

Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/159>

BLAST FURNACE SLAG IN ROAD CONSTRUCTION: FROM REPLACING NATURAL MATERIALS TO PROPERTY ENGINEERING

¹Kunaev V.A., ²Fathi M.S., ^{3*}Ospanova A.Z.

1 Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

2 Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

3 Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

**Corresponding author's E-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz*

Author information:

Kunaev Vyacheslav Alexandrovich, PhD, Associate Professor, Director of the Department of Science and Innovations, Karaganda Industrial University, Republic Ave., 30, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@ttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, Associate Professor, Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Sultan Yahya Petra, 54100, Kuala Lumpur, Malaysia, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Ospanova Ayaulym Zainullaevna, PhD student, Karaganda Industrial University, Republic Ave., 30, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz

Abstract - The article presents a systematized analysis of the application of various types of blast furnace slag in road construction, based on scientific publications from 2000 to 2026. It has been established that the efficiency of material use critically depends on its cooling method and subsequent processing. Dump blast furnace slag is predominantly used as an aggregate, whereas ground granulated blast furnace slag serves as a binding component or mineral filler. It is shown that the optimal degree of replacement for natural materials is not a universal value: for cement concretes, the best performance indicators are often achieved when replacing 20-40% of the aggregate, but this applies only to high-quality raw materials. Particular attention is paid to pre-treatment methods for dump blast furnace slag (selective crushing), which allow for reduced water absorption and improved frost resistance. It is demonstrated that in asphalt concretes and road bases, the use of modified slag contributes to increased rutting resistance and bearing capacity. A conclusion is drawn regarding the necessity of transitioning from simple substitution of natural resources to the engineering of slag material properties, including the assessment of the long-term durability of composites based on them.

Keywords - blast furnace slag, road construction, cement concrete, asphalt concrete, aggregate replacement, selective crushing, ground granulated blast furnace slag, dump blast furnace slag.

ДОМНА ПЕШІНІЇ ҚОЖЫ ЖОЛ ҚҰРЫЛЫСЫНДА: ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДЫ АЛМАСТЫРУДАН ҚАСИЕТТЕРДІ ИНЖЕНЕРЛЕУГЕ ДЕЙІН

¹Кунаев В.А., ²Fathi M.S., ^{3*}Оспанова А.З.

¹«Қарағанды индустриялық университеті», Теміртау, Қазақстан

²Малайзия технологиялық университеті, Куала-Лумпур, Малайзия

³«Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Теміртау, Қазақстан

**Корреспонденттің E-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Кунаев Вячеслав Александрович, PhD, доцент, Ғылым және инновациялар департаментінің директоры, «Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Республика даңғылы, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@ttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, доцент, Малайзия технологиялық университеті, Султан Яхья Петра көшесі, 54100, Куала-Лумпур, Малайзия, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Оспанова Аяулым Зайнуллаевна, докторант, «Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Республика даңғылы, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@tttu.edu.kz

Андатпа – Мақалада 2000 - 2026 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдар негізінде жол құрылысында домна пешінің қожы әртүрлі түрлерін қолданудың жүйеленген талдауы ұсынылған. Материалды пайдаланудың тиімділігі оны суыту әдісіне және кейінгі өңдеуге сыни тұрғыдан тәуелді екені анықталды. Домна пешінің қож негізінен толтырғыш ретінде қолданылады, ал түйіршіктелген қож байланыстырушы компонент немесе минералдық толтырғыш функциясын атқарады. Табиғи материалдарды алмастырудың оңтайлы дәрежесі әмбебап шама емес екені көрсетілген: цементбетондар үшін ең жақсы көрсеткіштер жиі толтырғыштың 20-40%-ын алмастыру кезінде қол жеткізіледі, бірақ бұл тек сапалы шикізат үшін ғана дұрыс. Домна пешінің қожын алдын ала өңдеу әдістеріне (іріктеп ұсақтау) ерекше назар аударылған, бұл су сіңіруді азайтуға және аязға төзімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Асфальтбетондарда және жол негіздерінде модификацияланған қожты пайдалану із түсуге төзімділік пен жүк көтеру қабілетінің артуына ықпал ететіні дәлелденген. Табиғи ресурстарды қарапайым алмастырудан шлак материалдарының қасиеттерін инженерлеуге, соның ішінде олар негізіндегі композиттердің ұзақ мерзімді төзімділігін бағалауға көшу қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Кілт сөздер – домендік қож, жол құрылысы, цементбетон, асфальтбетон, толтырғыштарды алмастыру, іріктеп ұсақтау, түйіршіктелген домендік қож, домна пешінің қожы.

