



DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_31
MPNТИ 55.22.29

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВ ДЛЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

ЖЫЛУҒА ТӨЗІМДІ ҚАПТАМАЛАРҒА АРНАЛҒАН ҰНТАҚТАРДЫ ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДЫ ҚОЛДАНУ

APPLICATION OF NATURAL MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF POWDERS FOR HEAT-RESISTANT COATINGS

А.А. Генбач ¹, Д.Ю. Бондарцев ^{1*}

¹НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева», г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Бондарцев Давид Юрьевич, e-mail: d.bondartsev@aues.kz

Ключевые слова:

природные материалы,
порошки, покрытия,
теплообмен, голография.

АННОТАЦИЯ

Природные материалы представляют собой важнейший ресурс, широко применяемый в различных отраслях промышленности и научных исследований. Исследование природных материалов открывает перспективы для разработки новых, более безопасных и энергоэффективных технологий. Разработана технология получения порошков новым способом. В качестве природных материалов выбраны горные породы: кварцит, гранит, тешенит и мрамор. Порошки готовились в специальных формах из системы сопряженных эллиптических поверхностей с различным эксцентриситетом. Технология увеличивает выход порошка класса $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м и повышает степень упрочнения порошка. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз. Исследование с помощью голографической интерферометрии показало, что точкой отсчета является остаточная деформация, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки. Это позволяет прогнозировать поведение материалов в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывать состояние прочности. Настоящее исследование посвящено анализу потенциала природных материалов как основы для создания функциональных материалов с учётом требований к энергоэффективности.

Түйінді сөздер:

табиғи материалдар,
ұнтақтар, қаптамалар,
жылуалмасу, голография

ТҮЙІНДЕМЕ

Табиғи материалдар – өнеркәсіптің әртүрлі салаларында және ғылыми зерттеулерде кеңінен қолданылатын маңызды ресурс болып табылады. Табиғи материалдарды зерттеу қауіпсіз әрі энергия үнемдейтін жаңа технологияларды әзірлеуге жол ашады. Ұнтақтарды алудың жаңа технологиясы жасалды. Табиғи материал ретінде кварцит, гранит, тешенит және мәрмәр жыныстары таңдалды. Ұнтақтар эксцентриситеті әртүрлі, қос эллипстік беттер жүйесінен тұратын арнайы қалыптарда дайындалды. Бұл технология $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м фракциясындағы ұнтақ өнімділігін арттырып, ұнтақтың беріктігін жоғарылатады. Ұнтақ бөлшектеріндегі термия-



лық сығымдау кернеулері екі есеге дейін артты. Голографиялық интерферометрия әдісі арқылы жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, бастапқы нүкте ретінде жылу жүктемесі алынғаннан кейін де жойылмайтын майда жарықтар торымен анықталатын қалдық деформация қарастырылады. Бұл ірі жарық ұшындағы энергияның диссипациясы жағдайында материалдың мінез-құлқын болжауға және беріктік жағдайын алдын ала анықтауға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу табиғи материалдарды функционалдық материалдар жасауға арналған негіз ретінде қолдану мүмкіндігін энергия үнемділігі талаптарын ескере отырып талдауға бағытталған.

keywords:

natural materials, powders,
coatings, heat transfer,
holography.

ABSTRACT

Natural materials represent a vital resource widely used across various industrial sectors and scientific research fields. The investigation of natural materials opens up prospects for the development of new, safer, and more energy-efficient technologies. A novel method for producing powders has been developed. Quartzite, granite, teshenite, and marble were selected as the primary natural materials. The powders were prepared using specialized molds based on a system of conjugate elliptical surfaces with varying eccentricities. This technology increases the yield of powder in the $(0\pm 2)\times 10^{-3}$ m fraction and enhances the degree of powder strengthening. The thermal compressive stress within powder particles increased by up to two times. Studies using holographic interferometry revealed that the reference point corresponds to residual deformation, defined by a network of fine cracks that persist even after the thermal load is removed. This enables prediction of material behavior during energy dissipation at the tip of a major crack and allows assessment of structural integrity. The present study focuses on analyzing the potential of natural materials as a basis for the development of functional materials, considering modern energy-efficiency requirements.

ВВЕДЕНИЕ

Горные породы, являясь важнейшими природными материалами, играют ключевую роль в формировании минерально-сырьевой базы. Природные материалы, такие как туфы (Ting, 2024), мраморы (Yan, 2024), кварциты (Wei, 2024), граниты (Wang, 2024), тешениты (Genbach et al., 2025) и бентониты (Askalany, 2017), имеют огромный потенциал для применения в высокотемпературных и высокоинтенсивных условиях, особенно в такой области, как теплоэнергетика, системы охлаждения и тепловая защита (Jian-Jun, 2019). Природные материалы давно изучаются и применяются в различных отраслях возобновляемых источников энергии, строительства, инжиниринга, машиностроения, материаловедения, но их использование в качестве покрытий для теплоэнергетического оборудования является относительно новым и перспективным направлением (Genbach et al., 2022). Современные порошковые материалы (Chain-Tsuan, 2022) не только способны значительно улучшить термостойкость и эффективность работы систем, но и обеспечивают высокую степень защиты от тепловых повреждений, что, в свою очередь, способствует увеличению надежности и продления срока службы оборудования (Mi, Wanlin & Ba-Yi, 2025).

