

УДК 656

**ЗОЛОШЛАКИ И ЗОЛА-УНОСА В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ:
ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

Иванов С.А., заведующий кафедрой АДиГК, к.т.н., доцент
Кабанов Ю.Е., старший преподаватель кафедры АДиГК
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Проблема утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций стоит перед Россией уже несколько десятилетий. Ежегодно при сжигании твердого топлива образуется около 50 млн тонн золошлаковых смесей, а общий объем накопленных отходов сопоставим с площадью целых государств. Однако в последние годы эта проблема начала превращаться в возможность — золошлаки и зола-уноса все активнее применяются в строительстве автомобильных дорог, обеспечивая значительную экономию ресурсов и снижение нагрузки на окружающую среду [1-6].

Особенности в зависимости от типа золы

Высококальциевая зола (класс С) – образуется при сжигании бурых углей (например, канско-ачинских). Обладает самостоятельными вяжущими свойствами, способна твердеть при увлажнении и уплотнении. Может использоваться как основное вяжущее (без добавления цемента) для укрепления грунтов и устройства оснований.

Низкокальциевая зола (класс F) – продукт сжигания каменных углей. Не имеет гидравлической активности, требует активации известью, цементом или доменным шлаком. Используется как активная минеральная добавка, улучшающая зерновой состав и снижающая расход дорогих вяжущих.

При устройстве оснований дорожных одежд золу-уноса вводят в грунт совместно с цементом либо известью. Наиболее эффективные составы включают 4–15 % портландцемента и 8–19 % золы, что обеспечивает получение укрепленного грунта марки М40 — показателя, достаточного для капитальных и облегченных типов дорожных конструкций. Технологическая сложность заключается в том, что зола характеризуется повышенной потребностью в воде; поэтому влажность смеси необходимо выдерживать в узком диапазоне, иначе достичь требуемой плотности уплотнения не удастся.

Для обратной засыпки, сооружения насыпей и ликвидации оврагов применяют золошлаковые смеси, содержащие крупные фракции. Их отличительная особенность — малая плотность, что упрощает работы на слабых основаниях. При этом обязательным условием является послойная укладка с тщательным контролем влажности и уплотнением каждого слоя.

Золу-уноса можно использовать в качестве минерального порошка или его замены. Из-за высокой удельной поверхности золы требуется корректировка режима перемешивания, что в свою очередь может сказаться на расходе битумного вяжущего.

Зола-уноса отличается повышенной водопотребностью: для гидратации и получения плотной структуры ей нужно больше воды, чем традиционным материалам, что обязывает усилить контроль влажности в ходе работ. Ещё одна особенность — длительный набор прочности: рост прочностных показателей продолжается не только первые 28 суток, но и на протяжении нескольких месяцев (иногда до года) за счёт пуццолановых реакций, что позволяет в итоге получить более высокие характеристики. Мелкодисперсная зола заполняет поры между крупными зёрнами, улучшая гранулометрию, увеличивая плотность и снижая пористость укрепленных грунтов. При правильном подборе состава морозостойкость таких материалов достигает марки F50 и выше, что подтверждено, в частности, испытаниями золы Улан-Удэнской ТЭЦ-2.

Замена части цемента золой (до 30–50 %) даёт многократную экономию: стоимость тонны золы составляет около 600 рублей против 9000 рублей за тонну цемента. Кроме того, использование местных золошлаковых отходов сокращает транспортное плечо по сравнению с доставкой привозного песка или щебня.

Снижение затрат на рекультивацию золоотвалов – применение отходов в дорожном строительстве уменьшает расходы энергокомпаний на содержание и ликвидацию золоотвалов, что является синергетическим эффектом.

Снижение нагрузки на природные ресурсы – применение золошлаков позволяет сократить добычу инертных материалов (песок, щебень) и уменьшить площадь карьеров.

Утилизация многомиллионных тонн отходов – ежегодно на золоотвалах России накапливается около 50 млн тонн, использование их в дорогах решает проблему накопления.

Безопасность выщелачивания – по данным международных и российских исследований, тяжелые металлы в стабилизированных материалах с золой надежно иммобилизуются в структуре новообразований (гели C-S-H, этtringит) и не превышают нормативов ПДК.

Особенности подготовки и дозирования материалов

Зола-уноса поступает с ТЭЦ в сухом виде (пневмотранспортом) или в виде пульпы (гидрозолоудаление). При использовании сухой золы необходимы системы пылеподавления (орошение, герметизация транспортеров). Для стабилизации влажности золу предварительно увлажняют до оптимальной влажности (обычно на 3–5% выше, чем для песка).

Золошлаковые смеси часто отбирают из отвалов, они имеют естественную влажность и могут содержать крупные включения (до 20–50 мм). Перед использованием их просеивают или фракционируют, если требуется строгое соблюдение зернового состава.

Для отмеривания компонентов (золы, шлака, цемента, извести, воды) используются весовые или объёмные дозаторы высокой точности. Это необходимо, поскольку даже отклонение доли золы на 2–3 % способно заметно повлиять на итоговую прочность материала.

