



DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_285
FTAXP 67.29.13

СҰЙЫҚ ШЫНЫ НЕГІЗІНДЕГІ ОТҚА ТӨЗІМДІ БЕТОН ҚҰРАМЫН MS-500 ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ПРЕСС СЫНАҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ТӘЖІРИБЕЛІК АНЫҚТАУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ОГНЕУПОРНОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА MS-500

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE COMPOSITION OF REFRACTORY CONCRETE BASED ON LIQUID GLASS BASED ON MS- 500 HYDRAULIC PRESS TESTS

А.Г. Гольцев ^{id1}, В.Ю. Чернавин ^{id1}, Б. Апшикур ^{id1}, М.М. Алимкулов ^{id2*}

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

²М. Тынышпаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Алимкулов Мурат Маметкулович, e-mail: m.alimkulov@alt.edu.kz

Түйінді сөздер:

отқа төзімді бетон, отқа
төзімді материалдар,
футеровка, қайнау
қабатты пеш, сұйық
шыны, бетонның
термотөзімділігі.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеу жұмысының мақсаты – қайталама отқа төзімді материалдарды пайдалану арқылы қайнау қабатты пештің қызмет ету мерзімін арттыру және отқа төзімді бетонның физикалық-механикалық қасиеттерін тәжірибелік және компьютерлік талдау арқылы бағалау болып табылады. Жұмыста дәстүрлі шамот кірпішінен жасалған футеровканы монолитті бетонмен алмастырудың тиімділігі қарастырылды. Негізгі байланыстырғыш ретінде натрий фторсиликаты бар сұйық шыны қолданылды, ол жоғары температура мен агрессивті ортада (SO₂) беріктігін сақтай алады. Эксперименттік зерттеу нәтижелері 900 °C температурада 12–14 термоциклге дейін бұзылусыз төтеп берген бетон үлгілерінің беріктігін көрсетті. Алынған нәтижелер отқа төзімді бетонның қайнау қабатты пештерде қолдануға толық сәйкес келетінін және оның жылу мен механикалық беріктігінің жоғары деңгейін дәлелдейді. Зерттеу нәтижесінде қайталама шамот материалдарын пайдалану отқа төзімді бетонның құрамын оңтайландырып, оның термотөзімділігі мен беріктігін арттыратыны анықталды, бұл өз кезегінде пештердің сенімділігін арттырып, жөндеу жиілігін азайтуға және өндірістік тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді.

Ключевые слова:

жаростойкий бетон,
огнеупорные материалы,
футеровка, печь с
кипящим слоем, жидкое
стекло, термостойкость
бетона.

АННОТАЦИЯ

Целью данного исследования является повышение срока службы печей с кипящим слоем за счёт использования вторичных огнеупорных материалов и оценка физико-механических свойств жаростойкого бетона на основе экспериментального и компьютерного анализа. В работе рассмотрена эффективность замены традиционной футеровки из шамотного кирпича на монолитную бетонную конструкцию. В качестве основного вяжущего использовалось жидкое стекло с добавлением фторсиликата натрия, обла-



дающее высокой прочностью при воздействии температур до 900 °С и агрессивных сред (SO₃). Экспериментальные результаты показали, что образцы бетона выдержали до 12–14 термоциклов без разрушения, что подтверждает их устойчивость к термическим нагрузкам. Полученные данные свидетельствуют о соответствии жаростойкого бетона технологическим требованиям эксплуатации печей с кипящим слоем. Применение вторичных шамотных материалов позволило оптимизировать состав бетона, повысить его термостойкость и прочность, что способствует увеличению надёжности агрегатов, сокращению времени ремонта и повышению производственной эффективности.

Keywords:

heat-resistant concrete,
refractory materials, lining,
fluidized bed furnace,
liquid glass, thermal
resistance of concrete.

ABSTRACT

The purpose of this study is to extend the service life of fluidized bed furnaces by utilizing secondary refractory materials and to evaluate the physico-mechanical properties of heat-resistant concrete through experimental and computational analysis. The work examines the efficiency of replacing traditional chamotte brick lining with a monolithic concrete structure. Liquid glass with sodium fluorosilicate was used as the primary binder, providing high strength and chemical resistance under temperatures up to 900 °C and exposure to aggressive environments (SO₃). Experimental results showed that concrete samples withstood up to 12–14 thermal cycles without destruction, confirming their thermal and mechanical stability. The obtained findings demonstrate that the heat-resistant concrete fully meets the technological requirements for fluidized bed furnaces. The use of secondary chamotte materials optimized the concrete composition, improved its thermal resistance and compressive strength, thereby enhancing furnace reliability, reducing maintenance downtime, and increasing overall production efficiency.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта әртүрлі жылу-техникалық қондырғылар мен жоғары температура мен агрессивті ортаның бір мезгілде әсері жағдайында жұмыс істейтін тірек құрылымдарының жедел қарқынмен салынуы байқалады. Бұл өз кезегінде отқа төзімді және химиялық әсерге берік материалдар өндірісін ұлғайтуды, сондай-ақ олардың негізінде ұзақ мерзімді жұмысқа бейімделген жаңа құрылыс конструкцияларын жасауды талап етеді. Сонымен қатар, олардың негізінде ұзақ мерзімді пайдалануға бейімделген жаңа конструкциялық материалдарды әзірлеу өзекті болып отыр. Мұндай материалдар мен құрылымдар жылу-техникалық қондырғылардың қызмет ету мерзімін ұзартып, олардың сенімділігін арттыруға және құрылыс үдерісінде индустриялық әдістерді қолдануға мүмкіндік береді (Rihan et. al., 2024).

Осындай нысандардың бірі — қайнау қабаты пештер, олар тұрақты жоғары температура мен агрессивті орта жағдайында жұмыс істейтін негізгі технологиялық агрегаттарға жатады. Қазіргі кезде мұндай пештердің футеровкасы (ішкі отқа төзімді қаптамасы) көбінесе шамот негізіндегі отқа төзімді материалдардан жасалады (Alaskar, 2025). Әдетте футеровка екі қабаттан тұрады – жұмыс қабаты шамотты отқа төзімді материалдан, ал жылу оқшаулағыш қабаты асбест парақтарынан дайындалады (Li M and Gan F, 2023). Пеш камерасының төменгі бөлігінде футеровканың қалыңдығы шамамен үш кірпішке, ал жоғарғы бөлігінде жарты кірпішке тең. Газдың температурасы бөлшектердің тотығу процесін толық қамтамасыз етуі үшін жылу оқшаулағыш қабат қосымша жеңіл шамотты немесе диатомитті материалдармен күшейтіледі (Li M et.al., 2023; Helle, M. et. al., 2022).