Ранее авторами (Yan-Hua, 2017) были проведены испытания на влияние высоких температур (от 450 °C до 900 °C) на сжатие образцов гранита с тремя отверстиями. Изменился цвет, объём гранита увеличился, масса уменьшилась, плотность ρ снизилась. Прочность сначала увеличивалась, а потом снижалась, модуль упругости уменьшался. Пик деформации резко возрастал после 450 °C. С использованием метода акустической эмиссии и фотомониторинга исследовано зарождение, распространение и слияние



трещин в образцах гранита. Процесс растрескивания показал, что распределение трещин от поверхности отверстий приводит к слиянию между соседними отверстиями. Режимы разрушения разделены на три категории: режим расщепления, режим сдвига, смешанный режим и связаны с температурой термообработки.

Данное исследование (Yan-Hua, 2017) представляет интерес для случая применения напыления порошков горных пород для создания покрытий, а также для применения голографии, скоростной киносъемки и термоупругости для понятия механизма слияния трещин. Исследовались характеристики пористой структуры гранитов при различных режимах охлаждения на основе технологии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) (Xinghui, 2023). При 150 °С водяное охлаждение уменьшает количество пор породы, происходит термическое упрочнение. При 300 °С диаметр микропор d увеличивается, при 450 °С поры мезопор разрастаются. При 600 °С, когда превышена кварцевая температура 573 °С фазового перехода, количество и диаметр пор породы резко увеличивается. Термоаккумулирующие свойства макропористых и мезопористых пор проявляются при оптимальных температурах T (450 °С и 600 °С). Исследования проводились в диапазоне (25-1050) °С. С повышением температуры (573 °С и 800 °С) происходит увеличение объема кварца и концентрации напряжений, образуя явление термического растрескивания.

Авторами данной статьи предлагается создать технологию изготовления порошков природных материалов (дробление материалов) и изучить механизм разрушения покрытий.

Большую роль в научном направлении создания технологии изготовления и напыления порошков естественных минеральных сред в виде крепчайших горных пород сыграл член-корреспондент академии наук, доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана Владимир Михайлович Поляев, под руководством которого один из авторов статьи проводил исследования в период с 1990 по 2000 годы (Genbach et al. 2021, 2022, 2025).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Порошки из природного материала (кварциты, граниты, тешениты, мраморы, туфы) приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа (Genbach et al. 2025). Продукты разрушения капиллярно-пористого покрытия имели вид чешуеобразных частиц, форма и размер которых определялись физико-механическими свойствами породы, газодинамическими параметрами теплового потока и конструкций сопла.

Другой способ получения порошков заключался в приготовлении специальных форм из необходимого материала и их взрывания, что позволяло применять упрочняющие технологии для создания покрытий. С этой целью производились исследования моделей из песчано-цементной смеси (рис. 1), представляющих собой замкнутый объем, ограниченный в одном случае системой сопряженных эллиптических поверхностей, в фокусах которых расположены шпуров (модель №1), в другом случае ограниченный прямолинейными свободными поверхностями (модель №2).

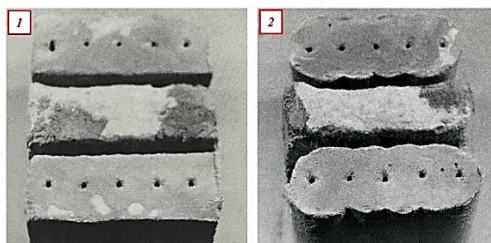


Рисунок 1. Общий вид моделей: 1 – модель с эллиптическими свободными поверхностями; 2 – модель с прямолинейными свободными поверхностями.

Шпуров диаметром $d_{ш}$ 5×10^{-3} м и глубиной h 50×10^{-3} м

Примечание – составлено авторами



Модель №1 состояла из четырех сопряженных эллиптических цилиндров с эксцентриситетом 0,47, в фокусах которых располагались шпуры диаметром $d_{ш}$ 5×10^{-3} м глубиной h 50×10^{-3} м. Размер среднего куска рассчитывался по формуле:

$$d_{cp} = \frac{\sum_1^n d_i \times w_i}{\sum w_i},$$

где: d_i – средний размер i – ой фракции, мм;

w_i – выход i – ой фракции, %.

Величина суммарной вновь образованной поверхности:

$$S_H = \frac{6}{\gamma} \sum_1^n \frac{P_i}{d_i} - S_0,$$

где: n – число фракций;

P_i – вес каждой фракции, г;

γ – удельный вес материала, г/см³;

S_0 – первоначальная поверхность модели, см².

Для проведения экспериментов по влиянию эксцентриситет эллиптических цилиндров на качество дробления (рис. 2) выбирались две модели: модель №3 с $\varepsilon = 0,74$; модель №4 с $\varepsilon = 0,47$.