ДОМЕННЫЙ ШЛАК В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОТ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ИНЖЕНЕРИНГУ СВОЙСТВ

¹Кунаев В.А., ²Fathi M.S. ^{3*}Оспанова А.З.

¹ НАО «Қарағанды индустриальный университет», Теміртау, Қазақстан

²Технологический университет Малайзии, Куала-Лумпур, Малайзия

³НАО «Қарағанды индустриальный университет», Теміртау, Қазақстан

*E-mail корреспондента: a.ospanova@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Кунаев Вячеслав Александрович, PhD, ассоциированный профессор, директор Департамента науки и инноваций, НАО «Қарағанды индустриальный университет», пр. Республики, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@tttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, ассоциированный профессор, Технологический университет Малайзии, ул. Султан Яхья Петра, 54100, Куала-Лумпур, Малайзия, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Оспанова Аяулым Зайнуллаевна, докторант, НАО «Қарағанды индустриальный университет», пр. Республики, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@tttu.edu.kz

Аннотация - В статье представлен систематизированный анализ применения различных видов доменного шлака в дорожном строительстве на основе научных публикаций с 2000 по 2026 годы. Установлено, что эффективность использования материала критически зависит от способа его охлаждения и последующей обработки. Отвальный доменный шлак преимущественно применяется как заполнитель, тогда как гранулированный шлак выполняет функции вяжущего компонента или минерального наполнителя. Показано, что оптимальная степень замены природных материалов не является универсальной величиной: для цементных бетонов лучшие показатели часто достигаются при замене от 20 до 40% заполнителя, однако это справедливо только для качественного сырья. Особое внимание уделено методам предварительной обработки отвального доменного шлака (избирательное дробление), которые позволяют снизить водопоглощение и повысить морозостойкость. Продемонстрировано, что в асфальтобетонах и основаниях дорог использование модифицированного шлака способствует росту устойчивости к колееобразованию и несущей способности. Произведен вывод о необходимости перехода от простого замещения природных ресурсов к инжинирингу свойств шлаковых материалов, включая оценку долгосрочной долговечности композитов на их основе.

Ключевые слова - доменный шлак, дорожное строительство, цементный бетон, асфальтобетон, замена заполнителей, избирательное дробление, гранулированный доменный шлак, отвальный доменный шлак.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Доменный шлак не является однородным материалом; его функциональное назначение строго определяется способом охлаждения: отвальный доменный шлак служит заполнителем, а гранулированный вяжущим или наполнителем.

Оптимальное содержание шлака в строительных композитах варьируется в зависимости от качества зерен и целевых характеристик; диапазон замены от 20 до 40% является статистически частым, но не универсальным оптимумом.

Предварительная обработка отвального доменного шлака методами избирательного дробления и гидрофобизации существенно улучшает его физико-механические свойства, снижая водопоглощение и повышая сопротивление разрушению.

Перспективным направлением является комплексный подход, сочетающий улучшение качества шлакового заполнителя с модификацией вяжущих систем для обеспечения долговечности дорожных конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Дорожное строительство относится к наиболее ресурсоемким отраслям, потребляющим огромные объемы природных каменных материалов и цемента. Одновременно металлургическая промышленность генерирует значительное количество техногенных отходов, среди которых доменный шлак занимает лидирующие позиции по потенциалу утилизации [1, 2].



Рисунок 1 – отвальный доменный шлак



Рисунок 2 – гранулированный доменный шлак

Использование шлаков позволяет не только решить экологические проблемы накопления отходов, но и снизить углеродный след строительных материалов за счет частичной замены клинкера и природного щебня [3, 4].

Физико-механические характеристики доменного шлака определяются технологией его получения. Медленное остывание на воздухе приводит к образованию кристаллического, часто пористого отвального доменного шлака, используемого в качестве заполнителя.

