

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОПЛИВНОГО ШЛАКА ТЭЦ

А.А. Лунёв
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В мировой практике последних десятилетий стало нормой использование отходов теплоэнергетики в строительной отрасли. В основном золошлаки применяют при строительстве автомобильных дорог как материал для отсыпки земляного полотна или в виде укрепленного вяжущим материала, в промышленно-гражданском строительстве как материал для выполнения планировочных работ, при засыпке неудобий и карьеров. Однако потенциал его возможного применения намного шире.

Крупнозернистые шлаковые отложения, формирующиеся в зоне шлакового размыва, имеют больший потенциал применения, чем прочие ЗШС, однако менее изучены как отечественными, так и зарубежными исследователями. В статье рассматривается вопрос использования крупнозернистых золошлаковых смесей (ЗШС), образованных на электростанциях с котлами, подразумевающими жидкое шлакоудаление, для сооружения оснований дорожных одежд с позиции её механических свойств.

Материалы и методы. В рамках исследования изучены образцы шлакового щебня с Новосибирской ТЭЦ-2, работающей на угле Кузнецкого угольного бассейна (жидкое шлакоудаление), и Новосибирской ТЭЦ-3, работающей на угле Канско-Ачинского угольного бассейна (жидкое шлакоудаление). Определены потери при дробимости отдельных фракций исследованных материалов в сухом и насыщенном водой состоянии. Проведен анализ графиков разрушения для определения модуля общей деформации шлакового щебня.

Результаты. Найдено различие в механической прочности проб материала разного генезиса. Определены значения дробимости исследуемых материалов. Оценены полученные при проведении испытаний графики, на основе которых вычислены характеристики деформируемости этого материала (при разной крупности).

Обсуждение и заключение. Определены возможные направления использования изученных материалов при строительстве автомобильных дорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, дорожная одежда, золошлаковые смеси, шлаковый щебень, дробимость, модуль деформации.

Поступила 20.08.2019, принята к публикации 17.12.2019.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. Исследования выполнены за счет средств фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (ГРАНТ «УМНИК» № 12396ГУ/2017).

Для цитирования: Лунёв А.А. Исследование механической прочности топливного шлака ТЭЦ. Вестник СибАДИ. 2019;16(6): 746–757. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757>

© Лунёв А.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757>

MECHANICAL STRENGTH'S RESEARCH OF THE THERMAL POWER STATION'S SLAG

Aleksander A. Lunev

Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The use of the thermal power station's (TPS) waste in the construction industry becomes the norm in world practice of recent decades. Basically, the researches use ash and slag in the construction of automobile roads as a material for filling the subgrade or in the form of a cement-bound material in industrial and civil construction as a material for planning work, when filling inconveniences and quarries. However, the potential of the ash and slag's usage is much wider.

Coarse-grained slag deposits that form in the zone of slag erosion have a greater potential for application than other ash and slag mixtures, however, these mixtures have been less studied by both domestic and foreign researchers. The paper discusses the use of the boiler slag formed at power plants with boilers involving liquid slag removal for the construction of road pavement bases with the position of its mechanical properties.

Materials and methods. The author studied samples of boiler slag from Novosibirsk TPS-2, operating (Kuznetsk coal basin) and Novosibirsk TPS-3 (Kansko-Achinsk coal basin). Moreover, the author determined the crushing losses of individual fractions of the investigated materials in a dry and water-saturated state. The author determined the modulus of deformation of boiler slag.

Results. The researcher found the difference in mechanical strength of the different genesis material. The crushing values of the investigated materials are determined. The author estimated the graphs obtained during testing and calculated the deformability characteristics of the material.

Discussion and conclusions. The author determines possible directions of the studied materials' usage in the road construction.

KEYWORDS: building, road construction, road base, ash and slag mixtures, boiler slag, crushability, modulus of elasticity.

Submitted 20.08.2019, revised 17.12.2019.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS. The researches were carried out at the expense of the Fund for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (grant "UMNIK", No. 12396GU / 2017).

For citation: Lunev Aleksander A. Mechanical strength's research of the thermal power station's slag. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 746–757 (in Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-746-757>

© Lunev A.A.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что в мире повсеместно внедряются альтернативные источники энергии, одним из основных мировых источников является ископаемый уголь¹. По прогнозам специалистов, в ближайшие десятилетия уголь останется основным энергетическим ресурсом.

Однако при сжигании угля для производства тепло- и электроэнергии образуется от 10 до 50% отходов теплогенерации – золошлаковых отходов. Ежегодно только в России образуется около 23–24 млн тонн отходов тепловых электростанций, работающих на ископаемых углях. По оценкам специалистов, в РФ утилизируется только 8–10% (в некоторых странах до 100%) от ежегодного выхода ЗШО, большая же часть размещается на специализированных гидротехнических сооружениях – золоотвалах [1].