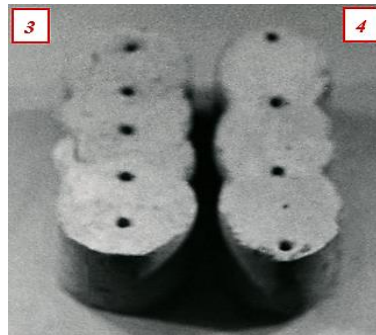


Рисунок 2. Общий вид моделей: 3 - модель с эксцентриситетом 0,74;

4 – модель с эксцентриситетом 0,47. Высота эллиптических цилиндров $h = 95 \times 10^{-3}$ м

Примечание – составлено авторами

Эксцентриситет эллипса:

$$\varepsilon = \frac{c}{a},$$

где: $2c$ – расстояние между фокусами;

$2a$ – длина большой оси.

Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз (Genbach et al. 2025).

Экспериментальная установка. Для исследования процессов визуализации методом голографической интерферометрии интерферометр собирается по двухлучевой схеме с плоским волновым фронтом в опорном пучке (рис. 3). На рис. 3 приняты обозначения: 1 – лазер ЛГ-38, 2 – светоделительный кубик, 3 – ступенчатый нейтральный светофильтр, 4 – диафрагма, 5 – зеркало, 6 – коллиматор, 7 – объектив, 8 – зеркало, 9 – диффузный экран, 10 – плоскость голограммы, 11 – охлаждающий элемент, 12 – РФК-5М (поз. 12, в масштабе

представлен вид *a* и вид *b*). Схема составлена на основе разработок по применению оптической голографии для исследования динамических объектов и быстропротекающих процессов (Genbach et al. 2022).

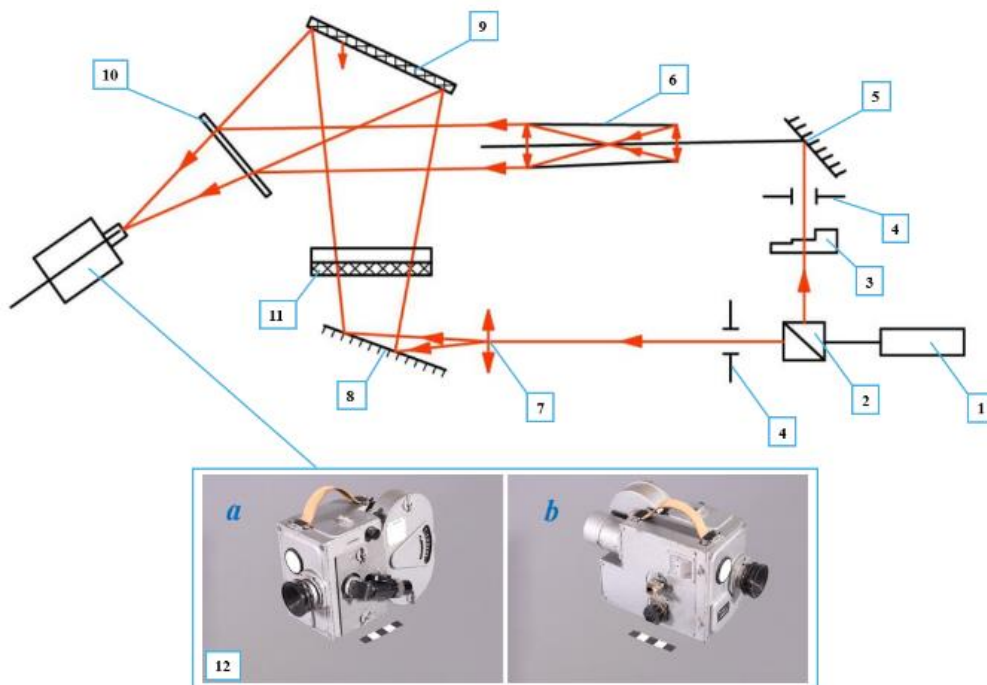


Рисунок 3. Двухлучевая схема интерферометра

Примечание – составлено авторами

В качестве источника когерентного излучения используется гелиево-неоновый лазер 1 типа ЛГ-38 (мощность излучения 60×10^{-3} Вт, длина волны 0.6328×10^{-6} м). Светоделительный кубик 2 делит лазерный луч на опорный и сигнальный пучки. Опорный пучок разворачивается зеркалом 5 и, сформированный коллиматором 6, направляется в плоскость голограммы 10. Сигнальный пучок расширяется объективом 7 и с помощью зеркала 8 направляется на диффузный экран 9. От случайных лучей опорный пучок защищен диафрагмой 4. Ступенчатый нейтральный светофильтр 3 позволяет выбирать необходимое соотношение интенсивностей опорного и сигнального пучков на стадиях регистрации и восстановления голограммы. Используются голографические пластинки ВЛ-Л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты проводились с Коунрадскими кварцитами. Набор сит (крупность буровых частиц) составлял: 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,07; 4×10^{-3} м. Ему отвечал выход частиц по весу в %: 9,4; 6,6; 4,4; 3,6; 2,3. Средняя толщина частиц равнялась для набора сит, 10^{-3} м: + 1,0; + 0,5; + 0,25 соответственно: + 0,54; + 0,29; + 0,11. Средние линейные размеры, в 10^{-3} м, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Средние линейные размеры

Ширина	+ 1,0	+ 0,5
	+ 1,54	+ 0,7
Длина	+ 2,31	+ 1,1

Примечание – составлено авторами

На рис. 4 представлено распределение по фракциям гранулометрического состава: 1 – для модели с эллиптической свободной поверхностью; 2 – для модели с прямолинейной свободной поверхностью.