Пештің түбі сұйық шыны немесе портландцемент негізіндегі отқа төзімді бетоннан жасалып, газ тарату саптамаларына арналған тесіктері бар қалыңдығы 200–300 мм плита немесе күмбез түрінде орындалады. Ал пештің жабын бөлігі, жүктеу және түсіру камералары да шамотты отқа төзімді материалдармен футеровкаланады (Danyang, et.,al., 2025).

Алайда тәжірибелік бақылаулар көрсеткендей, футеровка жұмыстарын орындау сапасының жеткіліксіздігі және даналап төселетін материалдарды қолдану пештің пайдалану мерзімін қысқартып, бірқатар конструкциялық ақаулардың туындауына себеп болады (Rahjoo et.al., 2025). Бұл ақаулардың ішінде:

- мастика тығыздығының төмен болуынан оның кірпішаралық жіктерден үрленіп шығуы;
- футеровка технологиясының бұзылуы нәтижесінде пеш түбінде технологиялық жіктердің пайда болуы;
- жоғары температура әсерінен бетонның шөгуге мен жарықтардың түзілуі;
- футеровка мен болат қабырғалар арасындағы саңылаулар арқылы ауа ағынының кетуі, бұл пештегі ауа беруді арттыруды талап етеді (Al-Ghuri, 2025);
- температуралық саңылаудың жеткіліксіздігі салдарынан қыс мезгілінде болат корпустың деформацияға немесе жарылуға ұшырауы (Shakhabov et.al., 2023).

Аталған кемшіліктер мырыш өндірудің технологиялық процесін бұзып, шығатын газдардағы күкіртті ангидрид (SO_2) концентрациясын төмендетеді, ал тотығу реакциясын жүргізу үшін қажетті оттегінің мөлшерін арттырады. Соның салдарынан алынатын катодты мырыштың сапасы төмендейді (Huang et.al., 2025).

Осы себепті қазіргі уақытта түсті металлургия кәсіпорындары үшін маңызды міндеттердің бірі – қайнау қабатты пештердің өнімділігін олардың қызмет ету мерзімін ұзарту және жөндеу жиілігін азайту арқылы арттыру болып отыр (Jiao et.al., 2025). Бұл мақсатқа жетудің тиімді жолы - дәстүрлі даналап төселетін футеровканы монолитті бетонды футеровкамен алмастыру. Дегенмен, бұл әдісті қолдану үшін отқа төзімді бетонның технологиялық талаптарға сәйкестігін тәжірибелік тұрғыда дәлелдеу қажет (Baral et.al., 2024).

Қайнау қабатты пештердің жұмыс ерекшелігі - жоғары температураның ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін) және құрамында күкіртті ангидрид (SO_3) бар агрессивті ортаның бір мезгілде әсер етуі. Белгілі бетон түрлерінің ішінде натрий фторсиликаты бар сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетон өзінің жылуға және химиялық әсерге төзімді қасиеттерімен ерекшеленеді (Zhang et.al., 2025). Сондықтан бұл зерттеу жұмысы үшін дәл осы бетон түрі негізгі материал ретінде таңдап алынды.

Зерттеу барысында компьютерлік талдау әдістері қолданылды. Бұл әдістердің принциптері электронды есептік ақпараттық жүйелердің технологияларымен ұқсас, себебі олар үлкен көлемдегі деректерді өңдеуге және нақты өндірістік жағдайларда бетон құрамын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Осылайша, таңдалған тақырыптың өзектілігі - жөндеу кезіндегі мәжбүрлі тоқтау уақытын азайту және отқа төзімді бетонды қолдану арқылы пештердің пайдалану мерзімін ұзарту нәтижесінде олардың өнімділігін арттыру болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Қазіргі уақытта отқа төзімді бетон тек құрастырмалы элементтерді дайындауда ғана емес, сонымен қатар монолитті құрылымдарда да кеңінен қолданылады. Өнеркәсіп саласында оны тиімді пайдаланудың мысалдары ретінде күкірт колчеданын (пирит, FeS_2) күйдіруге арналған көпқабатты пештерді, ірі шаң ұстағыштар мен шаң камераларын, АБМ-1.5А қондырғысының қақпағын, прибльдік аппараттардың (қую аппаратының



артық металл көлемін ұстайтын бөлігі) үстіңгі футеровкасын, қайнау (сұйық) қабатты пештерді, сондай-ақ туннельді пештердің арбаларының футеровкасын атауға болады (Chen, 2023).

Қайнау қабатты пештің монолитті футеровкасының әзірленген конструкциясы бірнеше қабат асбест картонмен қапталған цилиндрлік болат корпусдан тұрады. Оның үстіне сұйық шыны негізіндегі монолитті отқа төзімді бетон қабаты салынады. Конструкцияның беріктігін арттыру мақсатында қабырғаларда торлы арматуралар, ал күмбез тәрізді төбе бөлігінде кеңістік қаңқасы орналастырылған (Helle et.al., 2022). Пештің түбі де отқа төзімді бетонмен толтырылып, бұл аймақта арматура қызметін пеш түбіндегі болат саптамалар атқарады (Li et.al., 2024).

Жаңа монолитті футеровка конструкциясы Қазақстан Республикасының нормативтік құжаттарының талаптары мен шетелдік стандарттар негізінде әзірленді. Атап айтқанда, арматура үшін қорғаныш бетон қабатының қалыңдығы (Ogrodnik және т.б., 2017; Рап және т.б., 2016) нормативтеріне және (Li., 2022; Sahani A.K. et.al., 2024) ғылыми зерттеу нәтижелеріне сәйкес анықталды.

Осы бағыттағы зерттеулер негізінде авторлар ұжымы – Болшаков Д.В., Болшаков В.В., Немцев В.С. және Гольцев А.Г. – қайнау қабатты пештің монолитті футеровкасының конструкциясын жасап, оған Қазақстан Республикасының №28370 инновациялық патентін алған.

Бұл жұмыста аталған патенттелген конструкцияны тәжірибелік және компьютерлік әдістер арқылы талдау негізінде жетілдірілді. Атап айтқанда, сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетонның беріктігі мен термотөзімділігі MS-500 гидравликалық пресінде сынақтан өткізіліп, алынған нәтижелер компьютерлік модельдеу арқылы салыстырмалы талданды. Бұл тәсіл бұрынғы конструкцияның тиімділігін тәжірибелік жолмен дәлелдеуге және оның жұмыс жағдайындағы беріктік сипаттамаларын нақтылауға мүмкіндік берді.

Сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетон құрамын таңдаудың негізгі мақсаты - ұсақ және ірі толтырғыштардың оңтайлы арақатынасын анықтау болып табылады. Мұндай қатынас байланыстырғыш заттың ең аз мөлшерін пайдалану арқылы бетонның кеуектілігі мен шөгуін азайтып, сонымен қатар оның жоғары отқа төзімді қасиеттерін қамтамасыз етеді (Helle et.al., 2022).

Сұйық шыны негізіндегі бетонның нақты жалпы кеуектілігі оның құрамындағы толтырғыштың шынайы кеуектілігіне тәуелді. Бұл көрсеткіш толтырғыштың сұйық шынымен сіңірілуі нәтижесінде ішінара төмендейді. Сонымен қатар, бетонның жалпы кеуектілігі қатаю кезінде байланыстырғыш заттың кеуектілігіне және толтырғыш түйіршіктері арасындағы бос кеңістіктердің (кеуектердің) болуына байланысты анықталады.

Кеуектілік – жоғары температурада жұмыс істейтін материалдардың маңызды сипаттамаларының бірі. Кеуектілік азайған сайын материалдың беріктігі, сондай-ақ оның жоғары температура мен агрессивті ортаға төзімділігі артады (Marandi et.al., 2025).

Кеуектіліктен бөлек, отқа төзімді бетонның тағы бір негізгі сипаттамасы – оның температуралық шөгуі болып табылады. Бұл көрсеткіш негізінен бетон құрамындағы байланыстырғыш заттың түрі мен мөлшеріне тәуелді. Байланыстырғыштың үлесі артқан сайын бетонның шөгуі де артады. Сондықтан шөгу көлемін азайту үшін байланыстырғыш заттың шығынын төмендету қажет. Бұл ғылыми тұрғыдан да негізделген, өйткені байланыстырғыш материалдың өзі толтырғыштармен салыстырғанда төменірек отқа төзімділікке ие.

Отқа төзімді бетонның құрамын таңдау эмпирикалық сынақ әдістермен жүзеге асырылды. Бұл әдістің негізгі принципі – толтырғыш түйіршіктері арасындағы кеңістіктерді байланыстырғыш ерітіндімен қажетті көлемде толтыру арқылы бетон



қоспасының құйылғыштығын (ыңғайлы төселуін) қамтамасыз етумен қайталама сынақтан өткізу.

Байланыстырғыш ерітіндінің көлемі қоспаға түйіршік аралық кеңістік көлемінен сәл артық мөлшерде енгізіледі. Мұндай артық көлем, бір жағынан, қоспаның қажетті қозғалғыштығын қамтамасыз етуге, ал екінші жағынан – кеуекті толтырғыштарды пайдаланған кезде олардың қуыстарына сіңірілетін байланыстырушы материалдың көлемін өтеуге арналған (Zhang et.al., 2025; Wang et.al., 2025).

ЗЕРТТЕУ ДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕСІ

Минималды кеуектілікке ие толтырғыш қоспаларын алу үшін ұсақ және ірі шамот толтырғыштарының әртүрлі массалық қатынастарындағы құрғақ қоспалар дайындалды. Әр қоспа үшін вибрациялық алаңда тығыздау кезінде оның үйінді тығыздығы анықталды. Зерттеу нәтижесінде ең жоғары үйінді тығыздық - 1700 кг/м^3 - ұсақ және ірі фракциялардың 65:35 (массалық %) қатынасына сәйкес келетіні, яғни ұсақ толтырғыш үлесі жоғары болғанда байқалатыны көрсетілді.

Алайда эксперименттік зерттеулер ұсақ толтырғыш шығыны артқан сайын, толтырғыштың меншікті бетінің ұлғаюына байланысты сұйық шыныға деген қажеттілік айтарлықтай өсетінін көрсетті (Zhang et.al., 2022). Сұйық шыны шығынын ескере отырып, ұсақ пен ірі толтырғыштардың оңтайлы арақатынасы 40:60 екені анықталды. Бұл жағдайда қоспаның орташа тығыздығы 1620 кг/м^3 болды.

Барлық есептеулер нормативтік құжаттарда баяндалған негізгі әдістемелерге сәйкес орындалды (Wang et al., 2023; Issa Fares et al., 2023).

Бетон қоспасының 1 м^3 көлеміне шаққандағы ірі және ұсақ толтырғыштардың шығыны (мөлшері) келесі (1) формула бойынша анықталады:

$$P_T = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{к.т.}} + \frac{\alpha \cdot K_{арм.}}{\rho_T}} \quad (1)$$

мұндағы: P_T – толтырғыштардың шығыны, кг; $\rho_{к.т.}$ – толтырғыштың көрінерлік тығыздығы, т/м^3 ; α – толтырғыштың кеуектілігі; $K_{арм.}$ – байланыстырғыш ерітінді артығының коэффициенті (бетон қоспасының төселу ыңғайлылығын ескере отырып, бұл коэффициентті 1,5 деп қабылдауға болады); P_T – ұсақ және ірі толтырғыштар қоспасының орташа тығыздығы, т/м^3 (тығыздалмаған күйінде).

Ірі толтырғыштың шығыны (I) толтырғыштардың анықталған оңтайлы арақатынасына негізделе отырып, келесі (2) формула бойынша анықталады:

$$I = \rho_T \cdot k \quad (2)$$

мұндағы k – ірі толтырғыштың пайыздық мөлшері (үлесі).

Ұсақ толтырғыштың шығыны (Y) формула (3) бойынша анықталады.

$$Y = (P_T - K) \cdot (1 + g) \quad (3)$$

мұндағы g – ұсақ толтырғыш құрамындағы мөлшері $0,14 \text{ мм}$ -ден кем емес бөлшектердің үлесі.

Толтырғыштың кеуектілігі (α_T) тәжірибе жүзінде немесе (4) формула бойынша анықталады.

$$\alpha_T = \frac{\rho_{к.т.} - \rho_T}{\rho_{к.т.}} \quad (4)$$



мұндағы: $\rho_{к.т.}$ – толтырғыштың көрінерлік тығыздығы (немесе кесек күйіндегі орташа тығыздығы), т/м³; P_T – толтырғыштың үйінді (көлемдік) тығыздығы, т/м³.