Помимо накопления огромного количества отходов, захоронение ЗШО имеет ряд серьезных недостатков: поверхность отвала в летний период периодически подвергается пылеуносу, в силу чего загрязняются окрестные территории и жилые дома; золоотвалы занимают огромные площади потенциально пригодных территорий; существующая технология хранения ЗШО вызывает высокий риск техногенных аварий (обрушения дамб), приводящих к катастрофическим последствиям [2, 3, 4] (несмотря на экологическую безопасность этого материала, подтвержденную многими исследованиями) [5, 6].

По этим причинам во многих странах идет активное внедрение технологий утилизации золошлаковых смесей в областях от мелиорации сельхозугодий до извлечения редкоземельных элементов [7, 8, 9, 10, 11]. Огромный пласт исследований посвящен использованию золошлаков в строительстве, причем наибольший интерес вызывает именно отрасль дорожного строительства [12, 13, 14, 15].

Наиболее активная работа в этой сфере шла в СССР и США в 70–80-е годы прошлого столетия. В США в период с 1971 по 1993 год построено 23 объекта транспортной инфраструктуры в 13 штатах. Однако фундаментальных и системных исследований свойств этих материалов практически не проводилось

в силу эмпирического уклона, методов проектирования дорожных сооружений в штатах².

На сегодняшний день наиболее широко золошлаки используют в Индии. Строятся уникальные объекты, используются миллионы тонн материалов каждый год. Индийские ученые выполняют множество исследований по определению параметров механических свойств ЗШС, изучению нестандартных конструкций и грунтовых комбинаций на основе ЗШС [16, 17, 18, 19, 20]. Несмотря на огромный ряд выполненных исследований, до сих пор не были проанализированы механические свойства крупных шлаковых частиц.

Крупные шлаковые частицы обладают более высокими коэффициентами фильтрации, пониженным значением или отсутствием морозного пучения, а также более стабильными механическими характеристиками при увлажнении (за счет отсутствия растворимых веществ). Рассмотрение крупнозернистых смесей отдельно от прочих ЗШС вызвано еще и тем, что при транспортировке золошлаковых отходов на золоотвал происходит их сегрегация. Более плотные и крупные частицы осаждаются вблизи выхода пульпы, а мелкие уносятся русловыми потоками [21].

Подобное расслоение наиболее характерно для отвалов электростанций с котлами, оборудованными системами жидкого шлакоудаления. Гранулированный шлак, образованный в таких системах, существенно крупнее, чем пористый шлак, образованный в системах с сухим золошлакоудалением, поэтому зона шлакового размыва сложена преимущественно шлаковым щебнем и песком (содержание шлакового щебня и песка в исследованных смесях достигало 95% по массе).

Кроме того, механизм распределения напряжений в крупнозернистых и мелкозернистых системах существенно отличается. Если мелкозернистые смеси можно рассматривать как квазисплошную среду с равномерным распределением контактных напряжений, то в крупнозернистых смесях передача нагрузок существенно отличается.

Проведенные Сантамарина [22], Берингером [23], Кларком [24], Танагата [25] исследования показывают, что распределение напряжений кардинальным образом зависит от крупности частиц.

¹ Key World Energy Statistics: International energy agency. [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> (дата обращения: 01.08.2019).

² User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. [Электронный ресурс] URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm> (дата обращения: 28.06.2019).