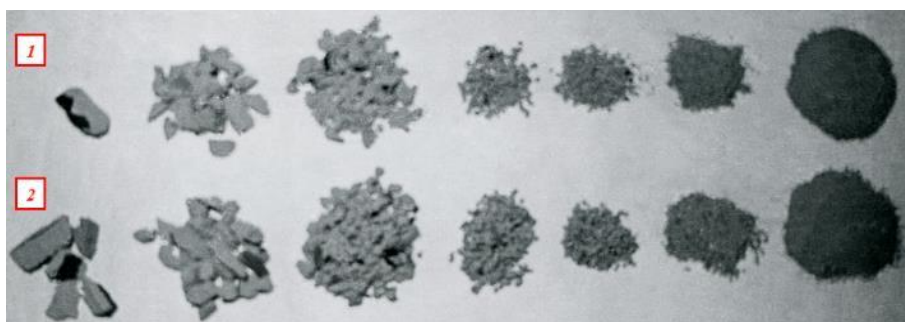


Рисунок 4. Общий вид распределения по фракциям массы моделей №1 (1) и №2 (2).

Выход отдельных классов от 0 до 2×10^{-3} м составил, для №1 – 12,5 %, для №2 – 8,6 %

Примечание – составлено авторами

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показывают, что для модели №1 (рис. 1) выход отдельных классов от 0 до 2×10^{-3} м составил 12,5%, а для модели №2 – 8,6 %. Кроме того, возрастает степень упрочнения частиц порошка.

Результаты ситового анализа гранулометрического состава (см. рис. 5) показали, что для модели №3 (рис. 2) выход класса $(0,2) \times 10^{-3}$ м дает 27,2 %, для модели №4 – 18,2 %. Данная технология позволяет увеличивать степень упрочнения порошка.

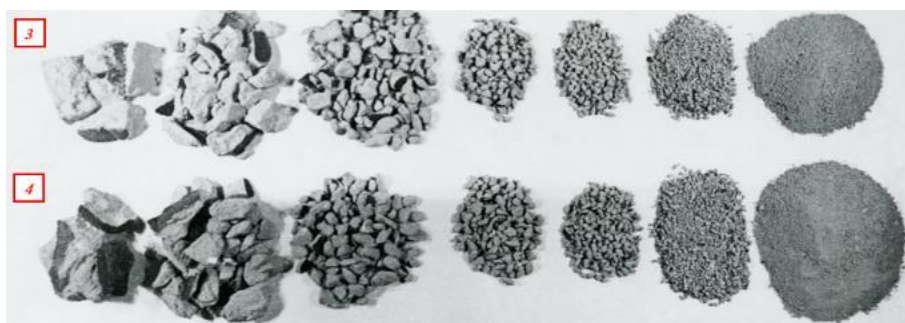


Рисунок 5. Общий вид распределения по фракциям массы моделей №3 (3) и №4 (4).

Частицы отбирались по крупности: $0,1 \times 10^{-3}$ м – 3,1 %; $0,25 \times 10^{-3}$ м – 4,2 %; $0,5 \times 10^{-3}$ м – 7,3 %.

Примечание – составлено авторами

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разрушения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: $0,1 \times 10^{-3}$ м – 3,1 %; $0,25 \times 10^{-3}$ м – 4,2 %; $0,5 \times 10^{-3}$ м – 7,3 %.

Ранее в работе (Genbach et al. 2025) был выполнен эксперимент с применением голографии и скоростной киносъемки. В результате проведенного эксперимента были получены интерферограммы, которые позволили обнаружить на поверхности покрытий трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы. Более того, в практике даже используется визуальное наблюдение для прогнозирования разрушения покрытия (рис. 6).



На рис. 6 представлен процесс разрушения тешенитного покрытия. Пористость образца – 7 %. Нагружение образца на верхней грани. Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Исследования современных технологий поверхностей и покрытий обычно рассматривают целостность термически напыленных покрытий металлов и сплавов на основе воздействия напряжений растяжения и деформаций. Однако для предельного состояния природных покрытий из минеральной среды (рис. 6, 7, 8, 9, 10) при определенных размерах δ частиц и времени подачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны.

