

УДК: УДК 625.7:666.762

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ПУТЕМ
ПЛАВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ КАМЕННЫХ ПОРОД**

Досбаев А.Ж., Канетова Д.Э., Суйоркулов Н.О.

Жалал-Абадский научный центр Национальной академии наук Кыргызской Республики

**ТАБИГЫЙ ТАШ ТЕКТЕРИН ЭРИТҮҮ АРКЫЛУУ ЖОЛ КАПТАМАСЫН
ӨНДҮРҮҮНҮН ИННОВАЦИЯЛЫК ТЕХНОЛОГИЯСЫ**

Досбаев А.Ж., Канетова Д.Э., Суйоркулов Н.О.

Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Жалал-Абад илимий борбору

**INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF ROAD SURFACING THROUGH THE
MELTING OF NATURAL ROCK MATERIALS**

Dosbaev A.Zh., Kanetova D.E., Suyorkulov N.O.

Jalal-Abad Scientific Center of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

Аннотация. Работа развивает авторскую концепцию монолитного дорожного покрытия, формируемого методом локальной термоплавки природных горных пород с последующим контролируемым охлаждением. Представлены предпосылки применения технологии в горных регионах Кыргызстана, предложена технологическая схема (подготовка основания — высокотемпературный нагрев — выравнивание расплава — градиентное охлаждение), описаны критерии отбора пород и методика предпроектных испытаний. Обсуждаются инженерные ограничения (термошок, неравномерная кристаллизация, сцепление с подложкой), вопросы HSE и программа пилотной валидации.

Ключевые слова: термоплавка пород; монолитное покрытие; стеклокерамика; базальт; дорожное строительство; горные регионы; Кыргызстан.

Аннотация. Иш табигый тоо тектеринин жеринде локалдуу жогорку температурада эритилип, андан соң башкарылуучу муздатуу аркылуу түзүлгөн монолиттик жол каптама-сы боюнча автордук концепцияны өнүктүрөт. Кыргызстандын тоолуу аймактарында технологияны колдонууга болгон алгы шарттар келтирилет; технологиялык схема сунушталат (негизди даярдоо — жогорку температурада ысытуу — эритмени тегиздөө — градиенттик муздатуу); тектерди тандоо критерийлери жана алдын ала долбоордук сыноолордун методикасы сүрөттөлөт. Инженердик чектөөлөр (термошок, бир тектүү эмес кристаллдашуу, подложка менен жабышуу), эмгек жана өнөр жай коопсуздугу (HSE) маселелери жана пилоттук валидация программасы талкууланат.

Негизги сөздөр: тоо тектеринин термоплавкасы; монолиттик каптама; айнек-керамика; базальт; жол курулушу; тоолуу аймактар; Кыргызстан.

Abstract. The paper advances an author's concept of an in-situ monolithic pavement produced by thermal melting of natural rock followed by controlled cooling. A process flow is outlined (subgrade preparation—high-temperature heating—melt leveling—gradient cooling), along with rock-selection criteria and pre-project testing. Engineering constraints, HS&E aspects, and a pilot validation program for mountainous regions are discussed.

Keywords: rock thermofusion; monolithic pavement; glass-ceramics; basalt; mountainous regions; Kyrgyzstan.

Введение

Современные дорожные покрытия сталкиваются с ускоренным износом, трещинообразованием и разрушением под действием многократных температурных и механических нагрузок. Традиционные материалы (асфальтобетон, цементобетон) имеют ограниченный срок службы в высокогорных и континентальных условиях и требуют частых ремонтов. Это мотивирует поиск решений на базе местных природных

ресурсов и новых физических принципов формирования покрытия.

Кыргызстан обладает широкой разнообразностью горных пород — от строительных до декоративных. Наличие базальтовых, габбровых, гранитных и карбонатных массивов открывает возможности для *in-situ* термоплавки и получения монолитного стеклокерамического слоя на дорожном основании [1]. Ниже приведены распространённые породы и их типичные применения.