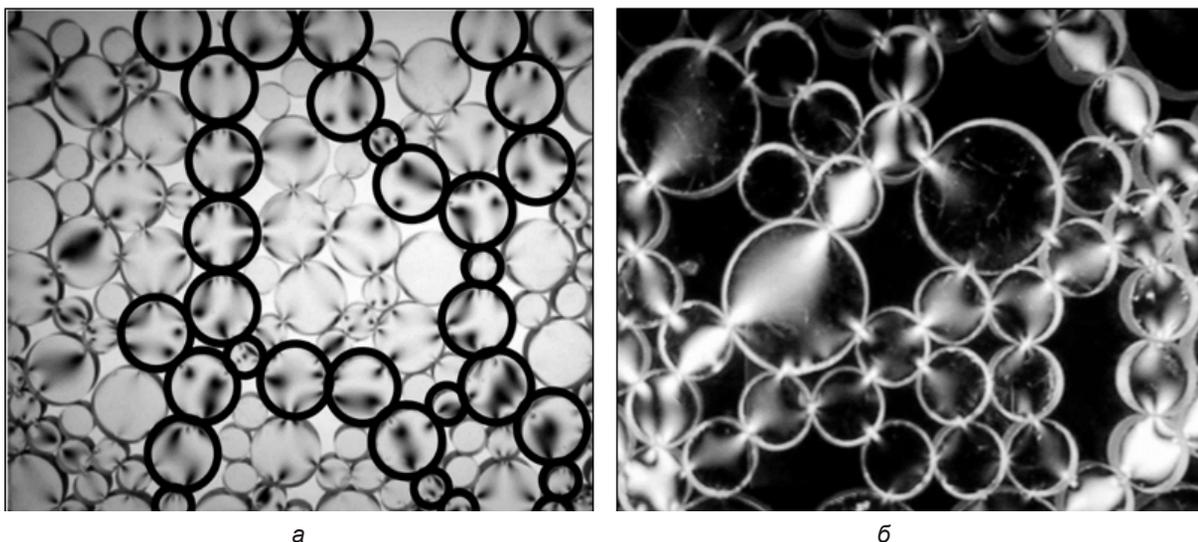


Рисунок 1 – Цепочки напряжений в нагруженных фотоупругих дисках, проявленные при просвечивании в поляризованном свете: а – в массиве из мелких частиц; б – в массиве из более крупных, разноразмерных частиц

Figure 1 – Tension chains in loaded photoelastic disks during transmission in polarized light: а – in an array of small particles; б – in an array of larger, different-sized particles

Крупнозернистые смеси имеют весьма малое число точек контактов, а также более активно создают арочные конструкции. При этом видно, что часть элементов воспринимает наибольшую нагрузку, а некоторые вообще не испытывают давления (рисунок 1).

При концентрации напряжений в точке контакта происходит разрушение частицы, что вызывает перераспределение частиц, сопряженное с осадкой конструкции. По этой причине, при изучении пригодности крупнозернистых ЗШС, на первый план выходит не изучение их прочностных и деформационных свойств, а оценка сопротивляемости к разрушению под действием механических нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Сибирском Федеральном округе наиболее распространены золошлаковые смеси от сжигания Экибастузских, Кузнецких и Канско-Ачинских углей. Котлами с системой жидкого шлакоудаления в основном оборудованы ТЭС, работающие на Кузнецких и Канско-Ачинских углях. Поэтому для исследования отбирались образцы материала из зоны шлакового размыва отвалов двух электростанций:

- Новосибирской ТЭЦ-2, работающей на угле Кузнецкого угольного бассейна;
- Новосибирской ТЭЦ-3, работающей на угле Канско-Ачинского угольного бассейна (рисунок 2).



Рисунок 2 – Места отбора проб золошлаковых материалов: а – золоотвал Новосибирской ТЭЦ-2; б – золоотвал Новосибирской ТЭЦ-3

Figure 2 - Sampling sites for ash and slag materials а – ash dump of Novosibirsk TPS-2; б – ash dump of Novosibirsk TPS-3

Исследования, проведенные [26, 27], указывают на зависимость между химическим составом (генезисом) и механическими свойствами мелкозернистых золошлаковых смесей, что вероятно оказывает аналогичное влияние и на свойства крупных частиц. Поэтому средний химический состав этих смесей приведен в таблице 1.

Оценка гранулометрического состава образцов, отобранных на этих отвалах, показала, что до 65% материала являются шлаковым щебнем, а до 50% относятся к шлаковым пескам.

Испытания на дробимость выполнялись согласно ГОСТ 8269.0–97 путем определения степени разрушения зерен при сжатии (раздавливании) в цилиндре. Перед испытанием пробы золошлаковых материалов подготавливались в лаборатории.

Отобранные пробы ЗШС высушивали до воздушно-сухого состояния, отсеивали на стандартные фракции щебня (размером 5–10, 10–20, 20–40 мм) путем просеивания материала на соответствующих ситах. Аналитические пробы для испытания в насыщенном состоянии выдерживали в воде в течение 2 ч, а для испытаний в сухом состоянии высушивались до постоянной массы.

В связи с ограниченным количеством материала для исследований, определение дробимости проводилось для фракций 5–10 и 10–20 в цилиндре диаметром 75 мм, а для фракции 20–40 в цилиндре диаметром 150 мм. Испытания в цилиндре диаметром 75 мм проводились в автоматизированном прессе ИП 5081-5, а в цилиндре диаметром 150 мм в гидравлическом прессе. Фотография в процессе испытаний представлена на рисунке 3, а.

В ходе исследования скорость нагружения составляла 1,5 кН в секунду. Максимальная нагрузка для испытаний в цилиндре диаметром 75 мм составляла 50 кН, при испытании в цилиндре диаметром 150 мм – 200 кН.

Проведение экспериментальных исследований сопровождалось видео- и аудио записью, что позволило дифференцировать стадии эксперимента в зависимости от интенсивности дробления частиц.

После сжатия пробу высыпали из цилиндра и взвешивали, а далее отправляли на контрольное сито для просева. Материал, задержанный на контрольном сите, также взвешивался. Фотография в процессе испытаний представлена на рисунке 3, б.