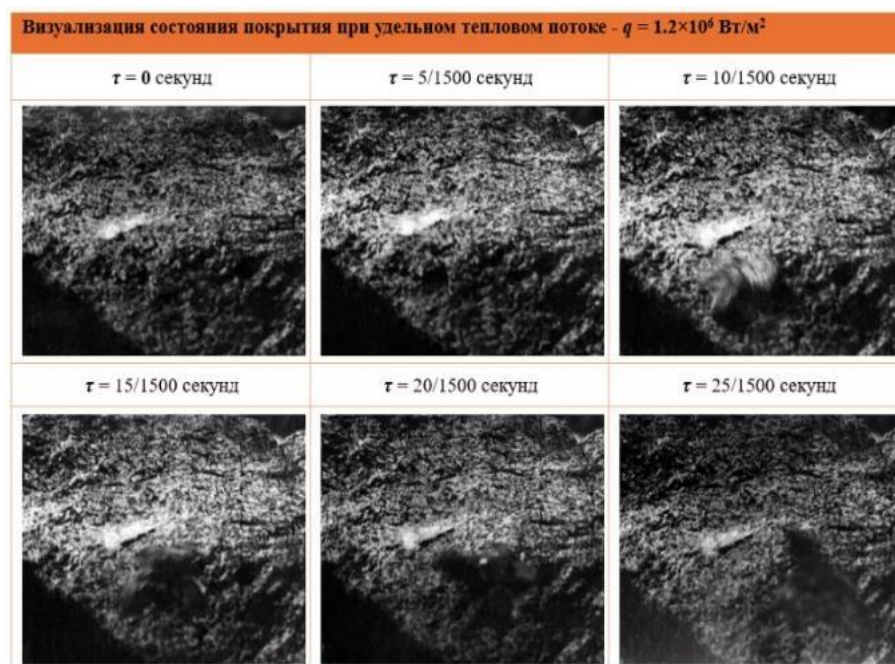


Рисунок 6. Фрагмент скоростной киносъемки процесса разрушения тешенитного покрытия

Примечание – составлено авторами

Различные методы термического напыления дают различную микроструктуру и отношение напряжения сжатия, растяжения и сдвига к деформации. Это связано с прочностью сцепления между частицами минеральной среды, т.к. полностью или частично расплавление частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы.

Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частиц, что положительно влияет на коррозионную способность капиллярно-пористого покрытия.

Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа капиллярно-пористых покрытий не является основной.

Расшифровка интерферограмм (рис. 7, 8, 9, 10) для всех покрытий показывает нелинейную кривую перемещения частиц, причем кислородно-керосиновое напыление имеет преимущество в том, что расплавление частиц на капиллярно-пористом покрытии

достигается с помощью спинового детонационного факела на поверхности покрытия (Genbach et al. 2025). Это значительно снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц в капиллярно-пористом покрытие.

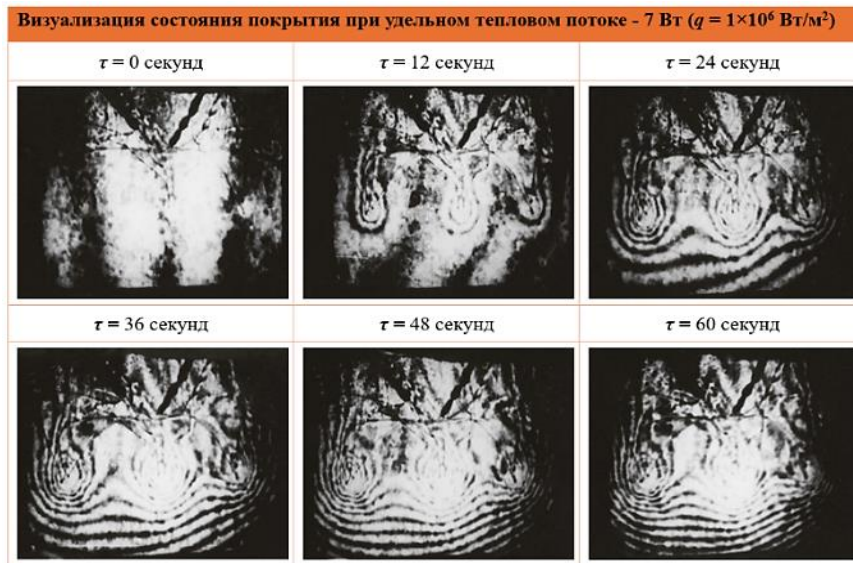


Рисунок 7. Интерферограммы покрытия из тешенита

Примечание – составлено авторами

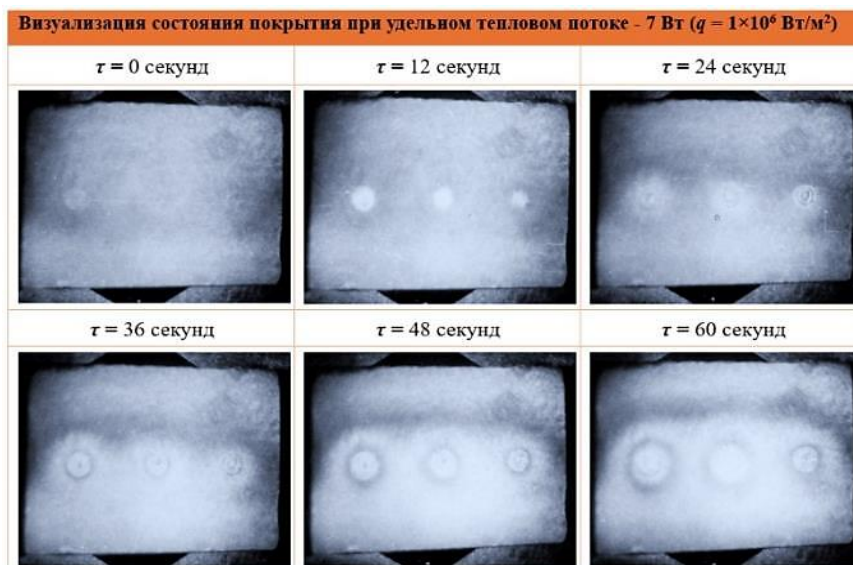


Рисунок 8. Интерферограммы покрытия из мрамора

Примечание – составлено авторами

Для исследования с помощью интерфериметрии точкой отсчета всегда будет остаточная деформация в капиллярно-пористом покрытии, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки.