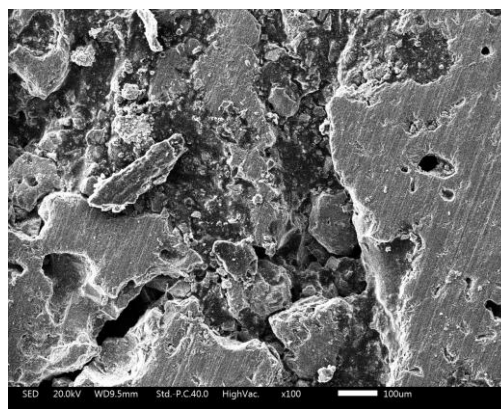


Рисунок 3 – микроструктура отвального доменного шлака x100

Быстрое охлаждение водой формирует стекловидный гранулированный шлак, который после помола проявляет скрытую гидравлическую активность и применяется как добавка к цементу или минеральный порошок в асфальтобетоне [5, 6].

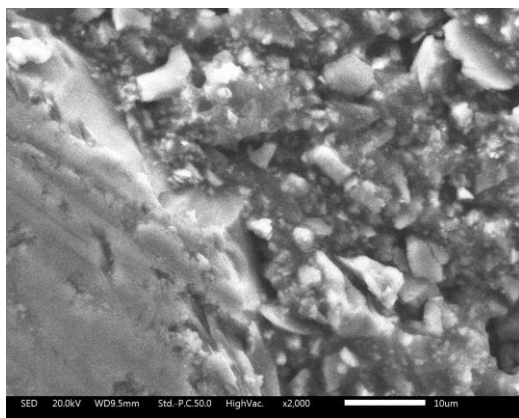


Рисунок 4 - СЭМ-микрофотография гранулированного доменного шлака x2000

Несмотря на обширную исследовательскую базу, прямое сравнение результатов различных авторов затруднено из-за различий в типах шлака, базах расчета дозировок (по массе цемента, заполнителя или вяжущего) и условиях твердения.

Пробел в исследовании. Большинство существующих обзоров фокусируются на поиске «оптимального процента» замены компонентов, игнорируя вариативность качества самого шлака. Недостаточно изучено влияние предварительной обработки (обогащения, гидрофобизации) отвального доменного шлака на долговечность конечных композитов в реальных условиях эксплуатации. Кроме того, отсутствует четкое разграничение между механической функцией шлака как заполнителя и химической ролью как вяжущего в контексте долгосрочной стойкости дорожных одежд. Требуется систематизация данных, связывающая качество исходного сырья и методы его модификации с эксплуатационными характеристиками материалов.

Научная новизна. В отличие от предыдущих работ, данное исследование акцентирует внимание на неоднородности доменного шлака и необходимости дифференцированного подхода к его применению. Впервые в рамках одного обзора сопоставлены эффекты различных методов предобработки отвального доменного шлака (избирательное дробление, обогащение по плотности, гидрофобизация) и их влияние на ключевые параметры дорожного строительства. Обоснована невозможность установления единого универсального оптимума содержания шлака и предложена концепция инжиниринга свойств, где качество заполнителя и состав вяжущей матрицы оптимизируются совместно. Выявлены перспективы использования слабощелочной

активации гранулированного доменного шлака в холодных асфальтобетонах как путь к глубокой декарбонизации.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Химический состав доменных шлаков варьируется в широких пределах в зависимости от сырьевой базы и режима плавки. Основными оксидами являются CaO (29-50%), SiO_2 (27-42%), Al_2O_3 (5-22%) и MgO (до 21%) [7, 8]. Именно соотношение указанных компонентов определяет гидравлическую активность гранулированного доменного шлака, однако для отвального доменного шлака решающую роль играют физическая структура и пористость.

В цементных бетонах отвального доменного шлака используется как крупный или мелкий заполнитель. Исследования показывают, что замена природного щебня на уровне от 20 до 40% часто дает наилучший баланс прочности и долговечности [9, 10]. Однако этот диапазон не абсолютен: в самоуплотняющихся бетонах высокие доли шлака могут снижать прочность без дополнительного уплотнения, тогда как в жестких дорожных бетонах полная замена заполнителя иногда обеспечивает превосходство над контролем по прочности на сжатие [11, 12]. Важным аспектом является пористость зерен: высокое водопоглощение необработанного шлака может негативно сказываться на морозостойкости, что требует либо ограничения дозировки, либо предварительной обработки [13].

Гранулированный доменный шлак как вяжущий компонент эффективно работает при заменах цемента до 30-40%, обеспечивая равнопрочность или превышение показателей контроля в средние и поздние сроки твердения [14, 15]. Более высокие степени замены (50-70%) целесообразны для специальных задач: повышения сульфатостойкости, снижения тепловыделения или улучшения электрохимических характеристик, хотя ранняя прочность при этом снижается [16, 17]. Эффективность высоких дозировок возрастает в тройных системах с микрокремнеземом или известняковым наполнителем, где компоненты синергетически дополняют друг друга [18].