Для каждой фракции исследуемого материала было проведено три испытания в сухом состоянии и два в насыщенном водой состоянии. По результатам испытаний определялась дробимость смеси фракций, представленных в пробах, отобранных с золоотвала.

При подготовке определялось и количество зерен лещадной (игловидной) формы.

Из лабораторных проб отбирали аналитические пробы массой 250 г для фракции 5–10 мм, 1000 г для фракции 10–20 мм и 5000 г для фракции 20–40 мм. Из взвешенной пробы отбирались зерна, толщина которых меньше длины в три раза и более.

В связи с использованием при определении дробимости оборудования, оснащенного датчиками перемещений, по построенным в ходе опыта графикам были определены значения модулей деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В опытах исследовались два вида шлакового щебня: образованного от сжигания Куз-

Таблица 1
Средний химический состав исследованных золошлаковых смесей

Table 1
Average chemical composition of the investigated ash and slag mixtures

Вид материала сжигаемого угля	Химический состав, в % по массе								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Кузнецкий	50–64	18–30	4–15	2–10	0,5–2,5	1,3–2,4	0,5–1,3	0,3–2,2	3–22
Канско-Ачинский (Бород)	40–55	4–10	6–14	20–35	3–6	0,3–1,5	0,2–0,5	0,9–5	2

Примечание. п.п.п. – потеря массы при прокаливании (содержание горючих веществ).



а

б

Рисунок 3 – Процесс проведения испытаний в цилиндре диаметром 75 мм:
а – шлаковый щебень, сжатый в цилиндре; б – просеивание раздавленного образца на контрольном сите

Figure 3 – Process of testing in a cylinder with a diameter of 75 mm:
а – boiler slag, compressed in the cylinder; б – sieving of the crushed sample on a control sieve

нецкого (более пористого) и Канско-Ачинского (гладкого остеклованного) угля. В отличие от мелкозернистых ЗШС внутренняя часть агрегата не имеет внутренних пор, поэтому разница в структуре сводится в основном к форме поверхности. Внешний вид исследуемого материала представлен на рисунке 4.

В ходе исследований были проанализированы по три пробы каждой фракции материала в сухом состоянии и по три в насыщенном водой, для каждого типа материала. Результаты исследований приведены на графике рисунка 5.

Из графика видно, что дробимость частиц шлакового щебня растет с ростом крупности агрегатов независимо от типа материала. Это вызвано, по всей видимости, тем, что

при увеличении крупности зерен уменьшается число контактов, которое ведет к повышению контактных напряжений (как и в опытах *R. Beringher* и *Santamarina*), что и вызывает разрушение частиц.

Изменение влажности не оказало существенного влияния на механическую прочность образцов за исключением незначительного влияния воды в образце ЗШС фракции 5–10 мм от сжигания Канско-Ачинского угля. Предположительно это связано с тем, что для относительно мелких частиц с остеклованной поверхностью водные пленки в точках контакта сыграли роль смазки, что вызвало скольжение некоторых частиц, увеличило напряжения в плотно зажатых агрегатах и вызвало их разрушение.



а

б

Рисунок 4 – Образцы исследуемого материала:
а – щебень от сжигания Кузнецкого угля; б – щебень от сжигания Канско-Ачинского угля

Figure 4 – Samples of the studied material:
а – crushed stone from the burning of the Kuznetsk coal; б – crushed stone from the burning of the Kansk-Achinsk coal

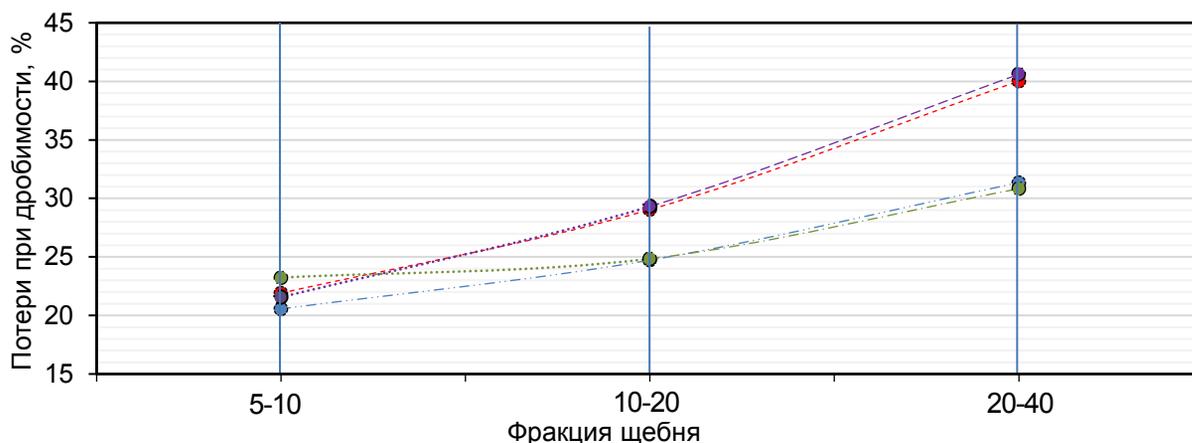


Рисунок 5 – График изменения дробимости по фракциям: шлаковый щебень от сжигания Канско-Ачинского угля: ● – сухого; ● – насыщенного; шлаковый щебень от сжигания Кузнецкого угля: ● – сухого; ● – насыщенного