Создаваемое термическим способом капиллярно-пористое покрытие будет всегда анизотропно, что имеет преимущество в процессе охлаждения, т.к. капиллярные силы активнее участвуют в равномерности распределения охлаждающей жидкости.



При воздействии теплового потока q на капиллярно-пористое покрытие частицы разрушаемого материала, близлежащие к поверхности нагрева, находятся в сложном напряженном состоянии (рис. 7, 8, 9, 10). Они испытывают одновременно действие деформации сжатия, растяжения и изгиба (Genbach et al. 2025).

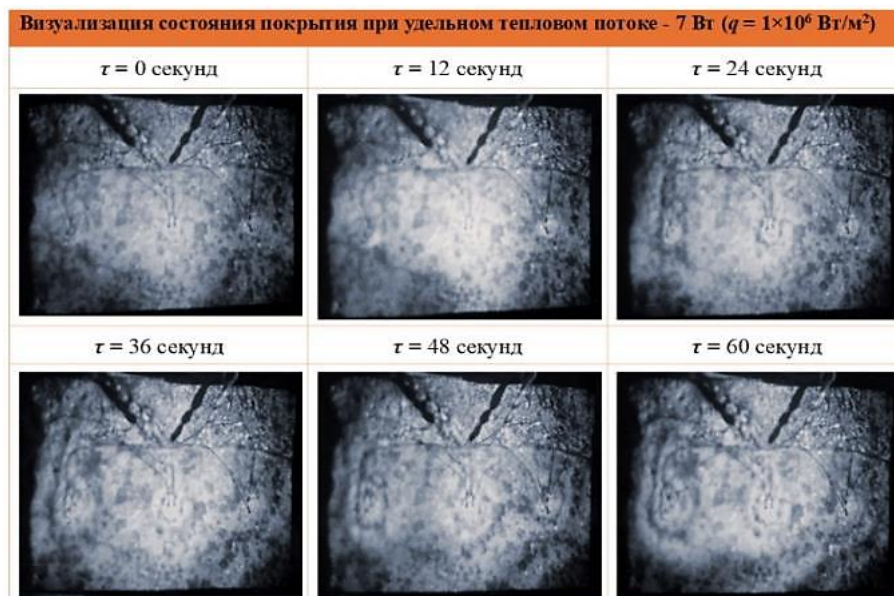


Рисунок 9. Интерферограммы покрытия из гранита

Примечание – составлено авторами

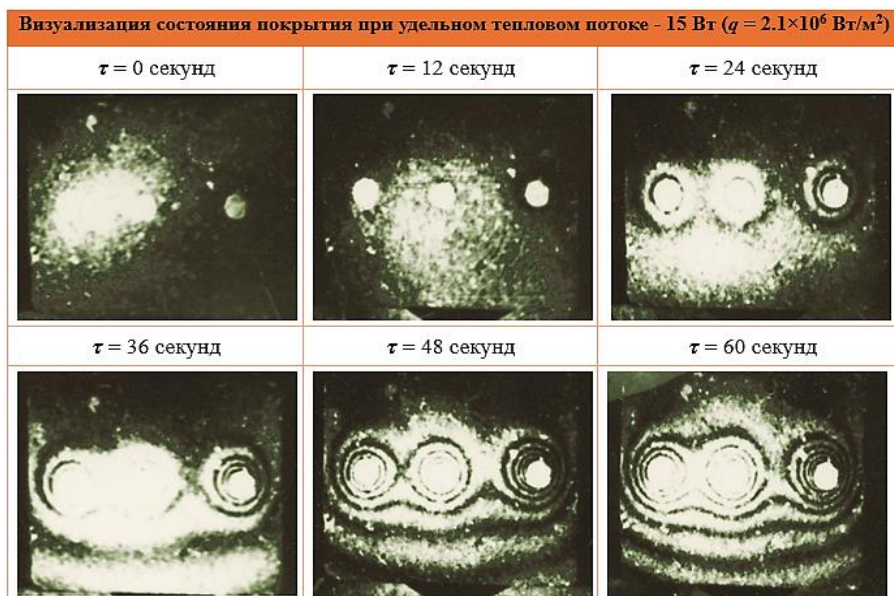


Рисунок 10. Интерферограммы покрытия из туфа

Примечание – составлено авторами

Предельные области тепловых нагрузок для капиллярно-пористых покрытий из естественных минеральных сред имеют значения: тешенитные покрытия – $(2,1 \div 4) \times 10^6$ Вт/м², гранитные покрытия – $(4 \div 6) \times 10^6$ Вт/м², кварцевые покрытия – $(6,2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м². Тепловые

нагрузки находились в зоне перегрева поверхности относительно температуры насыщенного водяного пара $\Delta T = T_{ст} - T_n = (20 \div 75)$ К.

Напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ являются наибольшими в нагреваемом слое. По мере удаления от нагреваемого капиллярно-пористого покрытия (l растет) эти напряжения резко уменьшаются, переходят в напряжения растяжения $\sigma_{раст}$ и достигают на некотором расстоянии своего максимума, а затем убывают, т.е. критерий (число Нуссельта) возрастает:

$$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda'}$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

l – расстояние от факела до капиллярно-пористого покрытия;

λ – коэффициент теплопроводности покрытия.

Для материала капиллярно-пористого покрытия с теплопроводностью λ и при теплоотдаче α существует минимальная толщина слоя. Если толщина материала менее величины L (расчетная толщина разрушаемого материала), то в материале не возникают $\sigma_{разруш}$ шелушением. Критическая толщина $l_{кр}$ составляет несколько миллиметров (определялось по рис. 7, 8, 9, 10).

При больших q (Q) и α в нагреваемом слое мгновенно возникают σ , очень быстро достигающие максимальных значений. Затем они быстро уменьшаются, стремясь к нижнему пределу (рис. 11) и (Genbach et al. 2025).

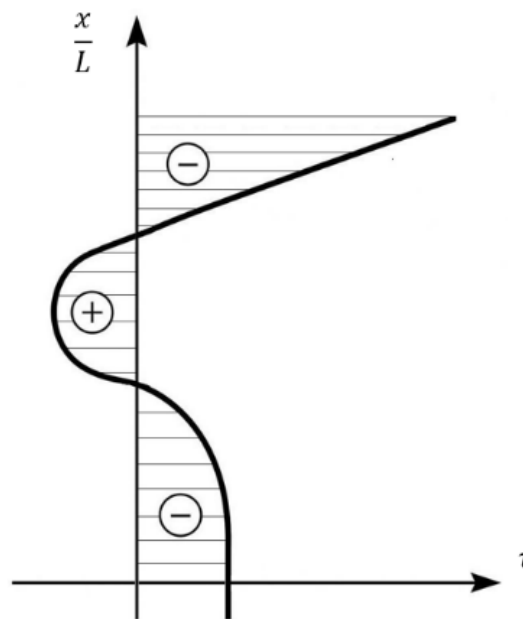


Рисунок 11. Эпюра распределения напряжений сжатия и растяжения в нагреваемом слое капиллярно-пористого покрытия

Примечание – составлено авторами

Итак, на нагреваемой поверхности возникают наибольшие напряжения сжатия. Они уменьшаются с удалением от поверхности, переходят в напряжения растяжения, которые увеличиваются, достигают своего максимума, а затем опять уменьшаются, переходя в малые напряжения сжатия на большой глубине. При высоких q разрушение капиллярно-пористого покрытия может произойти вследствие выкрашивания или от напряжений



сдвига, вызванных сжатием (Genbach, Beloev & Bondartsev, 2021). Разрушение капиллярно-пористого покрытия обычно происходит откалываем частиц от их поверхности (рис. 6).

Сечения, в которых возникают $\sigma_{\text{раст}}^{\text{max}}$, лежат на расстоянии $0,2 \div 0,3$ расчетной толщины от нагреваемой поверхности, что зависит от τ и λ .

При $\frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 1$ имеем $\frac{\sigma_p}{\sigma_{\text{сж}}} = 0,52$, а при $\frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 20$ – $\frac{\sigma_p}{\sigma_{\text{сж}}} = 0,3$. В слое капиллярно-пористого покрытия должны возникать достаточные разрушающие его напряжения за время τ , равное или меньшее, чем необходимо для возникновения максимального возможного в данных условиях напряжения, т.е. $\tau_{\text{сж}}^{\text{раз}} \leq \tau_{\text{сж.мак}}^{\text{раз}}$; $\tau_{\text{рас}}^{\text{раз}} \leq \tau_{\text{рас.мак}}^{\text{раз}}$.

Величины q и α должны быть такими, чтобы напряжения в слое, а следовательно, и его разрушение возникали раньше, чем будут достигнуты предельные возможные напряжения (рис. 6).

Аналогия процесса разрушения различных материалов вытекает из следующих соображений. Скорость разрушения ϑ капиллярно-пористого покрытия:

$$\vartheta = \frac{q}{c \cdot \rho \cdot \Delta t}, \text{ м/с,}$$

где: $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{раз}}$.

Увеличение ϑ при уменьшении Δt связано с тем, что при нагревании покрытия температура на поверхности $t_{\text{ст}}$ и на внешней поверхности разрушаемого слоя $t_{\text{раз}}$ в результате интенсивного подвода тепла q становятся близкими. Это способствует объёмному разрушению покрытия и разрушению слоя определенной толщины.

Температура поверхности нагрева кварца и кварцсодержащих пород должна быть не более 1350 °С, так как при температуре $(1200 \div 1350)$ °С α -кварц переходит в α -кристобалит в отсутствие плавления быстро и с увеличением объёма на $+17,4$ %.