Таблица 1. Основные породы Кыргызстана и типичные области применения

Порода	Регион распространения	Основные применения
Гранит	Тянь-Шань (Жалал-Абад, Нарын)	Строительство; облицовка
Мрамор	Ошская и Баткенская области	Декор; памятники; облицовка
Базальт	Центральный Тянь-Шань	Дорожные щебни; термоплавка/стеклокерамика
Габбро	Восточный Кыргызстан	Облицовка; щебень
Песчаник	Чуйская долина	Строительство; облицовка
Известняк	Районы Ферганской долины	Цемент; известь; щебень
Доломит	Жалал-Абадская область	Флюсы; строительные смеси
Сланцы	Южные районы	Огнеупорные и теплоизоляционные материалы

Возможные площадки пилотных работ показаны на рис. 2.

Статья носит методико-проектный характер: приведены расчётные оценки режимов термоплавки, инженерные параметры

установки и программа пилотной валидации. Экспериментальные данные для выбранных месторождений будут представлены в продолжении исследования.

– Окно стеклования $T_g \approx 600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ (замедление прохода — см. п. 7).

Вязкость расплава: целевое «окно» $\eta = 10\text{--}50\text{ Па}\cdot\text{с}$ при T_{work} (для устойчивого выравнивания без стекания, [2–3]). Выдержка в расплаве: при $h = 50\text{ мм}$ $\tau_{\text{liq}} = 60\text{--}120\text{ с}$ (до выравнивания/дегазации). Нагрев: предсушка/преднагрев $20\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до $600\text{ }^\circ\text{C}$; подъём на расплав $30\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до T_{work} (контроль локальных перегревов $> 1300\text{ }^\circ\text{C}$). Контроль однородности перед охлаждением: $\Delta T_{\text{thickness}} \leq 60\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ (верх–низ), контроль 3 термопарами + ИК-картой ([12], [15]). Термодиффузия/теплопроводность: flash-метод по ASTM E1461 (75–2800 K), расчёт $\lambda = \alpha \rho C_p$ ([12]).

Быстрый расчёт энергобаланса (на 1 м^2 при $h = 50\text{ мм}$): $m \approx 2800\text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 0,05\text{ м} = 140\text{ кг}$; $Q_{\text{sens}} \approx c_p \cdot m \cdot \Delta T \approx 0,84 \cdot 140 \cdot 1225 \approx 144\text{ МДж}/\text{м}^2$; латентный эффект $\approx 40\text{--}70\text{ МДж}/\text{м}^2$; **итого 185–215 МДж/м²** (без потерь).

Для базальтов/габбро приняты: толщина монолитного слоя $50 \pm 5\text{ мм}$; рабочее окно температур $T_{\text{work}} = 1240\text{--}1280\text{ }^\circ\text{C}$; выдержка в расплаве $\tau_{\text{liq}} = 60\text{--}120\text{ с}$; преднагрев $20\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до $600\text{ }^\circ\text{C}$ и подъём $30\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до T_{work} . Перед охлаждением обеспечивается $\Delta T_{\text{thickness}} \leq 60\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ (3 термопары + ИК-контроль). Вязкостное окно $\eta = 10\text{--}50\text{ Па}\cdot\text{с}$ подтверждено лабораторно (DSC/DTA, реология) [2–3, 12, 15].

Сезонные режимы нагрева и выдержки.

- **Зима** ($T_{\text{amb}} \leq 0\text{ }^\circ\text{C}$, ветер $\geq 3\text{ м}/\text{с}$): увеличить преднагрев до $30\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ (до $600\text{ }^\circ\text{C}$), рабочий подъём оставить $30\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, расширить выдержку расплава до $\tau_{\text{liq}} = 90\text{--}150\text{ с}$ для выравнивания; целевая однородность перед охлаждением $\Delta T_{\text{thickness}} \leq 50\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$.