Figure 5 – Graph of changes in fractionability: crushed stone from burning Kansk-Achinsk coal: ● – dry; ● – saturated; crushed stone from burning Kuznetsk coal: ● – dry; ● – saturated

На основе полученных значений и положений ГОСТ 3344–83 также была ориентировочно определена марка по дробимости исследованных образцов ЗШС. Поскольку в нормативной документации не проводится критериев для присвоения марки по прочности щебню из угольного шлака, за аналог были взяты шлаки черной металлургии (таблица 2).

Во всех исследованных пробах отсутствовало значимое количество пластинчатых или игольчатых частиц. Причина этому – механизм грануляции расплава, при котором агрегация частиц проходит в водной среде. Расплав стремится принять форму, максимально близкую сферической, но из-за высокой вязкости и интенсивного охлаждения принимает угловатую форму. За счет большей температуры плавления ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеет больше раковин.

Анализ графиков и звуковых дорожек съемки эксперимента, полученных в ходе сжа-

тия образцов, показывает разделение процесса деформирования на три стадии: упругое деформирование (почти полное отсутствие разрушения частиц), интенсивное дробление (повышение скорости осадки штампа, измельчение по меньшей мере трех частиц каждую секунду) и затухание дробления, т.е. снижение частоты разрушений и уменьшение скорости осадки штампа несмотря на повышение уровня напряжений (рисунок 6).

Поскольку в упругой стадии не было отмечено систематических разрушений частиц, по всей видимости, осадки штампа вызваны деформациями частиц и их переупаковкой. Эта стадия характеризовалась максимальным уровнем напряжений 450–2200 кПа (в зависимости от крупности частиц и генезиса золошлакового материала), что значительно выше, чем транспортные нагрузки на основании дорожных одежд.

Таблица 2
Результаты определения дробимости

Table 2
Results of the crushability determination

Тип угля Размер частиц, мм	Марка по прочности по ГОСТ 3344–83	
	Канско-Ачинский	Кузнецкий
5–10	1000	1000
10–20	800	800
20–40	800	600

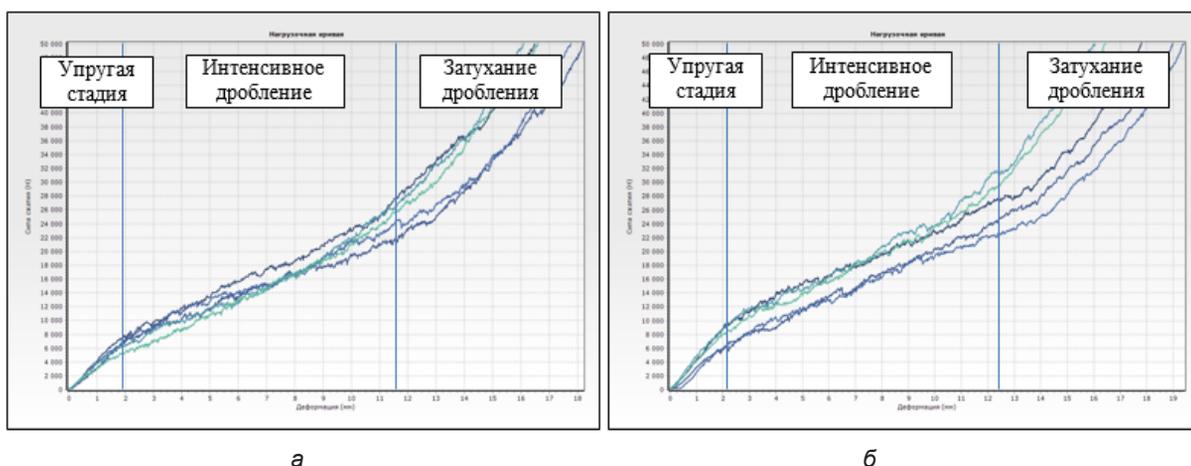


Рисунок 6 – Графики испытаний образцов шлакового щебня:
а – щебень от сжигания Кузнецкого угля; б – щебень от сжигания Канско-Ачинского угля

Figure 6 – Graphs of the slag crushed stone's tests:
а – crushed stone from the burning of the Kuznetsk coal; б – crushed stone from the burning of the Kansk-Achinsk coal

Интенсивное дробление шлакового щебня связано с повышением уровня напряжений в форме до уровня 3300–7250 кПа (при этом уровне начинается переход в стадию затухания дробления). Стадии разрушения и затухания разрушений происходят при напряжениях значительно выше возникающих в основаниях дорожных конструкций, поэтому менее интересны для дальнейшего анализа.