В основаниях дорог и стабилизации грунтов шлак демонстрирует высокие значения Калифорнийского коэффициента несущей способности) CBR (до 153% для выветренного шлака) [19]. Однако высокий CBR не гарантирует стойкости к истиранию; некоторые шлаки имеют

потерю массы в полочном барабане выше нормативных пределов [20]. Это подчеркивает необходимость комплексной оценки, включающей испытания на динамические нагрузки и влагостойкость. Применение гранулированного доменного в составе геополимерных вяжущих для укрепления оснований позволяет сократить расход цемента на 80% и более при сохранении требуемой прочности [21].

В асфальтобетонах отвалный доменный шлак заменяет щебень, а гранулированный доменный шлак заменяет минеральный порошок. Обработка поверхности шлака цементной пастой или использование избирательно дробленых зерен позволяет решить проблему высокого водопоглощения и повысить устойчивость к влаге и колееобразованию [22, 23]. В качестве наполнителя гранулированный доменный шлак показывает оптимальные результаты при дозировках около 3% от массы смеси, улучшая усталостную долговечность и стабильность по Маршаллу [24]. Особый интерес представляют холодные органоминеральные смеси, где гранулированный доменный шлак активируется щелочными растворами, обеспечивая раннюю прочность, сопоставимую с горячими смесями [25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа представляет собой систематический обзор литературы за период с 2000 по 2026 гг. Поиск осуществлялся в базах данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect и eLIBRARY.RU по таким ключевым словам как «blast furnace slag», «pavement», «asphalt concrete», «cementitious composites». Из 1120 найденных записей после скрининга и проверки полнотекстовых версий было отобрано 80 релевантных публикаций, содержащих экспериментальные данные.

Для настоящего обзора были выбраны 25 наиболее репрезентативных источников. Анализ проводился по четырем направлениям: шлак в цементном бетоне, в качестве вяжущего, в основаниях дорог и в асфальтобетоне.

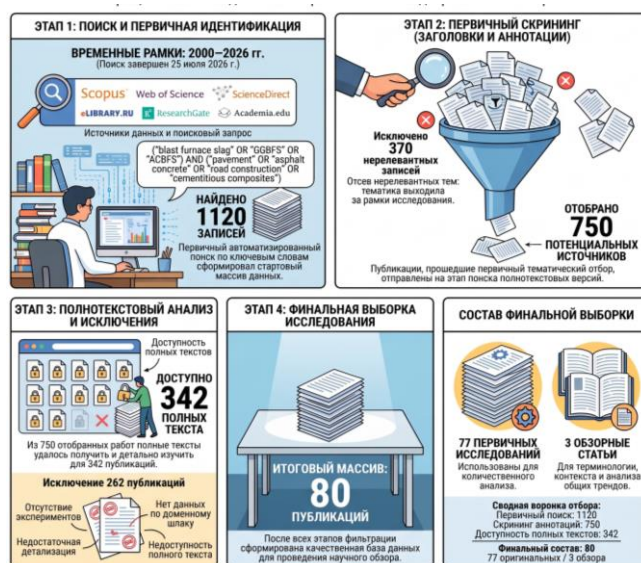


Рисунок 5 - Схема процесса поиска и отбора литературы

Сравнительная оценка выполнялась с учетом типа шлака, базы расчета дозировки и методов предварительной обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шлак как заполнитель в цементном бетоне.

Анализ данных подтверждает, что реакция бетона на введение шлакового заполнителя носит нелинейный характер. При замене мелкого заполнителя на гранулированный доменный шлак оптимальным часто оказывается уровень 20-30%, при котором наблюдается рост прочности и морозостойкости [10, 12]. Превышение данного порога может приводить к увеличению капиллярной пористости и снижению долговечности. Для крупного заполнителя ситуация сложнее: пористая структура зерен требует тщательного подбора состава смеси. Исследования [9] показали, что 30% замена обеспечивает пик прочности, тогда как в других работах [11] даже 100% замена давала удовлетворительные результаты, но только при условии качественного уплотнения. Критическим фактором является межфазная граница: наличие реакционноспособной пленки на поверхности шлака может улучшать сцепление с цементным камнем, но избыточная пористость создает зоны слабости.

