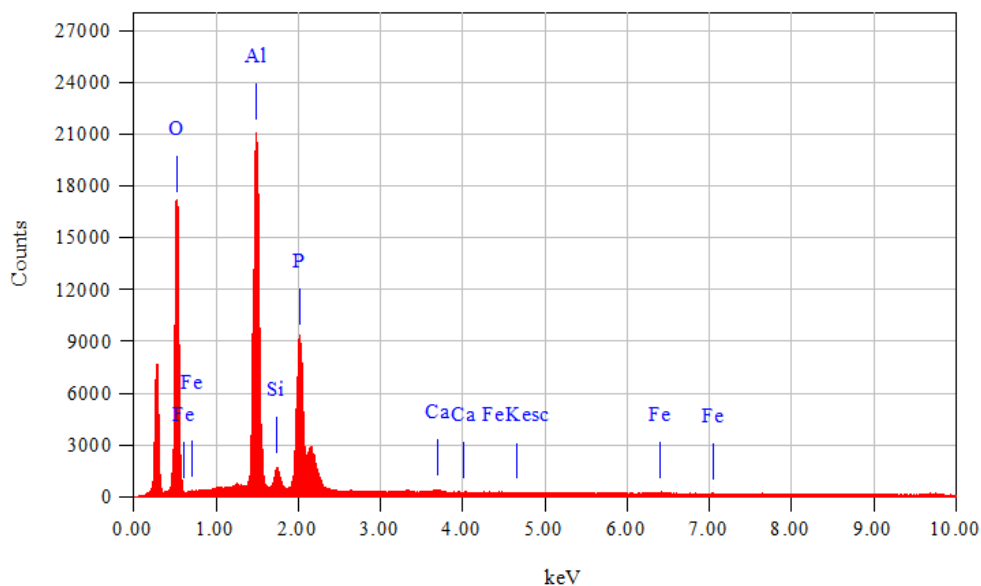
Ескерту – авторлармен құрастырылған

4-кесте. Корунд және АФБ негізіндегі отқа төзімді сазбен/сазбен қоспасыз бетон үлгілерінің энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелері

Үлгі сериясы	Элемент	Массалық үлесі, mass %	σ (статикалық қателігі)	Al-ге ара қатынасы
Бірінші серия (корунд + АФБ)	Al	21.08	± 0.06	1.000
	Si	1.57	± 0.02	0.075
	P	13.16	± 0.05	0.624
	O	63.42	± 0.13	3.010
Екінші серия (корунд + АФБ + отқа төзімді саз)	Al	26.83	± 0.14	1.00
	Si	2.23	± 0.07	0.083
	P	18.74	± 0.16	0.699
	O	51.07	± 0.10	1.900

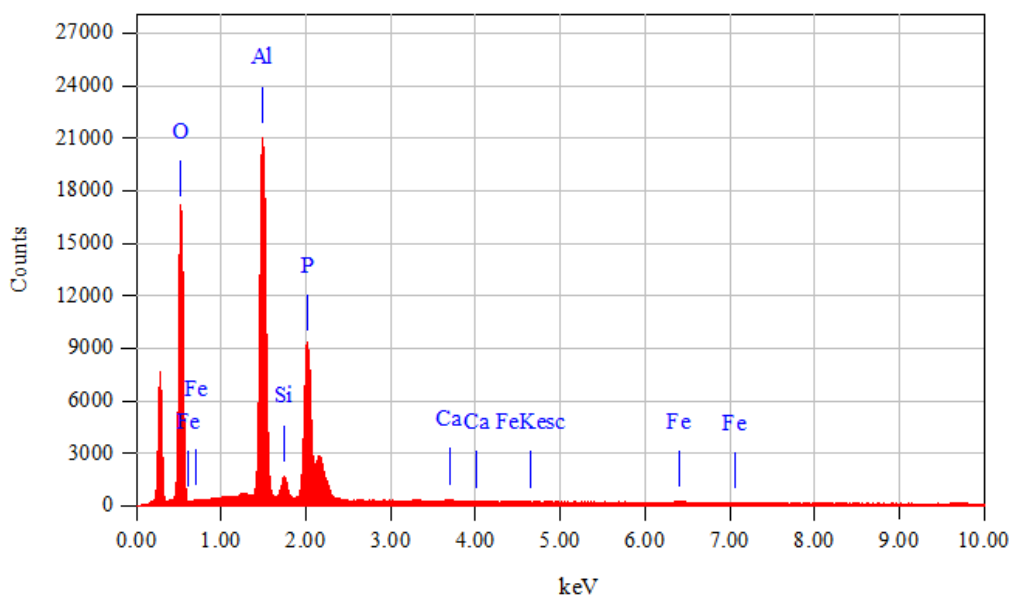
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бұл фазалардың болуы XRD-талдауының нәтижелеріне сәйкес келеді, мұнда екінші серия тұрақты құрылымдық қосылыстардың түзілуін көрсетеді. Бетон матрицасындағы фосфор мен кремнийдің көп болуы жоғары температуралық әсерлерде құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді, жарылуға бейімділікті төмендетеді және материалдың пайдалану төзімділігін арттырады. «Таза» (корунд+АФБ) құрамы оттегінің жоғары құрамымен және салыстырмалы түрде қарапайым фазалық құрамымен сипатталса, отқа төзімді саз қосылған серия фазалық және микроқұрылымдық ерекшеліктерін көрсете отырып, оның жақсартылған қасиеттерін айқындады.