В упругой стадии исследования не отмечалось разрушений частиц, уровень напряжений в форме прибора при испытаниях был сопоставим с напряжениями от транспортных нагрузок, а сама схема испытаний являлась неким аналогом компрессионного прибора. Поэтому с некоторыми допущениями, по графикам деформации от нагрузки, можно определить деформационные характеристики ЗШС.

С точки зрения применения этого материала в дорожных конструкциях (основания

дорожной одежды, дополнительные слои основания) к таким характеристикам можно отнести модуль упругости и модуль деформации. Модуль деформации (одометрический) может быть определен непосредственно из графика. Модуль упругости будет равен ему при допущении, что все деформации в упругой стадии исследования были обратимы (отсутствие звуков разрушения может указывать на это). Приближенные модули деформации, определенные путем анализа графиков, приведены в таблице 3.

Как и в опытах других авторов [28, 29, 30, 31], отмечено влияние влажности на способность золошлакового материала деформироваться, причем, как и в работах [30, 31], влияние влажности снижает деформационные параметры.

Таблица 3
Результаты определения модулей деформации (упругой стадии)

Table 3
Determination results of the deformation modulus (elastic stage)

Тип угля Размер частиц, мм	Модуль деформации, МПа	
	Канско-Ачинский	Кузнецкий
5–10	45/37	45/33
10–20	34/22	22/11
20–40	27/14	17/9

Примечание. Значения под чертой соответствуют водонасыщенному золошлаковому материалу.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая дробимость крупных фракций связана с тем, что количество точек контакта в них меньше, а значит, контактные напряжения выше. Поэтому при равных нагрузках критическая длина трещин Гриффитса в крупных фракциях меньше, а поскольку размер естественных трещин в частицах имеет сопоставимый размер, разрушение идет быстрее.

Механизм развития трещин также объясняет, почему частицы ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеют меньшую прочность. Наличие больших неровностей, раковин, чем в образцах Канско-Ачинской ЗШС, требует меньшего уровня напряжений для того, чтобы размер дефекта стал больше критической величины. Этим обусловлены большие разрушения при равном уровне напряжений.

Развитие трещины идет в стеклоподобной частице ЗШС со скоростью, меньшей скорости звука, в то время как волны напряжений распространяются в частице со скоростью звука, отражаясь от существующих и новообразованных поверхностей. Поэтому помимо развития основной трещины происходит образование множественных побочных трещин, что объясняет в целом высокую дробимость материала и появление мелкодисперсных частиц в ходе испытания.

Влияние воды почти не сказалось на дробимости частиц, поскольку в составе шлакового щебня не обнаружено растворимых соединений. Повышение дробимости фракции 5–10 от сжигания Канско-Ачинского угля при увлажнении предположительно связано с тем, что для относительно мелких частиц с остеклованной поверхностью водные пленки в точках контакта сыграли роль смазки, что вызвало скольжение частиц и разрушение плотно заземленных агрегатов в процессе перестройки структуры.

Влияние химического состава частиц от сжигания разного угля также может играть роль. Менее плотные Кузнецкие ЗШС имеют более высокую дробимость, однако не ясно, играет ли решающую роль структура или химический состав ЗШС.

Во всех исследованных пробах отсутствовало значимое количество пластинчатых или игольчатых частиц. Причина – механизм грануляции расплава, при котором агрегация частиц проходит в водной среде. Расплав стремится принять форму, максимально близкую сферической, но из-за высокой вязкости и интенсивного охлаждения принимает угловатую

форму. Причем за счет большей температуры плавления ЗШС от сжигания Кузнецкого угля имеет больше раковин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки дробимости и модуля деформации (неуплотненного) материала показывают, что шлаковый щебень, полученный от сжигания Канско-Ачинских и Кузнецких углей, может быть использован (с позиции механической прочности) в качестве:

- материала земляного полотна или вертикальной планировки;
- материала дополнительных слоев основания дорожных одежд.

Результаты определения механической прочности исследованных топливных шлаков, полученных от сжигания Канско-Ачинских и Кузнецких углей, указывают на необходимость дополнительных исследований, для установления их пригодности в качестве:

- материала основания дорожных одежд, укрепленного органически или минеральным вяжущим;
- компонента бетонных смесей.