Предварительная обработка как ключевой фактор качества.

Традиционный подход «замены без модификации» исчерпывает себя. Новые данные свидетельствуют о высокой эффективности

обогащения отвального доменного шлака. Избирательное дробление в шаровой мельнице (30-40 мин) позволило снизить водопоглощение с 4,96% до 2,38%, а показатель дробимости с 30,98% до 18,40% [23]. Гидрофобизация дополнительно снижает водопоглощение до ~1%, что открывает возможность использования шлака в зонах переменного увлажнения и замораживания.

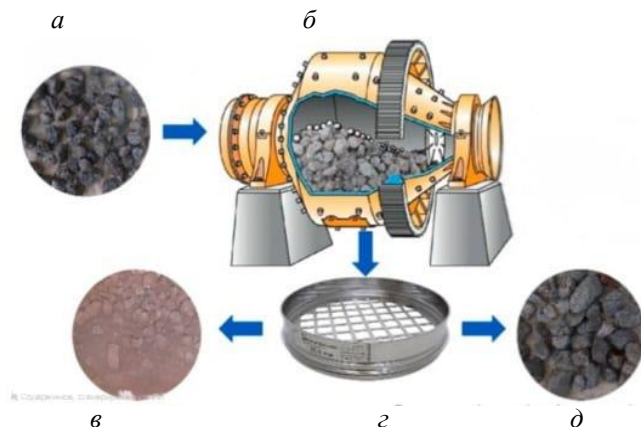


Рисунок 6 – Избирательное дробление доменного шлака: а) доменный шлак до обогащения; б) погружение доменного шлака в шаровую мельницу для избирательного дробления; в) высокопористые частицы (разрушенные избирательным дроблением); г) сито для просеивания; д) низкопористые частицы.

Важно отметить, что улучшение свойств на уровне агрегата должно транслироваться в свойства композита, что требует дальнейших исследований.

Вязущие системы и асфальтобетоны.

Использование гранулированного доменного шлака в качестве вяжущего позволяет существенно снизить углеродный след. В тройных системах (цемент-шлак-микрокремнезем) достигается высокая долговечность и стойкость к хлоридам даже при значительном снижении содержания клинкера [18]. В асфальтобетонах применение гранулированного доменного шлака вместо традиционного минерального порошка (особенно в холодных смесях с щелочной активацией) дает кратный рост модуля упругости и снижение колейности [25]. Однако в горячих смесях избыток

тонкодисперсного шлака (>5%) может ухудшить реологические свойства, поэтому оптимум обычно лежит в районе 3% [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доменный шлак является перспективным, но сложным материалом для дорожного строительства. Его нельзя рассматривать как прямую замену природному сырью без учета специфики формирования структуры. Основные выводы:

1. Функциональное разделение отвального доменного шлака и гранулированного доменного шлака (вяжущее/наполнитель) обязательно.

2. Понятие «оптимальной дозировки» условно и должно привязываться к конкретному типу шлака и целевой характеристике материала.

3. Методы предобработки (избирательное дробление, гидрофобизация) являются необходимым условием для расширения областей применения отвального доменного шлака в ответственных конструкциях.

4. Будущие исследования должны быть направлены на изучение долгосрочной долговечности композитов с модифицированным шлаком и разработку комплексных технологий совместной оптимизации заполнителя и вяжущей матрицы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Оспанова А.З.: сбор и анализ литературы, визуализация, написание черновика; Кунаев В.А.: концептуализация, методология, научное руководство; Fathi M.S.: формальный анализ, проверка данных; Кенжалиев О.Б.: концептуализация, администрирование; Fathi M.S.: рецензирование и редактирование. Все авторы одобрили финальную версию рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет грантового финансирования Комитета науки МНВО РК (грант № AP22786668).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Liu Z., Feng T., Zhu X., et al. Bird's-eye view of recycled solid wastes in road engineering // Journal of Road Engineering. – 2024. – Vol. 4(2). – P. 93-150.
- [2] Ulyeva G.A., Tuyshan K., Matsugina E.M., et al. Actual progress of production waste disposal problems // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2025. – Vol. 68(2). – P. 131-138.
- [3] Silva L.H.P., Nehring V., Paiva F.F.G., et al. Use of blast furnace slag in cementitious materials for pavements: Systematic literature review and eco-efficiency // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2023. – Vol. 33. – Art. 101030.