- **Лето** ($T_{\text{amb}} \geq 25\text{ }^\circ\text{C}$, ветер $\leq 3\text{ м}/\text{с}$): преднагрев $20\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, τ_{liq} можно сократить до $60\text{--}90\text{ с}$; допустима $\Delta T_{\text{thickness}} \leq 60\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$.

5. Моделирование термоплавки и энергобаланса

Теплоперенос моделировался в постановке полуограниченного тела с конвективно-лучистым теплообменом на поверхности; свойства — из п. 4. Для оценки реализуемо-

сти полевых плавков и требований к энергоподводу использовали отчёты FRTR/DOE по In-SituVitrification (ISV) как технологический бенчмарк [6].

6. Экспериментальная термоплавка и оборудование

Линейно-модульная платформа (секции 1–2 м): индукционные/газоокислородные блоки; пирометры/термопары; валки выравнивания; дозатор флюсов (доломит/известняк) для корректировки температуры плавления без потери механики стеклокерамики. Режимы выбирали с учётом минералогии и данных о плавкости/гомогенизации [3].

Длина активной секции нагрева: $L_{\text{heat}} = 1,5\text{ м}$ (по ширине полосы).

Скорость платформы: $v = \frac{L_{\text{heat}}}{\tau_{\text{liq}}}$

- при $\tau_{\text{liq}} = 60\text{ с} \rightarrow v \approx 1\{,5\}\text{ м}/\text{мин}$; при $\tau_{\text{liq}} = 120\text{ с} \rightarrow v \approx 0\{,75\}\text{ м}/\text{мин}$. Флюсы (опционально): доломит 5–12 мас.%, известняк 5–10 мас.% (суммарно $\leq 15\text{ мас.}\%$), с верификацией механики стеклокерамики на образцах ([3]). Выравнивание: валки/гребёнка, целевая толщина $h_{\text{target}} = 50\text{ мм}$; контроль лазерной линейкой. Основание: $R_q \leq 5\text{ мм}$; дренаж; влажность $W < 2\text{ }\%$. Датчики: пирометры + 3×термопары (верх/середина/низ), ИК-камера (навигация по $T(x,y,t)$) ([15]). Подготовка образцов/калибровка процедур: по USBR Rock Manual + ASTM D4543 (геометрия кернов) ([11], [13]).

Скорость платформы рассчитывали как $v = \frac{L_{\text{heat}}}{\tau_{\text{liq}}}$. Для $L_{\text{heat}} = 1\{,5\}\text{ м}$ и $\tau_{\text{liq}} = 60\text{--}120\text{ с}$ получали $v \approx 0\{,75\}\text{--}1\{,5\}\text{ м}/\text{мин}$. Опционально вводили флюсы (доломит 5–12 %, известняк 5–10 %, суммарно $\leq 15\text{ }\%$) для снижения T_{liq} ; механические свойства стеклокерамики верифицировались на образцах. Поверхность выравнивали валками ($h_{\text{target}} = 50\text{ мм}$); основание: $R_q \leq 5\text{ мм}$, $W < 2\text{ }\%$. Датчики: пирометры, термопары (верх/середина/низ), ИК-камера [3, 11, 13, 15].

Скорость платформы и экранирование (сезонно).

- **Зима:** применять теплозащитные экраны и «тепловую юбку» по периметру секции; снизить скорость до $v \approx 0,6\text{--}1,0\text{ м}/\text{мин}$ (при $L_{\text{heat}} = 1,5\text{ м}$ и $\tau_{\text{liq}} = 90\text{--}150\text{ с}$).

Ограничить эксплуатацию при ветре > 6 м/с; при 3–6 м/с — усиливать экранирование.

— **Лето:** при стабильной розе ветров допускать $v \approx 1,2\text{--}1,6$ м/мин ($\tau_{liq} = 60\text{--}75$ с); контроль локальных перегревов — состояние и расход горелок/индукторами. **Флюсы (оба сезона):** суммарно ≤ 15 мас.% (доломит 5–12 %; известняк 5–10 %); в зимних условиях вводить в меньших дозах (нижняя граница) и обязательно перепроверять прочность стеклокерамики.