Сұйық шыны негізіндегі бетон үшін қатайтқыш пен ұнтақталған қоспалар қоспасының шығыны (мөлшері) (5) формула бойынша есептеледі.

$$N = \frac{\alpha_T \cdot P_T \cdot \rho_m \cdot K_{арм.}}{\rho_T} \quad (5)$$

мұндағы: N – ұнтақталған қоспа мен қатайтқыш қоспасының массасы, кг; P_T – ұсақ және ірі толтырғыштардың жалпы массасы, кг; ρ_m – ұнтақталған қоспаның үйінді (көлемді) тығыздығы, т/м³; $K_{арм.}$ – байланыстырғыш ерітінді артығының коэффициенті; ρ_T – ұсақ және ірі толтырғыштар қоспасының үйінді (көлемді) тығыздығы, т/м³.

Байланыстырғыш ерітінді артығының коэффициенті тәжірибе жүзінде анықталды. Ол үшін есептеу нәтижелеріне сүйене отырып, байланыстырғыш артығының коэффициенті 1,2-1,8 аралығында өзгертін сынамалық қоспалар дайындалды. Әр қоспа үшін бетон қоспасының құйылғыштығы (төселу ыңғайлылығы) анықталды.

Зерттеу нәтижесінде, бетон қоспаларының жеткілікті құйылғыштығы байланыстырғыш ерітінді артығының коэффициенті 1,5 болған жағдайда қамтамасыз етілетіні анықталды.

Сұйық шынының шығыны (6) формула бойынша анықталды.

$$P_c = \left(\frac{N}{\rho_m} + \frac{P_T \cdot W}{\rho_T \cdot 100} \right) \cdot \rho_{с.ш.} \quad (6)$$

мұндағы P_c – сұйық шынының массасы, кг; W – толтырғыштардың су сіңіргіштігі, %; $\rho_{с.ш.}$ – сұйық шынының тығыздығы, т/м³; ρ_T – ұнтақталған қоспаның тығыздығы, т/м³.

Толтырғыштардың су сіңіргіштігін анықтау үшін массасы 0,5 кг, бөлшек өлшемі 2,5 мм болатын орташа сынама алынады. Сынама тұрақты массаға дейін кептіріліп, содан кейін ыдысқа салынып, бөлме температурасындағы сумен толтырылады. 2 сағат ұсталғаннан кейін, су тесіктерінің диаметрі 1,25 мм-ден аспайтын електен сүзіліп алынады. Толтырғыш алдын ала суланған және сығылған сүлгімен жеңіл құрғатылып, таразыда өлшенеді.

Ішінара су сіңіргіштік, %, (7) формула бойынша есептеледі.

$$W = \frac{P_{су-P}}{P} \cdot 100 \quad (7)$$

мұндағы $P_{су}$ – сумен қаныққан толтырғыштың массасы, кг; P – құрғақ толтырғыштың массасы, кг.

Қатайтқыштың шығыны (мөлшері) (8) формула бойынша анықталады.

$$O = m \cdot P_c \quad (8)$$

мұндағы: O – қатайтқыштың массасы, кг; m – қатайтқыштың үлесі.

Қатайтқыштың шығыны байланыстырғыш пен бетон құрамдарын әзірлеу кезінде тәжірибе жүзінде анықталады және ол ұнтақталған қоспаның түріне байланысты өзгереді. Шамот қолданылған жағдайда, қатайтқыштың үлесі сұйық шыны массасының 0,1-0,15 бөлігін құрайды.

Ұнтақталған қоспалардың шығыны (9) формула бойынша есептеледі.

$$T = N \cdot O \quad (9)$$

T – ұнтақталған қоспаның массасы, кг; N – ұнтақталған қоспа мен қатайтқыш қоспасының жалпы массасы, кг; O – қатайтқыштың массасы, кг.

Келесі кезеңде сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетонның есебі ҚР СН және Е 5.03-34-2005 «Бетон және темірбетон конструкциялары» дереккөзіне сәйкес, тығыздығы 1,38



болатын сұйық шыны, құрамында 0,14 мм-ден кіші бөлшектер 10 % болатын ұсақ шамот толтырғыш, толтырғыштың су сіңіргіштігі – 9 %, ұнтақталған қоспа (мертель) материалдары негізінде жүргізілді.

Ұсақ және ірі толтырғыштардың шығыны (1) формула бойынша келесідей анықталады.

$$P_T = \frac{1000}{\frac{1}{1,03 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,35}} = 1200 \text{ кг}$$

Ірі толтырғыштың массасы (2) формула бойынша анықталады.

$$I = 1200 \cdot 0,6 = 720 \text{ кг}$$

Ұсақ толтырғыштың массасы (3) формула бойынша анықталады.

$$Y = (1200 - 720) \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \approx 530 \text{ кг}$$

Толтырғыштың кеуектілігі (4) формула бойынша анықталады.

$$\alpha_T = \frac{2 - 1,35}{2} \approx 0,32$$

Ұнтақталған қоспа мен қатайтқыштың шығыны (5) формула бойынша анықталады.

$$N = \frac{0,32 \cdot 1200 \cdot 1,2 \cdot 1,5}{1,35} = 511 \text{ кг}$$

Сұйық шынының шығыны (6) формула бойынша есептеледі.

$$P_c = \left(\frac{511}{2,65} + \frac{1200 \cdot 0,09}{1,35}\right) \cdot 1,38 = 385 \text{ кг}$$

1 м³ отқа төзімді бетонға арналған натрий фторидінің шығыны (8) формула бойынша сұйық шыны массасының 10–15 %-ын құрайды, сонда

$$O = 0,12 \cdot 385 = 46 \text{ кг}$$

Ұнтақталған қоспаның шығыны (9) формула бойынша құрайды.

$$T = 511 - 46 = 465 \text{ кг}$$

Вельц пешінің футеровкасы сынықтарын пайдалана отырып, шамот толтырғышы бар сұйық шыны негізіндегі 1 м³ отқа төзімді бетонға арналған материалдардың шығыны 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. 1 м³ отқа төзімді бетонға арналған материалдардың шығыны, кг

Аталуы		Шығыны, кг
Сұйық шыны		385
Натрий фторсиликаты		46
Ұсақ ұнтақталған толтырғыш (мертель)		465
Шамот толтырғыш:		
	– ұсақ	530
	– ірі	720
<i>Ескерту – авторлармен құрастырылған</i>		

1-суретте Вельц пешінің бұзылған футеровкасы, ШКУ маркалы отқа төзімді кірпіш және осы кірпіштен алынған ірі толтырғыш көрсетілген.