- [4] Zhuang S., Zhang L., Cao J., et al. Synergistic utilization of high-volume magnesium slag and blast furnace slag in sustainable ternary binders // *Construction and Building Materials*. – 2026. – Vol. 539. – Art. 147469.
- [5] Yasipourtehrani S., Strezov V., Bliznyukov S., Evans T. Investigation of thermal properties of blast furnace slag to improve process energy efficiency // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 149. – P. 137-145.
- [6] Ren Q., Qi W., Zhao Q., et al. Preparation and characterization of low-carbon cementitious materials based on soda-residue-activated ground granulated blast-furnace slag // *Metals*. – 2023. – Vol. 13(4). – Art. 694.
- [7] Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W.K., et al. Comparison of technical and short-term environmental characteristics of weathered and fresh blast furnace slag aggregates for road base applications in South Africa // *Case Studies in Construction Materials*. – 2019. – Vol. 11. – Art. e00239.
- [8] Lee J., Lee T. Durability and engineering performance evaluation of CaO content and ratio of binary blended concrete containing ground granulated blast-furnace slag // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10(7). – Art. 2504.
- [9] Kanniyappan S.P., Saravanakumar S. Use of air cooled blast furnace slag as a sustainable material in cement concrete // *International Journal of Innovative Research & Studies*. – 2018. – Vol. 8. – P. 545-558.
- [10] Yüksel I., Bilir T., Özkan Ö. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate // *Building and Environment*. – 2007. – Vol. 42(7). – P. 2651-2659.
- [11] Vadhera K., Berwal P. Behavior of blast furnace slag in rigid pavement (compressive and splitting tensile strength) // *International Journal of Current Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 7(4). – P. 1490-1495.
- [12] Pawar V.S., Kundlik A., Fatkal G., Kori S. Experimental investigation of granulated blast furnace slag as fine aggregate in concrete // *IRJET*. – 2022. – Vol. 9(5). – P. 302-305.
- [13] Nicula L.M., Corbu O., Ardelean I., et al. Freeze–thaw effect on road concrete containing blast furnace slag: NMR relaxometry investigations // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(12). – Art. 3288.
- [14] Deboucha W., Benchaa M., Mouli M., Khadraoui A. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 108. – P. 254-261.
- [15] Familusi A.O., Adewumi B.E., Oladipo F.I., et al. Effects of blast furnace slag as a partial replacement for cement in concrete // *9th Int. Conf. on Sciences, Engineering and Environmental Technology*. – Nigeria, 2017.
- [16] Lübeck A., Gastaldini A.L.G., Barin D.S., Siqueira H.C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag // *Cement & Concrete Composites*. – 2012. – Vol. 34(3). – P. 392-399.
- [17] Divsholi B.S., Lim T.Y.D., Teng S. Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2014. – Vol. 8. – P. 157-164.
- [18] Bleszynski R., Matthews J.D., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag // *ACI Materials Journal*. – 2002. – Vol. 99(5). – P. 499-508.
- [19] Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W.K., et al. Comparison of technical and short-term environmental characteristics of weathered and fresh blast furnace slag aggregates for road base applications // *Case Studies in Construction Materials*. – 2019. – Vol. 11. – Art. e00239.
- [20] Rondón H., Fernández W., Patiño D., et al. Characterization of blast furnace slag for road projects // *Revista Ingeniería de Construcción*. – 2018. – Vol. 33(1). – P. 83-92.
- [21] Lang L., Zhu M., Pu S. Recycling engineering sediment waste as sustainable subgrade material using ground granulated blast-furnace slag, electrolytic manganese residue and cement // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – Vol. 37. – Art. 103969.
- [22] Rondón-Quintana H.A., Ruge-Cárdenas J.C., Bastidas-Martínez J.G. Evaluation of hot-mix asphalt containing Portland cement treated blast furnace slag // *Archives of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 65(2). – P. 193-207.
- [23] Kunaev V., Akhmetova G., Zhautikov B., et al. Enhancing physical-mechanical properties of coarse slag aggregate via selective crushing for asphalt concrete // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 26. – Art. 105368.
- [24] Chegenizadeh A., Hanson S.W., Nikraz H., Scott Kress C. Effects of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Used as Filler in Dense Graded Asphalt // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12(6). – Art. 2769.
- [25] Dulaimi A., Al Busaltan S., Mydin M.A.O., et al. Innovative geopolymer-based cold asphalt emulsion mixture as eco-friendly material // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Art. 17380.