Поскольку эти направления потенциально могут оказаться эффективным способом утилизации данных побочных продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологий // Вестник СибАДИ. 2017; (6(58)): 119–125. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-119-125](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-119-125).
2. Bartov G., Deonarine A., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes // Environmental Science & Technology. Washington, D.C., 2012. Vol. 47(4). Pp. 2092–2099. DOI: 10.1021/es303111p.
3. Deonarine A., Bartov G., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments // Environmental Science & Technology. Washington, D.C., 2012. Vol. 47(4). Pp. 2100–2108. DOI: 10.1021/es303639d.
4. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., et.al. Article. Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River // BIOS journal. 2017. Vol. 88(2). Pp. 72-85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1.
5. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P. V., Kozik V.V. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics // IOP Conf. Series:

Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 127. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024.

6. Lihach S. A., Kulesh R. N., Nikolaeva V. I., Orlova K.Y., Ilyasova A. S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 92. №. 01051. DOI: 10.1051/mateconf/20179201051.

7. Folgueras M.B. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements / M.B. Folgueras, M. Alonso, F.J. Fernández // Fuel. 2017. Vol. 192. Pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019.

8. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3. С. 17–24. DOI: 10.5862/MCE.47.2.

9. Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Сутурина Е.О., Бурдонова А.В., Головнина А.В. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 14–22.

10. Yao Z.T. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi // Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 141. Pp. 105–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>.

11. Лебедев М.С., Чулкова И.Л. Исследования реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №11. С. 47–52.

12. Толстой А.Д., Ковалева И.А., Новиков К.Ю. Совершенствование состава и свойств порошковых бетонов с техногенным сырьем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №2. С. 19–24.

13. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications // Procedia Environmental Sciences. 2016. Vol. 35. Pp. 681–691.

14. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1558–1562.

15. Сиротюк В.В., Лунёв А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // Автомобильные дороги. 2016. № 6(1015). С. 72–79.

16. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khurana S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // Resources Policy. 2016. Vol. 49. Pp. 334–348.

17. Mukherjee P.S. Vesmawala G. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013. Vol. 8. Issue 4. Pp 23–32.

18. Mathur A. K. Khandekar R. K. New segments in ash utilization- NTPC concern // Proc. on Indian Power Station Conference, 2008. Pp. 627–631.

19. Mathur A. K. Ash utilisation in NTPC // Proc. Workshop on fly ash utilisation: Issues and strategies. Bhopal, India. Bhopal Chapter. Pp. 41–45.

20. Shamshad A. Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure International // Research Journal of Environment Sciences. 2012. Vol. 1(4). Pp. 60–64.

21. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал, 2011. № 4. С. 16–21.

22. Santamarina J.C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces // Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, 2001. Pp. 1–32. DOI: [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2).

23. Behringer R. P. Jamming in granular materials // Comptes Rendus Physique. 2015. Vol. 16. Pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001.

24. Tadanaga T. Clark A., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force networks // Phys. Rev. 2018. Vol. E 97. № 012906. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906.

25. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114 №. 144502. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502>.

26. Indraratna, B., Nutalaya, P. and Koo, K.S. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill // Canadian Geotechnical journal. Vol. 28. Pp. 542–555.

27. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures // International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE. IACSIT Press, Singapore. Vol.8. Pp. 134–137.

28. Kim B. Prezzi M., Salgaro R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments // Journal of geotechnical and geo-environmental engineering. 2005. Vol. 131. Issue 7. Pp. 914-924.

29. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions // International Journal of Science and Research (IJSR). 2014. Vol.3. Issue 9. Pp. 1487–1494.

30. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 18. Pp. 3085–3106.

31. Gimhan P. G. S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material Engineer // Journal of the Institution of Engineers. Vol. 51. Pp. 49–57. DOI: 10.4038/engineer.v51i1.7287.