1-сурет. Вельц пешінің футеровкасының бұзылуы: а – ШКУ маркалы кірпіш
б – 5–20 мм фракциялы ұсақталған ШКУ маркалы кірпіш

Ескерту – авторлармен құрастырылған

ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Қайнау (псевдосұйық) қабатты пештің футеровка сапасын бағалау мақсатында, қайталама отқа төзімді материалдар негізіндегі монолитті отқа төзімді бетонды қолдану арқылы тәжірибелік зерттеу жүргізу қажет. Бұл зерттеу барысында отқа төзімді бетонның физика-механикалық қасиеттері ішінен негізгі сипаттамаларды бөліп алып, олардың негізінде сапаны кешенді түрде бағалау жүзеге асырылады.

Қайнау қабатты пештің футеровкасы биіктігі 13 м, диаметрі 7,6 м болатын шахтадан және көтерілу биіктігі 1,15 м күмбезді төбеден тұрады. Сондықтан футеровка конструкциясының жүк көтергіштігін (жүктемеге төзімділігі) есептеу үшін бетонның сығылуға беріктігін анықтау қажет.

Пешті ағымдағы және күрделі жөндеулер кезінде тоқтатуға байланысты туындайтын біртіндеп қыздыру мен салқындатуға бетонның төтеп бере алатынын тексеру мақсатында оның термотөзімділігін анықтау қажет.

Беріктікке сынау кезінде сенімділік деңгейі $P = 0,9$ болатын құрам алу үшін, мемлекетаралық стандарт 20910–2019 талаптарына сәйкес қабырғасының ұзындығы 100 мм кемінде үш текше үлгі, ал термотөзімділікті анықтау үшін қабырғасының ұзындығы 70 мм кемінде үш текше үлгі дайындалуы қажет.

Қазіргі аталған зерттеу бағытындағы қолданыстағы термотөзімділікті сынау әдістері жеткілікті жетілдірілмеген, себебі олар қайнау қабатты пештер мен басқа да жылу агрегаттарының нақты жұмыс жағдайларын толық бейнелемейді. Әрбір жылу қондырғысының өзіндік қыздыру және салқындату циклі бар, оны басқа агрегаттардың циклімен теңестіруге болмайды. Бұдан бөлек, отқа төзімді бетонның барлық түрлері су ортасында салқындатуға төзімді емес — сұйық шыны негізіндегі бетон үшін ауада салқындату әдісі қажет (Logunin et.al., 2018; Tomasz et.al., 2014).

Сұйық шыны негізіндегі бетондарды сынау кезінде отқа төзімді материалдардың термотөзімділігін анықтаудың стандартты әдісін қолдану, нақты күтілген шаманы бермейдіні көмтеген зерттеулерде келтірілген (Zelig et.al., 2014). Себебі мұндай жағдайда бетонның бұзылуы тек температураның күрт ауытқуының әсерінен ғана емес, сонымен қатар су ортасының ықпалынан да туындауы ықтимал. Сондықтан сұйық шыны негізіндегі бетонның термотөзімділігін бағалау үшін арнайы бейімделген әдістеме қолдану қажет.

Отқа төзімді бетонның термотөзімділігін анықтау үшін мемлекетаралық стандарт 20910-2019 құжатының 5-қосымшасында берілген «Бетонның термотөзімділігін анықтау әдісі» бойынша сынақ әдісі қолданылды. Әдістеме талаптарына сәйкес, өлшемі 70×70×70 мм



үлгі-текшелер алдын ала 800 °С температураға дейін қыздырылған пешке орналас-тырылып, осы температурада 40 минут ұсталады. Одан кейін үлгілер пештен алынып, 30–50 °С температураға дейін ауа ағынында салқындатылады. Әрбір қыздыру мен салқындату циклі аяқталған соң үлгілер мұқият тексеріліп, жарықтардың пайда болуы, бұзылу сипаты және масса жоғалу деңгейі тіркеледі. Бұл қыздыру және салқындату циклі үлгілер бастапқы массасының 20 %-ын жоғалтқанға дейін немесе толық бұзылғанға дейін қайталанады.

Сынақ жүргізу үшін екі серия үлгілер дайындалды:

– «1 серия (12.07)» 6 текше;

– «4 серия (16.07)» 3 текше.

Барлық үлгі-текшелердің қабырғасының ұзындығы 70 мм, ал массасы 630–710 грамм аралығында болды.

Сынақ барысында:

– 800 °С температураға дейін қыздырғанда, барлық үлгі-текшелер шамамен 20 г масса жоғалтты;

– 900 °С температурада «4 серия (16.07)» текшелері тұрған шамот кірпішке жабыса бастады, салқындатудан кейін олардың бетінде қара түсті жолақтар мен таяз ойықтар пайда болды, алайда айтарлықтай масса жоғалу байқалмады. Сол себепті де, осы сериядағы үлгілерге келесі сынақтар жүргізілген жоқ;

– «1 серия (12.07)» үлгілерін сынау нәтижелерінде, қыздыру мен салқындатудың 12 циклінде, үлгілерде айтарлықтай өзгерістер мен масса жоғалу байқалмады;

– 1000 °С температурада текшелердің бетінде қара дақтар мен ұсақ ойықтар пайда болды, бірақ массасының айтарлықтай азаюы тіркелмеді;

– 1200 °С температурада «1 серия (12.07)» үлгілері балқу белгілерін көрсетті және олардың беті қарайып, балқып, шамот кірпішке жабысып қалды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

«1 серия (12.07)» және «4 серия (16.07)» үлгілерін сынау нәтижелері бойынша, «1 серия (12.07)» құрамындағы үлгілердің басым бөлігі 900 °С температурада 12 жылулық циклді айтарлықтай өзгеріссіз және масса жоғалтпай өткергені анықталды. Бұл нәтиже ҚР СН және Е 5.03-34-2005 «Бетон және темірбетон конструкциялары» нормативтік құжатына сәйкес, бетонның термотөзімділігі бойынша отқа төзімді бетон талаптарына толық сәйкес келетінін дәлелдейді.

«4 серия (16.07)» үлгілер тобы 900 °С температурада аздаған жылулық циклге төзімді болды, алайда 800 °С температура кезінде бұл серия жақсы тұрақтылық көрсеткіштерін көрсетті.

«4 серия (16.07)» үлгілерінің аз циклге төзімді болуының негізгі себебі, отқа төзімді бетон құрамында қолданылған сұйық шынының сапасының төмендігі. Екі үлгі сериясын дайындау барысында әртүрлі балқыту партияларынан алынған сұйық шыны пайдаланылған, бұл өз кезегінде бетонның термотөзімділік қасиеттеріне әсер етті.

Термотөзімділікті анықтау бойынша сынақ нәтижелері 2-кестеде келтірілген, ал сынақтан өткен үлгілердің фотосуреттері 2-суретте (а), (б), (в) көрсетілген.