4-сурет. Корунд және АФБ негізіндегі бетон үлгісінің энергия дисперсиялық (EDS) спектрі

Ескерту – авторлармен құрастырылған



5-сурет. Корунд, АФБ және отқа төзімді саз негізіндегі бетон үлгісінің энергия дисперсиялық (EDS) спектрі

Ескерту – авторлармен құрастырылған



НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛҚЫЛАУ

Корундты отқа төзімді бетонның екі сериясын салыстырмалы талдау құрамдарды өзгерту оның физикалық-механикалық және пайдалану қасиеттеріне әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

Ең алдымен, отқа төзімді сазды енгізу және алюминий-фосфат байланыстырғышы үлесінің төмендеуі бетонның қысу беріктігінің айтарлықтай артуына әкелді. Беріктіктің шамамен екі есеге артуын фазааралық өзара әрекеттесудің жақсаруымен түсіндіруге болады: саз құрылымдағы бос орындарды толтырады, ақауларды азайтады және материал ішіндегі жүктемелердің біркелкі таралуына ықпал етеді. Бұл алынған нәтиже алюминий-фосфаттық және алюминий-силикофосфаттық байланыстырғыштары бойынша заманауи зерттеулерге сәйкес келеді. Атап айтқанда, ғалымдар (Abyzov et al., 2024a) алюминий силикофосфаттық байланыстырғыштарын қолдану фосфатты бетондардың механикалық қасиеттерін едәуір жақсартуға және жоғары температураның әсері кезінде оларды тұрақтандыруға мүмкіндік беретіндігін анықтаған. Осылайша, ұсынылған құрамның микроқұрылымдық модификациясы бетонның көтергіш қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік берді.

Материалдың жылуға төзімділігі де өсті: екінші серияда үлгілер біріншіге қарағанда бір жылу ауысымына көбірек төтеп берді. Бұл нәтиже термиялық циклдегі ішкі кернеулердің төмендеуімен байланысты. Тығыз микроқұрылым температураның күрт өзгеруімен микрожарықшақтардың дамуына жол бермейді, ал отқа төзімді саздың болуы құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді. Демек, ұсынылған бетон құрамы жылу агрегаттарының футеровкасына тән температураның күрт өзгеруі жағдайында пайдалануға жақсы бейімделеді. Осындай тұжырымдар 1700 °C дейінгі температурада құрамдардың тұрақтылығын растайтын алюминий және алюминий силикаттық өнеркәсіптік қалдықтарға негізделген отқа төзімді фосфат желімін жасау бойынша жақында жүргізілген зерттеуде де (Abyzov et al., 2024b) анықталынды. Бұл циклдік жылу әсерінен олардың беріктігін арттыру үшін фосфаттық жүйелерде минералды қоспаларды қолданудың жоғары перспективасын растайды.

Микроқұрылымдық талдау құрамның өзгеруі мен материалдың ішкі ұйымдастырылуы арасындағы нақты корреляцияны көрсетті. Егер бірінші серияда саңылаулар мен гетерогенділік айқын байқалса, екіншісінде олар айтарлықтай азайып, құрылымы тығызырақ болды. Бұл сипаттама беріктік пен жылуға төзімділікті жақсартуға ықпал еткен құрамның өзгерісі екенін растайды. Ұқсас заңдылық цементсіз отқа төзімді бетондарға шолу жұмыстарында, атап айтқанда белсенді Al_2O_3 нанодисперсті SiO_2 -мен әрекеттескенде материалдың беріктігі мен жылуға төзімділігін арттыратын тұрақты муллит фазалары пайда болатыны (Pivinskii et al., 2020a) туралы атап өтілген. Зерттеулерімізде ұсынылған құрамда муллит негізгі фаза болмаса да, құрылымды тығыздау мен фазалық жүйені тұрақтандырудың байқалған әсерлері әдебиетте сипатталғанға ұқсас екенін атап өтуге болады.

Энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелерінен екінші сериялы үлгілердегі алюминий мен кремнийдің біркелкі таралуы кристалдық тордағы жергілікті кернеу концентрациясының төмендеуін көрсетеді, бұл өз кезегінде бетонның жоғары температураға төзімділігін арттырады. Бұл нәтиже отқа төзімді бетондарда минералды және техногендік қоспаларды қолдану туралы мәліметтермен байланысты тұрақты химиялық құрылымның қалыптасуы байқалатын (Shirani et al., 2021) жұмысқа сәйкес келеді.

Рентгендік фазалық талдау (XRD) негізгі кристалдық компонент ретінде отқа төзімділікті қамтамасыз ететін корунд болып қала беретінін растады. Алайда, екінші серия тұрақты фазалық қосылыстардың түзілуін тіркеді, бұл жоғары температура жағдайында



ұзақ уақыт жұмыс істегенде бетонның беріктігінің жақсаруына ықпал етеді. Аталған нәтиже балама гидравликалық байланыстырғыштар және модификациялаушы қоспаларды қолдану отқа төзімді фазалардың пайда болуына және отқа төзімді бетондардың ұзақ мерзімділігін арттыруға ықпал ететінін дәлеледеген зерттеушілердің (Pivinskii et al., 2020b) мәліметтеріне сәйкес келеді.

Алынған нәтижелер өзекті ғылыми тенденцияларға толық сәйкес келеді: отқа төзімді бетондардың құрамында қосымша минералды компоненттер мен өнеркәсіптік қалдықтарды пайдалану бір мезгілде пайдалану сипаттамаларын жақсартуға және технологияның экологиялық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Дәстүрлі минералды толтырғыштар (шамот, муллит, жоғары глиноземді материалдар) қолданылған көптеген жарияланған жұмыстардан айырмашылығы, бұл зерттеуде алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы мен жаңашылдығын көрсететін техногендік корунд қолданылды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулер техногендік корунд қалдықтары мен алюминий-фосфаттық байланыстырғыштарды пайдалану жоғары өнімділігімен сипатталатын отқа төзімді бетон алуға мүмкіндік беретінін көрсетті:

- орташа қысу беріктігі 30-35 МПа құрады, ал ең жақсы құрамдар 62-75 МПа дейін беріктікті көрсетті.

- 1000 °C температурада термиялық өңдеуден кейін беріктік 30-40 МПа деңгейінде сақталды, бұл бастапқы мәндердің 60 %-дан астамына сәйкес келеді.

- Үлгілердің бұзу жүктемесі 168 кН-ға жетті, материалдың тығыздығы шамамен 2,8-2,9 г/см³ құрады, суды сіңіру 6-7 %-дан аспады.

Сонымен, кешенді талдау отқа төзімді сазды енгізу арқылы құрамды модификациялау бірден келесі бірнеше артықшылықтар беретінін көрсетті:

- беріктіктің екі есе дерлік артуы;
- жылуға төзімділіктің артуы (бір жылу ауысымына);
- кеуектіліктің төмендеуі және тығыз микроқұрылымның қалыптасуы;
- негізгі элементтердің біркелкі таралуы;
- тұрақты фазалық қосылыстардың түзілуі.

Практикалық тұрғыдан алғанда, мұндай қасиеттер әзірленген корундтық отқа төзімді бетонды жоғары беріктік, жылулық циклге төзімділік пен ұзақ мерзімділіктің үйлесімі қажет болатын жылу агрегаттарының футеровкасында қолдануға арналған перспективалы материалға айналдырады. Техногендік корундты бастапқы шикізат ретінде пайдалану технологияның экономикалық және экологиялық тиімділігін арттырады, өйткені ол өндіріске өнеркәсіптік қалдықтарды қолдануға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

АЛҒЫС: Авторлар мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен құнды ескертулер үшін анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар осы мақаланы әзірлеу барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын, соның ішінде генеративті тілдік модельдерді пайдаланбағанын растайды. Барлық мәтіндік материалдар, деректер мен талдау нәтижелері авторлар тарапынан дербес дайындалды.



ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Chen, Sh. (2023). Review of heat resistant concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2608, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2608/1/012014>
- Otaqulov, B. (2025). Methods for Investigating the Physico-Mechanical Properties of Heat-Resistant Concrete. *International Journal of Artificial Intelligence*, 1(3), 337–340. <https://inlibrary.uz/index.php/ijai/article/view/80544>
- Абдрахимов, В.З., Абдрахимова, Е.С. (2021). Жаростойкий бетон на основе ортофосфорной кислоты, отходов цветной металлургии и химической промышленности. *Construction and Geotechnics*, 12(1), 72-85. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.06> // Abdrahimov, V.Z., Abdrahimova, E.S. (2021). Zharostojkij beton na osnove ortofosfornoj kisloty, othodov cvetnoj metallurgii i himicheskoy promyshlennosti. *Construction and Geotechnics*, 12(1), 72-85. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.06>
- Akimbekova, S., Aruova, L., Urkinbaeva, Zh., Nykiel, M. (2024). Heat-resistant concretes based on cement binders and waste from the metallurgical industry. *Technobius*, 4(4), 0068. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.4.2024.0068>
- Ghosh, A., Sinhamahapatra, S., Tripathi, H.S. (2022). Refractories as Advanced Structural Materials for High Temperature Processing Industries. In: Bhattacharjee, D., Chakrabarti, S. (eds) *Future Landscape of Structural Materials in India*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8523-1_11
- Vlasov, A., Vlasova, E. (2021). On the technology of aluminosilicate and high-alumina phosphate hardening products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1015, 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1015/1/012088>
- Tukhareli, V., Pushkarskaya, O., Tukhareli, A. (2018). Methodological approaches in assessing the possibility of using waste electrocorundum materials in concrete compositions. *Solid State Phenomena*, 284, 1030-1035. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1030>
- Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplik, J., Tan, H., Gu, X. (2021). Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment. *Sustainability*, 13, 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
- Altynbekova, A., Lukpanov, R., Yenkebayev, S., Tsygulyov, D., Nurbayeva, M. (2022). Complex laboratory studies of modified additive influence on concrete physical and mechanical properties. *Geomate Journal*, 23(100), 26-33. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3641>
- Savina, L.K., Khonchik, I.V., Shulyk, I.G. (2024). Dependence of the properties of concrete samples from fireclay concrete mix before and after heat treatment on the amount of alumina cement and refractory clay additive. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*, 124, 41-53. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.124.05>
- Alimkulov, M., Apshikur, B., Goltsev, A., Chernavin, V., Chigambayev, T., Kunanbayev, A. (2025). Data-driven modeling and experimental validation of heat-resistant concrete for industrial furnace lining. *Vibroengineering Procedia*, 58, 354–360. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25013>
- Abyzov, V.A., Posadnova, N.E. (2024). Features of Hardening of Aluminosilicophosphate Binder in Cellular Concrete. *Construction Materials*, 1-2, 53-58. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-53-58>
- Abyzov, V.A., Posadnova, N.E. (2024). Development of Fire-Resistant Phosphate Adhesive Based on Alumina and Aluminosilicate Dispersed Industrial Waste. *Refract Ind Ceram*, 64, 550–554. <https://doi.org/10.1007/s11148-024-00888-4>
- Pivinskii, Y.E. (2020). Cement-Free Refractory Concretes. Part 4. Refractory Concretes based on Silica Sol Binders. *Refract Ind Ceram*, 61, 150–158. <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00447-7>



- Shirani, K., Reisi, M., Savadkoohi, M.S. (2021). Eco-friendly High-Strength Refractory Concrete Containing Calcium Alumina Cement by Reusing Granite Waste as Aggregate. *Int J Concr Struct Mater*, 15, 48. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00483-8>
- Pivinskii, Y.E., Dyakin, P.V. (2020). Cement-Free Refractory Concretes. Part 5. Cement-Free Refractory Concretes Based on Hydraulic Alumina Binders. *Refract Ind Ceram*, 61, 374–383. <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00489-x>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Серая Наталья Владимировна – химия ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Серая Наталья Владимировна – кандидат химических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Seraya Natalya Vladimirovna – Candidate of Chemical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: NSeraya@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>



Чернавин Валерий Юрьевич – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Чернавин Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Chernavin Valery Yurievich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: VChernavin58@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2247-1458>



Даумова Гульжан Камалбеккызы – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Даумова Гульжан Камалбеккызы – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Daumova Gulzhan Kamalbekkyzy – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>



Миргородский Сергей Иванович – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Миргородский Сергей Иванович – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Mirgorodsky Sergey Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: serg.mirg@yandex.ru,



Рамазанова Райгуль Амангельдиновна – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Рамазанова Райгуль Амангельдиновна – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Ramazanova Raigul Amangeldinovna – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: RRamazanova@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6930-991X>