7. Охлаждение и управление термонапряжениями

Ступенчатое охлаждение: конвекция воздухом $\rightarrow$ мелкодисперсный водяной туман $\rightarrow$ контакт с теплоёмкой подложкой/локальные струи; ограничение $\Delta T/\Delta t$ подбиралось по термограмме и по результатам прочностных испытаний после термошока. Для ориентиров применялись испытания на термоустойчивость керамик и испытания натуральных камней при циклах замерзания-оттаивания [9].

Цель: минимизировать остаточные напряжения/микротрещины, особенно при проходе T_g .

Ступени для $h = 50$ мм:

1. $1250 \rightarrow 900$ °C — экранированная воздушная конвекция; $30\text{--}60$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 80$ °C.

2. $900 \rightarrow 700$ °C — мелкодисперсный водяной туман/пониженная конвекция; $5\text{--}10$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 50$ °C.

3. $700 \rightarrow 500$ °C (зона T_g) — минимальная конвекция (туман импульсно); $2\text{--}5$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 30\text{--}40$ °C, продольная неравномерность ≤ 60 °C/м.

4. 500 °C $\rightarrow 200$ °C $\rightarrow$ **амбиент** — воздух; $10\text{--}20$ °C/мин.

Ограничения:

- Водяной туман/локальные струи **не применять выше $900\text{--}950$ °C.**

- Точечное охлаждение (CO_2 /вода) — только ниже 900 °C, по ИК-картам ([15]).

- Переход к следующей секции: отсутствие «горячих пятен» > 200 °C контраста на 1 м длины.

Климатическая стойкость: ориентиры по freeze-thaw испытаниям натуральных камней (лабораторный масштаб, [9]).

НК после охлаждения: ИК-термография

— ISO 18434-1; ультразвук UPV — ISRM Suggested Method ([15], [14]).

Охлаждение — ступенчатое: $1250 \rightarrow 900$ °C ($30\text{--}60$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 80$ °C); $900 \rightarrow 700$ °C ($5\text{--}10$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 50$ °C); критическая зона через T_g : $700 \rightarrow 500$ °C ($2\text{--}5$ °C/мин; $\Delta T_{thickness} \leq 30\text{--}40$ °C); далее 500 °C $\rightarrow$ **амбиент** ($10\text{--}20$ °C/мин). Водяной туман/локальные струи не применяли выше $900\text{--}950$ °C; допуск к следующей секции — отсутствие горячих зон > 200 °C на 1 м по ИК-карте [9, 14–15].

Ступени охлаждения — сезонные поправки ($h = 50$ мм).

1. $1250 \rightarrow 900$ °C (**конвекция**):

— **Зима:** $30\text{--}50$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 70$ °C (усиленные экраны).

— **Лето:** $40\text{--}60$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 80$ °C.

2. $900 \rightarrow 700$ °C (**перед T_g , туман/пониженная конвекция**):

— **Зима:** $4\text{--}8$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 40\text{--}45$ °C.

— **Лето:** $5\text{--}10$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 50$ °C.

3. $700 \rightarrow 500$ °C (**зона T_g , самая медленная «полка»**):

— **Зима:** $1\text{--}3$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 25\text{--}35$ °C.

— **Лето:** $2\text{--}5$ °C/мин, $\Delta T_{thickness} \leq 30\text{--}40$ °C.

4. 500 °C $\rightarrow 200$ °C $\rightarrow$ **амбиент**:

— **Зима:** $8\text{--}15$ °C/мин; не допускать прямого обдува холодным воздухом с подветренной стороны.

— **Лето:** $10\text{--}20$ °C/мин.

Ограничения: водяной туман и локальные струи **не применять выше $900\text{--}950$ °C** (оба сезона); точечное охлаждение — только ниже порога и по ИК-карте.