2-кестеде берілген деректер отқа төзімді бетон үлгілерінің жылулық циклдер кезіндегі массаның өзгеруін, құрылымдық тұтастығын және сыртқы бетінің морфологиясын сипаттайды.

Көрсетілген нәтижелерден бетон құрамының тұрақтылығы мен термотөзімділік қасиеттерінің материал сапасына, әсіресе сұйық шынының сапасы мен фракциялық құрамының біркелкілігіне тікелей тәуелді екені байқалады.



2-кесте. Отқа төзімді бетонның термотөзімділігі

Рет №	Үлгілер өлшемі, мм	Үлгілер массасы, г	Сынақ сәтіндегі үлгілердің көлемдік салмағы, кг/м ³	Үлгінің жасы, тәулік	Ауа ортасында 900 °С температурада үлгінің жылулық циклдер саны, R _{тс}	Бір сериядағы жылулық циклдердің орташа саны, R _{тс}
Отқа төзімді бетон № 1						
1	70	610	1780	90	12	12,5
2	70	640	1870		12	
3	70	640	1870		12	
4	70	650	1900	94	12	
5	70	660	1920		14	
6	70	670	1950		13	
Отқа төзімді бетон № 4						
4	70	640	1870	93	2	1,3
5	70	690	2010		1	
6	70	690	2010		1	

Ескерту – авторлармен құрастырылған



a)



б)



с)

2-сурет. Отқа төзімді бетон үлгілерінің жылулық тұрақтылық сынағынан кейінгі сыртқы түрі: *a* – «12.07 ден 1» сериясы – 900 °С температурада термотөзімділік сынағынан кейінгі үлгілердің сыртқы көрінісі; *б* – «16.07 ден 4» сериясы – 900 °С температурада термотөзімділік сынағынан кейінгі үлгілердің сыртқы көрінісі; *с* – «12.07 ден 1» сериясы – 1200 °С температурада термотөзімділік сынағынан кейінгі үлгілердің сыртқы көрінісі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бетонның сығылуға беріктігін анықтау үшін берілген бетон құрамынан екі үлгі сериясы дайындалды – «13.07 ден 2» және «13.07 ден 3», әр серияда қабырғасының ұзындығы 100 мм болатын үш текше жасалды. Сығылуға беріктікке сынау МС-500 гидравликалық преста жүргізілді.

Сынақ басталар алдында дайындалған текшелердің массасы өлшеніп, олардың қырларының нақты өлшемдері анықталды. Одан кейін үлгілер пресс астына



орналастырылып, толық қирағанға дейін қысымға ұшыратылды (Helle және т.б., 2022; Ну және т.б., 2014).

Бетонның есептік маркалық беріктік шамасы (R) (10)-формула арқылы анықталды.

$$R_{b(n)} = R_{b(28)} \cdot \frac{\ln 28}{\ln n} \quad (10)$$

мұндағы $R_{b(n)}$ және $R_{b(28)}$ — сәйкесінше бетонның n тәуліктегі және 28 тәуліктегі шекті беріктігі, кгс/см²; $\ln n$ және $\ln 28$ — бетонның жасының ондық логарифмдері.

Бетонның сығылуға беріктігін анықтау бойынша сынақты МС-500 гидравликалық пресе өткізу барысы 3-суретте, ал нәтижелері 3-кестеде келтірілгендей.



а)



б)

3-сурет. Куб үлгілерінің беріктікке сынақтан өту процесі:

а – «13.07 тен 2» сериясындағы екі үлгі тобы; б – МС-500 гидравликалық пресе «13.07 тен 3» » сериясы үлгілерін сынау барысы

Ескерту – авторлармен құрастырылған

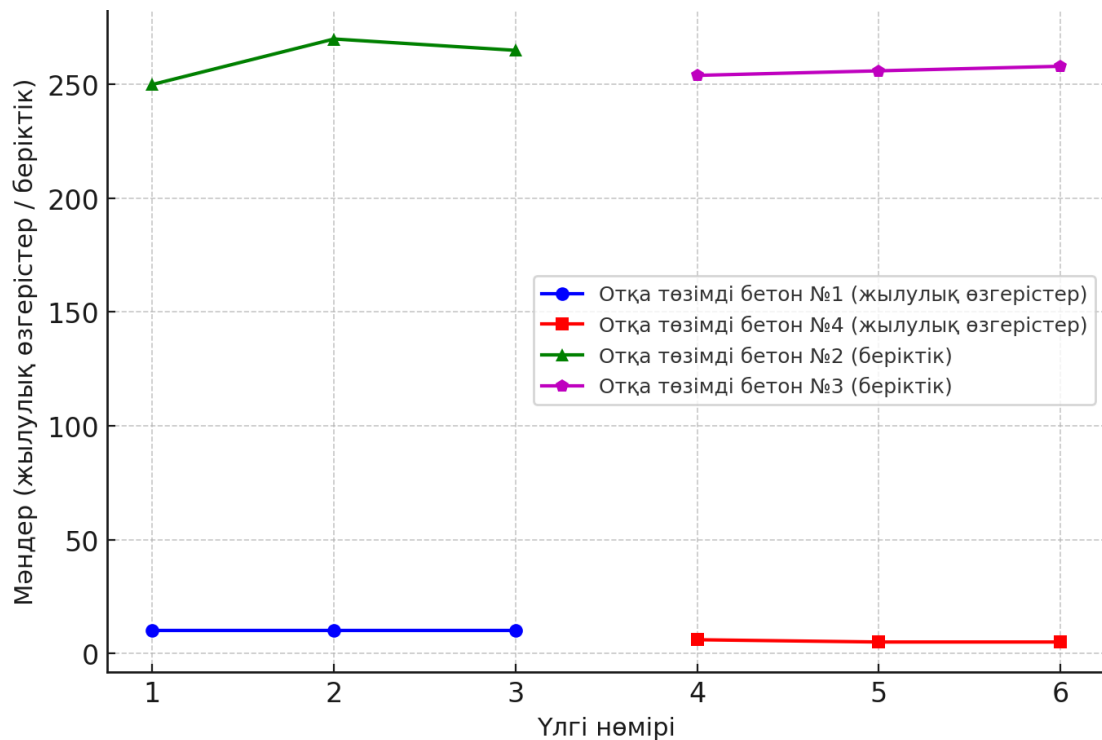
3-кесте. Отқа төзімді бетонның сығылуға беріктігі

Рет №	Үлгілер өлшемі, мм	Үлгілер массасы, г	Сынақ сәтіндегі үлгілердің көлемдік салмағы, кг/м ³	Үлгінің жасы, тәулік	Үлгілердің сынақ сәтіндегі сығылуға беріктігі, кгс/см ²	Сынақ кезіндегі бетонның беріктігі, кгс/см ²	Расчётное значение марочной прочности, кгс/см ²
Отқа төзімді бетон №2							
1	100×99×103	1960	1922	83	250,47	270,45	203,94
2	102×100×101	1990	1932		273,40		
3	105×100×101	1995	1881		267,49		
Отқа төзімді бетон №3							
4	104×101×102	1990	1858	83	262,90	269,53	203,25
5	102×101×101	1980	1903		266,98		
6	105×100×103	2025	1872		272,08		
<i>Ескерту – авторлармен құрастырылған</i>							

MS-500 гидравликалық пресі арқылы жүргізілген сығылуға беріктік сынақтарының нәтижелері негізінде алынған мәліметтер бойынша 4-суреттегі график тұрғызылды.