В зависимости от цели выделяют две основные технологии приготовления.

1. Приготовление смесей на стационарных либо передвижных установках

Этот способ применяют, когда нужно строго выдержать рецептуру при устройстве укрепленных грунтов и оснований из золошлаков. Равномерное распределение вяжущего и воды обеспечивают смесители принудительного действия (непрерывного или циклического типа). Из-за высокой удельной поверхности золы время перемешивания увеличивают на 20–30 % по сравнению с обычными смесями — это позволяет разрушить агломераты и добиться равномерного увлажнения.

2. Смешивание на месте укладки.

Применяется для укрепления грунтов и при устройстве насыпей из золошлаковых отходов.

Технология: рассыпание вяжущего (цемент, известь) по поверхности, последующее перемешивание с грунтом или золошлаком фрезами-смесителями (роторными или фрезерными) с глубоким рыхлением.

Особенность: глубина обработки ограничена (обычно до 30–50 см), требуется строгий контроль влажности до и после смешивания; при переувлажнении смесь теряет сыпучесть и плохо уплотняется.

Смеси с добавлением цемента и золы имеют короткую жизнеспособность (обычно не более 2–3 часов), поэтому их доставляют автосамосвалами с плотными тентами, а укладку ведут непрерывно.

Укладка. Для слоев оснований и насыпей используют асфальтоукладчики, автогрейдеры или бульдозеры. Особенность: из-за повышенной связности (особенно при высоком содержании золы) материал склонен к налипанию на рабочие органы, поэтому требуется постоянное увлажнение оборудования или применение антиадгезионных составов.

Слои. Максимальная толщина уплотняемого слоя для золошлаковых смесей составляет 20–25 см (в плотном теле), что связано с ограниченной энергоемкостью уплотняющего оборудования. При большей толщине нижние зоны остаются рыхлыми.

Уплотнение — наиболее критичный этап, от которого зависит конечная прочность и водонепроницаемость.

Влажность. Оптимальная влажность золошлаковых смесей находится в диапазоне ($W_{opt} + 2...+5\%$), что выше, чем для традиционных песчано-гравийных материалов. При недостатке воды не развиваются реакции гидратации, при избытке — материал «плышет» и не уплотняется.

Оборудование. Применяют тяжелые вибрационные катки (массой не менее 12–15 т) с гладкими вальцами или кулачковые катки для

предварительного уплотнения. Особенность: вибрацию включают только после предварительного статического прохода, чтобы избежать выдавливания воды на поверхность.

Число проходов. Требуется на 15–20% больше проходов, чем для обычных минеральных материалов, из-за сжимаемости золошлаков и необходимости разрушения агрегатов.

Контроль плотности. Обязателен ядерно-физический метод (плотномер) или вырезка монолитов с определением плотности скелета; коэффициент уплотнения должен быть не менее 0,98–1,00 (в зависимости от конструктивного слоя).

Зола-уноса в присутствии воды и активатора (цемент, известь) образует гидросиликаты кальция, но процесс идет медленнее, чем твердение чистого цемента. Прочность нарастает в течение 60–180 суток.

Уход за свежесложенным слоем. Обязателен для предотвращения пересыхания (особенно в жаркую погоду). Поверхность укрывают пленкой, битумной эмульсией или периодически увлажняют в течение 7–14 суток. Без ухода верхний слой теряет воду, трещины и снижение прочности неизбежны.

Защита от переувлажнения. При устройстве насыпей из золошлаков в дождливый период необходима оперативная планировка и закрытие слоя, чтобы не допустить водонасыщения — в противном случае материал становится нестабильным.

Список литературы:

1. Лунёв, А. А. Применение золошлаковых смесей тепловых электростанций для строительства земляного полотна автомобильных дорог : монография / А. А. Лунёв, Е. В. Иванов, В. В. Сиротюк ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). — 3-е изд., стер. — Омск : СибАДИ, 2024. — 304 с. — ISBN 978-5-00113-225-7 .
2. Маркова, И. Ю. Золобитумные вяжущие для асфальтобетонных смесей : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05. — Пенза, 2025 .
3. Полякова, С. В. Анализ особенностей микроструктуры золы уноса и потенциал ее использования с учетом зарубежного опыта / С. В. Полякова // Дороги и мосты. — 2023. — № 50-2. — С. 1–12 .
4. Patel, S. Sustainable Enhancement of Flexible Pavements: Integrating Copper Slag and Fly Ash with Hydraulic Binders / S. Patel, H. N. Kedar // Sustainable GeoInfrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering. — Springer Nature Singapore, 2025. — С. 73–82 .
5. Буравчук, Н. И. Использование техногенного сырья в основаниях дорог / Н. И. Буравчук, О. В. Гурьянова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 104–110. — DOI: 10.17213/0321-2653-2016-3-104-110 .

6. Носков, И. В. Использование минерального несгораемого остатка бурого угля (зола-уноса) как материала для эффективного закрепления лессовых грунтовых оснований / И. В. Носков, Л. Н. Амосова // Ползуновский вестник. — 2018. — № 1. — С. 158–164 .