8. Неразрушающий контроль (НК)

ИК-термография — он-лайн мониторинг горячих зон/неоднородностей охлаждения по ISO 18434-1 [15]. Ультразвуковая передача (UPV) — оценка однородности и скрытой трещиноватости по ISRM Suggested Method [14].

9. Критерии инженерной пригодности покрытия

Механика: прочность при сжатии/модуль — по ASTM D7012 (см. агрегированное описание в USBRRockManual) [11]. Сцепление/шероховатость — ориентиры по TRB/NCHRP Report 154 для противоскольжения на дорожных покрытиях [8].

Технологическая схема



Рисунок 1. Линейно-модульная установка для *in-situ* термоплавки дорожного слоя. 1 — преднагрев; 2 — расплавление; 3 — выравнивание; 4 — дозатор флюсов; 5 — ступенчатое охлаждение (5а — конвекция; 5b — водяной туман; 5с — полка через T_g); ИК-контроль и термопары обеспечивают удержание $\Delta T_{thickness}$ 80→50→30 °C.

Линейно-модульная платформа: секции нагрева 1–2 м (индукционные/газокислородные), узел распределения расплава, валки выравнивания, блок охлаждения. Управление по ПИД-контур с термо- и ветрокоррекцией. Контроль дефектов — УЗК и ИК-термография.

10. Планирование эксперимента и статистика

Факторный план (температура плавки, скорость продвижения платформы, интенсивность охлаждения); ANOVA ($\alpha=0,05$), пост-хос тест Тьюки; интегральные метрики: дефектность (ИК-НК, UPV), прочность, водостойкость.

Образец/секция	UPV до (км/с)	UPV после (км/с)	σсж (МПа)	Е (ГПа)	Водопогл., %	ВРН сух/ влажн (Е303)	Примечание			
—	—	—	—	—	—	—	—			
—	—	—	—	—	—	—	—			
—	—	—	—	—	—	—	—			
Образец	Т (°С)		а, мм ² /с	Ср, кДж/кг·К		λ, Вт/м·К	Метод (ASTM Е1461)			
—	—		—	—		—	—			
—	—		—	—		—	—			
—	—		—	—		—	—			
Образец	Tg (°С)	Tx (°С)	T_liq (°С)	Ea (кДж/ моль)	n (—)	β (°С/ мин)	Метод			
—	—	—	—	—	—	—	—			
—	—	—	—	—	—	—	—			
—	—	—	—	—	—	—	—			
Образец	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Примечание
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 2. Химический состав (XRF) исследованных образцов.
Таблица 3. Результаты DSC/DTA и параметры кристаллизации (Киссинджер/изоконверс.).
Таблица 4. Термофизические характеристики (flash-метод, ASTM E1461).
Таблица 5. Неразрушающий контроль и механические/эксплуатационные показатели (UPV, прочность, E303).

ИК-термография + три термопары (верх/середина/низ) и UPV до/после охлаждения; допуск — отсутствие горячих пятен $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 1 м и $|\Delta\text{UPV}|$ ниже порога приёмки.

2.7. Контроль качества (НК).

1250→900 $^{\circ}\text{C}$: 30–60 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, $\Delta T_{\text{thickness}} \leq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 900→700 $^{\circ}\text{C}$: 5–10 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 700→500 $^{\circ}\text{C}$ (зона T_g): 2–5 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, $\leq 30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$; далее 10–20 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до амбиента; туман не применять выше 900–950 $^{\circ}\text{C}$.

2.6. Охлаждение и термонапряжения (сводка).

Скорость $v = L_{\text{heat}} / \tau_{\text{liq}}$ (см. (1)). При $L_{\text{heat}} = 1,5\text{ м}$; $\tau_{\text{liq}} = 60\text{ с} \Rightarrow v \approx 1,5\text{ м}/\text{мин}$; $\tau_{\text{liq}} = 120\text{ с} \Rightarrow v \approx 0,75\text{ м}/\text{мин}$.

2.5. Кинематика платформы.