График бетон үлгілерінің жылулық циклдер саны мен беріктік арасындағы тәуелділікті көрсетеді.



4-сурет. Әртүрлі сериялардағы отқа төзімді бетон үлгілерінің салыстырмалы көрсеткіштері

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Зерттеу нәтижелері отқа төзімді бетон үлгілерінің физика-механикалық қасиеттерін кешенді бағалауға мүмкіндік берді. Сығылуға беріктік пен термотөзімділік көрсеткіштерін салыстыра талдау нәтижелері 4-суретте берілген. Бұл график MS-500 гидравликалық пресімен алынған эксперименттік мәліметтер негізінде тұрғызылған және әртүрлі бетон құрамдарының температуралық әсерге және механикалық жүктемеге төзімділігін айқын көрсетеді.

Салыстырмалы талдау нәтижесінде Бетон №1 жоғары термотөзімділік көрсетіп, 900 °C температурада 12–14 жылулық циклге дейін шыдағаны анықталды, бұл оның жоғары температуралы ортада қолдануға толық жарамдылығын дәлелдейді. Ал Бетон №4 тек 1–2 жылулық циклге ғана төзген, бұл оның құрамындағы байланыстырғыш материалдың сапасына байланысты термотұрақтылығының төмен екенін көрсетті. Сығылуға беріктік тұрғысынан Бетон №2 және №3 үлгілері ұқсас нәтижелер көрсетті – тиісінше 250,47–273,40 кгс/см² және 262,90–272,08 кгс/см² аралығында, бұл олардың құрылымдық беріктік пен ұзақ мерзімді сенімділігін қамтамасыз ететінін дәлелдейді.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері Бетон №1 үлгісінің термотөзімділігі бойынша, ал Бетон №2 мен №3 үлгілерінің сығылуға беріктік тұрғысынан тиімді екенін көрсетті. Бетон №4 үшін термотұрақтылық қасиетін арттыру мақсатында құрамдық жетілдірулер енгізуді қажет ететіні байқалды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген тәжірибелік зерттеулер отқа төзімді бетон құрамында екінші реттік (қайта пайдаланылған) отқа төзімді материалдарды толтырғыш ретінде қолдану



мүмкіндігін дәлелдеді. Мұндай тәсіл бетон қоспасының өзіндік құнын төмендетуге және өндірістік қалдықтарды тиімді қайта өңдеуге мүмкіндік береді.

Бетон құрамын өзгерту арқылы оның термотөзімділігі мен беріктігін арттыруға болатыны анықталды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, құрамға әртүрлі қоспаларды, соның ішінде екінші реттік отқа төзімді материалдарды енгізу бетонның жоғары температурада беріктігін сақтап қалу қабілетін күшейтеді.

Тәжірибелер нәтижесінде отқа төзімді бетон жоғары температурада өзінің беріктігінің айтарлықтай бөлігін сақтап қалатыны дәлелденді. Алайда белгілі бір температуралық шектен асқанда материал құрылымдық өзгерістерге ұшырап, беріктігін төмендеті бастайды. Мұндай жағдайда шешім ретінде сұйық шыны негізіндегі бетонды қайнау қабатты пештердің футеровкасы үшін қолдану ұсынылады, бұл зерттеу нәтижелерімен де расталды.

Алынған тәжірибелік деректер бетонның әртүрлі температуралық жағдайларда өзін ұстау ерекшелігін бағалауға және оны нақты пайдалану шарттарына сәйкес ұтымды қолдануға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері отқа төзімді бетонға арналған стандарттар мен ұсынымдарды әзірлеуге ғылыми негіз бола алады. Бұл өз кезегінде инженерлер мен құрылыс мамандарына нақты жобалардың пайдалану жағдайларына сәйкес материал таңдауға және оңтайлы техникалық шешім қабылдауға мүмкіндік береді.

Сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетонды қайнау қабатты пештердің футеровкасына қолдану мүмкіндігі дәлелденді. Мұндай шешім дәстүрлі кірпіш футеровкасына қарағанда, бірқатар айқын артықшылықтар береді. Ең алдымен, ол қалау жіктерінің санын азайтуға немесе оларды мүлде жоюға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде құрылымның тығыздығы мен сенімділігін арттырады. Сонымен қатар, футеровканың беріктігі мен ұзақ мерзімділігі арқасында пештің жалпы қызмет ету мерзімі ұлғаяды яғни, монолитті футеровка агрессивті ортада жоғары механикалық беріктік пен химиялық тұрақтылық көрсетеді. Сұйық шыны негізіндегі отқа төзімді бетонның жоғары әртүрлілік қасиеттері пешті жөндеу уақытының қысқаруына ықпал етеді, ал бетонның жылдам беріктенуі мен жедел кептіру режимдері агрегатты қысқа мерзім ішінде қайта пайдалануға енгізуге мүмкіндік береді.