REFERENCES

1. Sirotyuk V.V., Trojan T.P. The carbon residuum influence on the ashes slag's quality used in the construction technology. *Vestnik SibADI*. 2017; (6(58)): 119–125. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-119-125](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-119-125) (in Russian).
2. Bartov G., Deonarine A., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 1. *Source Apportionment Using Mercury Stable Isotopes. Environmental Science & Technology*. Washington, D.C., 2012; 47(4): 2092–2099. DOI: 10.1021/es303111p.
3. Deonarine A., Bartov G., Johnson T.M., Ruhl L., Vengosh A., Hsu-Kim H. Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash Spill. 2. *Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments. Environmental Science & Technology*. Washington, D.C., 2012; 47(4): 2100–2108. DOI: 10.1021/es303639d.
4. Shin J., Natanson A., Khun J., Odorizzi N., et.al. Article. *Assessing the impact of coal ash exposure on soil microbes in the Dan River. BIOS journal*. 2017; 88(2):72–85. DOI: 10.1893/BIOS-D-16-00006.1.
5. Malchik A.G., Litovkin S.V., Rodionov P. V., Kozik V.V. Analyzing the Technology of Using Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants in the Production of Building Ceramics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 127. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012024.
6. Lihach S. A., Kulesh R. N., Nikolaeva V. I., Orlova K.Y., Ilyasova A. S. Power plant ash and slag waste management technological direction when Kansk-Achinsk brown coal is burned. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 92. No. 01051. DOI: 10.1051/mateconf/20179201051.
7. Folgueras M.B., Alonso M., Fernández F.J. Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements. *Fuel*. 2017; 192: 128–139. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.12.019.
8. Barahtenko V.V. Ocenka potrebitel'skikh karakteristik izdelij iz vysokonapolnennogo polimerno-mineral'nogo kompozitsionnogo materiala na osnove polivinilhlorida i othodov TES [Estimating consumer product characteristics of highly filled polymer-mineral composite material based on polyvinyl chloride and waste TPP]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 3: 17–24. DOI: 10.5862/MCE.47.2.
9. Burdonov A.E., Barahtenko V.V., Zelinskaya E.V., Suturina E.O., Burdonova A.V., Golovkina A.V. Fiziko-mekhanicheskie karakteristiki kompozitsionnykh materialov na osnove othodov proizvodstva s razlichnymi recepturami [Physical and mechanical properties of composite materials of different compositions based on waste products]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 9: 14–22. (in Russian).
10. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015; 141: 105–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016> (in Russian).
11. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Issledovaniya reologicheskikh svoystv bitumnykh kompozitsiy, napolnennykh zolami-unosa razlichnogo sostava [Study of rheological characteristics of bitumen composites with different fly ashes]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2016; 11: 47–52 (in Russian).
12. Tolstoj A.D., Kovaleva I.A., Novikov K.YU. Sovershenstvovanie sostava i svoystv poroshkovykh betonov s tekhnogennym syr'em [Improving the structure and properties of powdered concrete on technogenic raw materials]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2016; 2: 19–24.
13. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35: 681–691.
14. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1558–1562.
15. Sirotyuk V.V., Lunev A.A., Ivanov E.V. Zoloshlakovaya smes' dlya zemlyanogo polotna [Coal ash and slag for road embankments]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2016; 6: 72-79 (in Russian).
16. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khurana S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective. *Resources Policy*. 2016; 49: 334–348.
17. Mukherjee P.S., Vesmawala G. Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013; 8. Issue 4: 23–32.
18. Mathur A. K., Khandekar R. K. New segments in ash utilization- NTPC concern. *Proc. on Indian Power Station Conference*. 2008: 627–631.
19. Mathur A. K. Ash utilisation in NTPC. Proc. Workshop on fly ash utilisation: Issues and strategies. *Bhopal, India. Bhopal Chapter*: 41–45.
20. Shamsad A., Fulekar M.H., Bhawana P. Impact of Coal Based Thermal Power Plant on Environment and its Mitigation Measure International. *Research Journal of Environment Sciences*. 2012; 1(4): 60–64.
21. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Primenenie zol i zoloshlakovykh otkhodov'lstve [Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 4: 16-21 (in Russian).
22. Santamarina J.C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces. Proc. Symp. *Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd*, 2001: 1–32. DOI: [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2).
23. Behringer R. P. Jamming in granular materials. *Comptes Rendus Physique*. 2015; 16: 10–25. DOI: 10.1016/j.crhy.2015.02.001.
24. Tadanaga T., Clark A., Majmudar T., Kondic L. Granular response to impact: Topology of the force

networks. *Phys. Rev.* 2018; E 97. No 012906. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012906.

25. Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. *Phys. Rev. Lett.* 2015; 114 No. 144502. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502>.

26. Indraratna, B., Nutalaya, P. and Koo, K.S. Engineering Behaviour of a Low Carbon Pozzolan Fly Ash and its Potential as a Construction Fill. *Canadian Geotechnical journal*. Vol. 28: 542-555.

27. Marto A., Awang A.R., Makhtar A.M. Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin Coal Ash Mixtures. International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE. IACSIT Press, Singapore. Vol.8: 134–137.

28. Kim B. Prezzi M., Salgaro R. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2005; 131. Issue 7: 914-924.

29. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014;3. Issue 9: 1487–1494.

30. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 18: 3085-3106.

31. Gimhan P. G. S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material Engineer. *Journal of the Institution of Engineers*. Vol. 51: 49–57. DOI: 10.4038/engineer.v51i11.7287.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лунёв Александр Александрович (г. Омск, Россия) – аспирант кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksander A. Lunev – Postgraduate Student of the Roads and Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644008, Omsk, 5, Mira Av., e-mail: lunev.al.al@gmail.com).