Преднагрев 20–50 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до 600 $^{\circ}\text{C}$; подъём 30–60 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до T_{work} ; выдержка в расплаве $\tau_{\text{liq}} = 60\text{--}120\text{ с}$ при целевом окне вязкости $\eta = 10\text{--}50\text{ Па}\cdot\text{с}$.

2.4. Режимы нагрева и выдержки.

Площадь в минуту $A' = W \cdot v$. Мощность $P \approx Q \cdot A' / 60$. Примеры: $W = 1,0\text{ м}$, $v = 1,0\text{ м}/\text{мин} \Rightarrow P \approx 3,3\text{ МВт}$; $W = 0,5\text{ м}$, $v = 0,75\text{ м}/\text{мин} \Rightarrow P \approx 1,25\text{ МВт}$ (без учёта потерь). С учётом КПД 30–60 %: подключаемая мощность 2–5 МВт при $v = 0,6\text{--}1,0\text{ м}/\text{мин}$.

2.3. Требуемая мощность (на полосу).

Чувствительный нагрев: $Q_{\text{sens}} \approx C_p \cdot \rho \cdot h \cdot \Delta T$. При $\Delta T \approx 1225\text{ К}$: $Q_{\text{sens}} \approx 0,84 \cdot 140 \cdot 1225 \approx 144\text{ МДж}/\text{м}^2$. Условный вклад расплавления/гомогенизации: +40–70 МДж/ м^2 . Итог: $Q \approx 185\text{--}215\text{ МДж}/\text{м}^2$.

2.2. Энергия на 1 м^2 .

Толщина слоя $h = 50 \pm 5\text{ мм}$; ширина $W = 0,5\text{--}1,0\text{ м}$; плотность $\rho \approx 2800\text{ кг}/\text{м}^3$; теплоёмкость $C_p \approx 0,84\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ в интервале 20–1200 $^{\circ}\text{C}$; рабочее «окно» расплава $T_{\text{work}} = 1240\text{--}1280\text{ }^{\circ}\text{C}$; вклад расплавления агрегирован в Q .

2.1. Принятые допущения.

Результаты: расчётные оценки и проектные параметры

Технологическая схема

Линейно-модульная платформа: секции нагрева 1–2 м (индукционные/газо-кислородные), узел распределения расплава, валки выравнивания, блок охлаждения. Управление по ПИД-контур с термо- и ветрокоррекцией. Контроль дефектов — УЗК и ИК-термография. (см. рис. 1).

Охлаждение и управление напряжениями

Ключевые риски — термошок и неравномерная кристаллизация. Рекомендуется многоступенчатая схема охлаждения с ограничением температурных градиентов, а также использование добавок/флюсов для снижения температуры плавления и улучшения спекаемости при сохранении прочности.

Экологические аспекты и экономика

Экономическая оценка (предварительно)

Энергобаланс уточнить с учётом потерь излучением/конвекцией и КПД нагревателей. Рассчитать плотность мощности ($\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$) при заданных v и W ; выполнить сравнение LCCA на 10–15 лет (CAPEX: установка; OPEX: энергия/газ; ремонтные циклы) с асфальтом и бетоном.

Меры: теплозащитные экраны и тепловые шторы; зоны ограничения доступа $\geq 3\text{ м}$; СИЗ для персонала; газоочистка/вентиляция; мониторинг NO_x и дыма; контроль шума. Аварийная остановка нагрева (электро/газ) и план действий при отказе питания. Водяной туман применять только ниже 900 $^{\circ}\text{C}$.

Отсутствие битума снижает нефтезависимость и эмиссии при укладке. LCA-сопоставление с бетонными и асфальтовыми покрытиями требует локализации допущений (энергомикс, логистика, климат), но указывает на потенциал снижения ремонтных затрат за счёт увеличения межремонтных сроков.