Бұл нәтижелер экстремалды жағдайларда жұмыс істеуге қабілетті, сенімді әрі ұзақ мерзімді құрылыс материалдарын әзірлеуге мүмкіндік беретін маңызды ғылыми негіз болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар бұл мақалада келтірілген нәтижелерге ықпал етуі мүмкін қандай да бір қаржылық мүдделері немесе жеке қатынастарының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын қолданбады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Alaskar, A. (2025). A comprehensive review on the influence of elevated temperatures on the mechanical performance of high-performance concretes. *J. Umm Al-Qura Univ. Eng. Archit.*, 16, 879–890. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00199-w>
- Al-Dala'ien, R.N., Zaid, O., Al-Ezzi, M.J. et al. (2025). State-of-the-art review on high-temperature performance of plant-based fiber reinforced concrete. *Discov Mater*, 5, 176. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00379-4>



- Al-Gburi, M., Abed, J., Almssad, A., Alhayani, A. A., Jędrzejewska, A., & Nilsson, M. (2025). The effect of real curing temperatures on early age concrete strength development in massive concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(9), 1832–1847. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2458294>
- Antonovič, V., Malaiškiene, J., Boris, R., Kudžma, A., & Stonys, R. (2023). Analysis of the structure and durability of refractory castables impregnated with sodium silicate glass. *Ceramics*, 6, 2320–2332. <https://doi.org/10.3390/ceramics6040142>
- Baral, A., & Roesler, J. R. (2024). Digital foam index for evaluating fly ash air entrainer interactions. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(12), 1829–1841. <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2414337>
- Chen, S. (2023). Review of heat resistant concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2608(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2608/1/012014>
- Danyang, S., Chuanlong, H., Xie, L. et al. (2025). Experimental study on pore structure and dynamic mechanical properties of different types of fiber reinforced concrete after elevated temperature action. *Sci Rep*, 15, 34005. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13409-1>
- Helle, M., Saxen, H., Graaff, B., & Bent, C. (2022). Wear-model-based analysis of the state of blast furnace hearth. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 53(1). <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02399-w>
- Helle, M., Saxén, H., de Graaff, B. et al. (2022). Wear-Model-Based Analysis of the State of Blast Furnace Hearth. *Metall Mater Trans B*, 53, 594–603. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02399-w>
- Huang, Y., Chu, M., Gan, X., Zhang, S., Wang, Z., & Zhang, J. (2025). Mass and heat balance model and its engineering application for the oxygen blast furnace smelting process of vanadium–titanium magnetite. *Metals*, 15, 805. <https://doi.org/10.3390/met15070805>
- Issa Fares, A., Md Abu Sohel, K., Al-Jabri, K., & Al-Saidy, A. (2023). Influence of ferrochrome slag as coarse and fine aggregates on thermal and strength properties of concrete at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 400, 132807. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132807>
- Jiao, K., Cao, J., Zhang, J. et al. (2025). Nucleation and Growth Mechanism of Graphite-Iron Protective Layer in Blast Furnace Hearth. *Metall Mater Trans B*, 56, 5870–5885. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03685-7>
- Li, M., & Gan, F. (2023). Experimental study of high temperature on the shear properties of early age concrete. *Front. Mater.*, 10:1280057. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1280057>
- Li, Y., Wang, H., & Lou, H. (2024). Strength Recovery of Thermally Damaged High-Performance Concrete during Recuring. *Materials*, 17, 3531. <https://doi.org/10.3390/ma17143531>
- Li, Y., Luo, Y., Du, H., Liu, W., Tang, L., & Xing, F. (2022). Evolution of microstructural characteristics of carbonated cement pastes subjected to high temperatures evaluated by MIP and SEM. *Materials*, 15, 6037. <https://doi.org/10.3390/ma15176037>
- Malaiškiene, J., Antonovič, V., Boris, R. et al. (2023). Analysis of the Structure and Durability of Refractory Castables Impregnated with Sodium Silicate Glass. *Ceramics*, 6, 2320–2332. <https://doi.org/10.3390/ceramics6040142>
- Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 10, 408. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02213-5>



- Rahjoo, M., Caggiano, A., Berardi, U. et al. (2025). Reviewing numerical studies on sensible thermal energy storage in cementitious composites: report of the RILEM TC 299-TES. *Mater Struct*, 58, 40. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02548-y>
- Rihan, M.A.M., Onchiri, R.O., Gathimba, N. et al. (2024). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of geopolymers concrete: a critical review. *Discov Civ Eng*, 1, 24. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00028-4>
- Sahani, A.K., Ghosh, S., Samanta, A.K. et al. (2024). Influence of fly ash on refractory properties and microstructural characteristics of sustainable refractory bricks. *J. Inst. Eng. India Ser. A*, 105, 317–329. <https://doi.org/10.1007/s40030-024-00791-8>
- Samchenko, S.V., & Korshunov, A.V. (2024). Formation of cellular concrete structures based on waste glass and liquid glass. *Buildings*, 14, 17. <https://doi.org/10.3390/buildings14010017>
- Shakhabov, M. M., Sivenkov, A. B., & Korolchenko, D. A. (2023). Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации. *Вестник МГСУ*, 18(6), 864-879.
- Tawfik, T.A., Palou, M. T., Šoukal, F. et al. (2025). Influence of post-fire recurring regimes on the properties of self-compacting concrete with heavyweight aggregate. *Sci Rep*, 15, 35833. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19737-6>
- Wang, J., Ma, K., Wei, Z. et al. (2025). Three-dimensional numerical simulation analyses for heat transfer and thermal stress in blast furnace hearth lining with different refractory masonry methods. *J Mech Sci Technol*, 39, 4747–4764. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0745-9>
- Wang, L., Chen, L., Yuan, F., Zhao, L., Li, Y., & Ma, J. (2023). Thermal stress analysis of blast furnace hearth with typical erosion based on thermal fluid-solid coupling. *Processes*, 11, 531. <https://doi.org/10.3390/pr11020531>
- Zhang, C., Chenxi, Z., Shao, L., Saxén, H., Yingxia, Q., & Zou, Z. (2022). Numerical estimation of hearth internal geometry of an industrial blast furnace. *Steel Research International*, 93(2), Article 2100364. <https://doi.org/10.1002/srin.202100364>
- Zhang, Q., Xing, H., Yang, A., Li, J., & Han, Y. (2025). A comprehensive review of slag-coating mechanisms in blast-furnace staves. *Materials*, 18, 3727. <https://doi.org/10.3390/ma18163727>

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Гольцев Анатолий Григорьевич – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Гольцев Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Goltsev Anatoly Grigoryevich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: Agoltsev-vko@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9574-2407>,



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

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

Chernavin Valeriy Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: VChernavin@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2247-1458>



Апшиқур Байтақ – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Апшиқур Байтақ – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серікбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Apshikur Baitak – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz ,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-9513>



Алимқулов Мурат Маметқулович – техника ғылымдарының кандидаты, М. Тынышбаев атындағы АЛТ Университет, Алматы қ., Қазақстан

Алимқулов Мурат Маметқулович – кандидат технических наук, АЛТ Университет им. М. Тынышбаева, г. Алматы, Казахстан

Alimkulov Murat Mametkulovich – Candidate of Technical Sciences, ALT University M. Tynyshbayev, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: m.alimkulov@alt.edu.kz ,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1882-760X>