Другая фаза превращения – это переход при 870 °С α -кварца в α -тридимит, но это дает объёмное расширение на $+12,7$ %.

Максимальная скорость разрушения будет иметь место при $\Delta t = (100 \div 200)$ °С, $q > (2 \div 3) \times 10^6$ Вт/м² и составит для кварца $(5 \div 15)$ м/час для $\rho = (2500 \div 2700)$ кг/м³ и $c = (1 \div 1,2)$ кДж/(кгК).

При росте q и α необходимо учитывать, что происходит запаздывание возникновения $\sigma_{\text{раст.мак}}$ относительно начала нагрева поверхности, иначе для вязких капиллярно-пористых покрытий, например туф (Genbach et al. 2025), может возникнуть преждевременное плавление материала. Интерферограммы характеризуют деформации и напряжения в покрытиях. Оптические методы исследования (Monoj et al. 2025) позволяют прогнозировать (Jansson, Andersson & Karlsson, 2022) надежность работы покрытий и выявить механизм в их работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применен способ образования порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение природного материала и повысить выход мелких фракций в диапазоне гранулометрического состава $(0 \div 2) \times 10^{-3}$ м.

На основе анализа голографических интерферограмм обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц. В механизме разрушения к упругому поведению материала добавляется дополнительные аналитическим решением термоупругостной задачи, что позволило уточнить механизм процессов в покрытиях и рассчитать предельные удельные тепловые потоки и напряжения. Выделена точка отчета в виде остаточной деформации в материале, обнаружена сеть мелких трещин, которые не исчезали при снятии тепловой нагрузки и наблюдались на поверхности. Это позволяет иметь прогноз поведения



материалов в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывать состояние прочности. Нелинейность подчеркивает, что к упругому поведению материала добавляется его пластичность, а этот факт мог быть зафиксирован только оптическими методами исследования. В дальнейшем требуется расширить исследования по другим природным материалам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование не имело внешнего финансирования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи не использовали инструменты искусственного интеллекта (ИИ) на различных этапах подготовки своей работы, включая помощь в написании текста, редактировании, проверке фактов, а также анализе данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Askalany, A. A. (2017). High potential of employing bentonite in adsorption cooling systems driven by low-grade heat source temperatures. *Energy*, 141, 782e91. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.171>
- Chain-Tsuan, L. (2022). Advanced powder materials for a better world. *Advanced Powder Materials*, 1, 1, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.002>
- Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Genbach, N. A., & others. (2025). Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20, 46. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
- Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloëv, H. I., & others. (2022). Boiling crisis in porous structures. *Energy*, 259, 125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
- Genbach, A., Beloëv, H., Bondartsev, D. (2021). Comparison of cooling systems in power plant units. *Energies*, 14, 6365. <https://doi.org/10.3390/en14196365>
- Jansson, M., Andersson, M., Karlsson M. (2022). High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil-Hydraulic Pipe Flow. *Fluids*, 7(3), 102. <https://doi.org/10.3390/fluids7030102>
- Jian-Jun, G. (2019). The design of thermal management system for hypersonic launch vehicles based on active cooling networks. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113938. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113938>
- Manoj, K., Lavlesh, P., Karmjit, K., Raj, K., Yasuhiro, A., Osamu, M. (2025). Advances in Optical Metrology: High-Bandwidth Digital Holography for Transparent Objects Analysis. *Photonics*, 12(6), 617. <https://doi.org/10.3390/photonics12060617>
- Mi, Z., Wanlin, L., Ba-Yi, C. (2025). A dual path neural network based on spatial correlation and feature weighting for predicting remaining useful life of aero-engine. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 151, 110700. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110700>
- Ting, Z. (2024). Insights into natural tuff as a building material: Effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load. *Engineering Failure Analysis*, 163, 108584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108584>
- Wang, J. (2024). Thermophysical-mechanical behaviors of hot dry granite subjected to thermal shock cycles and dynamic loadings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.09.007>
- Wei, C. (2024). An Investigation into the Compressive Strength, Permeability and Microstructure of Quartzite-Rock-Sand Mortar. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 20, 4, 859–872. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.029310>



- Xinghui, W. (2023). An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>
- Yan, Z. (2024). Investigation on mechanical behaviors and energy characteristics of deep-buried marble in a hydraulic tunnel in Southwest China. *Transportation Geotechnics*, 47, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101270>
- Yan-Hua, H. (2017). Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 4, 912–925. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.007>

Информация об авторах
Авторлар туралы мәліметтер
Information about authors



Генбач Александр Алексеевич – Техника ғылымдарының докторы, «Жылу энергетикасы және физика» кафедрасының профессоры, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

Генбач Александр Алексеевич – Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и Физика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Genbach Alexander Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Heat Power Engineering and Physics, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: a.genbach@aues.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>



Бондарцев Давид Юрьевич – PhD, «Жылу энергетикасы және физика» кафедрасының профессор-оқытушысы, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

Бондарцев Давид Юрьевич – PhD, профессор-преподаватель кафедры «Теплоэнергетика и Физика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Bondartsev David Yurievich – PhD, teaching professor of the Department of Heat Power Engineering and Physics, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: d.bondartsev@aues.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>