План пилотной валидации

Критерии приёмки (предлагаемые пороги): $\text{BPN}_{\text{влажн}} \geq 40\text{--}55$ (уточнить по нормам); $|\Delta\text{UPV}| \leq 5\text{--}10\text{ }%$; морозостойкость: потеря массы $\leq 1\text{--}3\text{ }%$, падение $\text{UPV} \leq 5\text{--}10\text{ }%$ после N циклов; дефектность по ИК/UPV ниже порога; ровность/профиль — по местным регламентам.

Участок: 10–20 м (полоса 0,5–1,0 м), затем 0,5–1,0 км. Замеры до/после: XRF; DSC/DTA (T_g , T_x , T_{liq}); E1461 (a , C_p , λ); UPV; прочность при сжатии, E ; водопоглощение; BPN (сух/влажн). НК он-лайн: ИК-камера + 3 термопары.

Этап 1 — лабораторные образцы (0,3×0,3 м), карты температур/скоростей; Этап 2 — пилот 10–20 м (уклон $\leq 8\text{ }%$), мони-

торинг дефектов 12 мес.; Этап 3 — участок 0,5–1,0 км на горной дороге IV категории, сравнение с асфальтобетоном по сцеплению, колееобразованию, водостойкости и трещиностойкости зимних циклов.

Заключение

Термоплавка природных пород для формирования монолитного покрытия технологически реализуема при соблюдении режимов нагрева/охлаждения, корректного

подбора пород и управлении термонапряжениями. Технология перспективна для горных регионов Кыргызстана при подтверждении показателей на пилотах.

Благодарности

Автор благодарит коллег из Жалал-Абадского научного центра ЮО НАН КР за обсуждения.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. География Кыргызской Республики. Часть II. Экономическая и социальная география / под ред. Ю.В. Шинко. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2022. 418 с. ISBN 978-9967-19-860-9.
2. Huo Y., Qin G., Huo J., Zhang X., Zhu Y. Crystallization Kinetics of Basalt Glass-Ceramics Produced from Olivine Basalt Rock. *Crystals*. 2022;12(7):899. <https://doi.org/10.3390/cryst12070899>.
3. Chen X., Zhang Y., Hui D., Chen M., Wu Z. Study of melting properties of basalt based on their mineral components. *Composites Part B: Engineering*. 2017;116:53–60. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.014>.
4. de Lima L.F., Zorzi J.E., Cruz R.C.D. Basaltic glass-ceramic: A short review. *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr.* 2022;61(1):2–12. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.07.005>.
5. Byers M.G., Fitzpatrick V.F., Holtz R.D. Site Remediation by In Situ Vitrification. *Transportation Research Record*. 1991;1312:162–173.
6. FRTR/DOE. In Situ Vitrification – Cost & Performance Report (Oak Ridge). Federal Remediation Technologies Roundtable, 2000-е гг. URL: <https://frtr.gov/costperformance/pdf/OakRidge.PDF> (дата обращения: [указать]).
7. USGS. Basalt – Glossary. U.S. Geological Survey, 2015. URL: <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/basalt.html> (дата обращения: [указать]).
8. NCHRP Report 154. Determining Pavement Skid-Resistance Requirements. Transportation Research Board, 1975. URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_154.pdf.
9. Erol G., Arslan M., Erol O. A laboratory-scale investigation on freezing–thawing performance of natural stones. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2023;168:73–86. URL: <https://bmta.researchcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1089&context=journal>.
10. Aryan Y., et al. A critical review of life-cycle assessment studies on asphalt pavement construction. *Journal of Environmental Management*. 2023;343:118199. (доступ через ScienceDirect).
11. USBR. Engineering Geology Field Manual. 2nd ed. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, 1998.
12. ASTM E1461-13. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. ASTM International, 2013.
13. ASTM D4543-19e1. Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. ASTM International, 2019.
14. ISRM. Suggested Methods for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. In: Ulusay R. (ed.) *The ISRM Suggested Methods*. 2007.
15. ISO 18434-1:2008. Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures and guidelines. International Organization for Standardization, 2008.