



ТЕПЛООБМЕН В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПРИРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю.

Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева

г. Алматы, Республика Казахстан

ORCID*: 0000-0001-8778-7851, d.bondartsev@aues.kz

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование процессов теплообмена в капиллярно-пористых природных покрытиях, создаваемых термическим напылением порошков при их нанесении термоинструментом. В качестве природных материалов выбраны горные породы кварциты, граниты, тешениты, туф и мрамор. Создан термоинструмент со спиновой детонационной струей и разработана технология получения порошков новым способом. *МЕТОДЫ.* Термоинструмент за счет автоматического устройства позволяет управлять режимом создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела. Разработана вытеснительная схема питания инструментом и методика проведения экспериментом. Порошки готовились в специальных формах из системы сопряженных эллиптических поверхностей и различным эксцентриситетом. Технология увеличивает выход порошка класса $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м и повышает степень упрочнения порошка. Горючее дожигалось на покрытии с коэффициентом избытка окислителя $0.6\div 0.8$, до шести раз возрастали удельные нагрузки и составляли $(2\div 15)\times 10^6$ Вт/м². Вязкие породы подвергались оплавлению. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Поперечная скорость участка воспламенения спиновой детонационной факела близка к скорости детонации и вдвое превышала скорость звука в струе. Предельная область тепловых нагрузок для покрытий при поддержании перегрева $(20\div 75)$ К превосходила кипение в тонких пленках, в большом объеме и тепловых трубах. Исследования с помощью голографической интерферометрии показало, что точкой отсчета является остаточная деформация, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц, а детонационное напыление снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц. Природный материал обеспечивает высокую эрозионную стойкость покрытия. Совместные методики исследования с помощью голографии, скоростной киносъемки и аналитического решения позволяют уточнять механизм создания покрытия и получать расчетные значения тепловых потоков и напряжений.

Ключевые слова: природные материалы; покрытия; камера сгорания; термоинструмент; голография, напыление.

Для цитирования: Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Теплообмен в капиллярно-пористых природных покрытиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 206 -217. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-206-217.

HEAT TRANSFER IN CAPILLARY-POROUS NATURAL COATINGS

Genbach A.A., Bondartsev D.Yu.

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev

Almaty, Republic of Kazakhstan

d.bondartsev@aues.kz

Abstract: *RELEVANCE.* Study of heat exchange processes in capillary-porous natural coatings created by thermal spraying of powders during their application with a thermal tool. Quartzite, granite, teshenite, tuff and marble rocks are chosen as natural materials. A thermal tool with spin detonation jet was created and the technology of powder production by a new method was developed. *METHODS.* The thermo-tool due to the automatic device allows controlling the mode of coating creation by changing the burner power and torch length. The

displacement scheme of tool feeding and the methodology of experimentation were developed. Powders were prepared in special molds from the system of conjugate elliptical surfaces and different eccentricity. The technology increases the powder yield of $(0\div 2)\times 10^{-3}$ m class and increases the degree of powder hardening. The combustor was afterburning on the coating with oxidizer excess coefficient $0.6 \div 0.8$, specific loads increased up to six times and amounted to $(2\div 15)\times 10^6$ W/m². The ductile rocks were subjected to melting. RESULTS. The transverse velocity of the ignition section of the spin detonation plume was close to the detonation velocity and twice the speed of sound in the jet. The thermal stress limit region for the coatings while maintaining superheat of $(20\div 75)$ K was superior to boiling in thin films, large volume, and heat pipes. Studies by holographic interferometry showed that the point of reference is the residual deformation defined by a network of small cracks that do not disappear when the thermal load is removed. CONCLUSION. A nonlinear particle displacement curve was found, and detonation spraying reduces powder particle fracture along the interfaces of unmelted particles. The natural material provides high erosion resistance of the coating. The joint methods of investigation by means of holography, high-speed filming and analytical solution allow to specify the mechanism of coating creation and to obtain calculated values of heat fluxes and stresses.

Keywords: natural materials; coatings; combustion chamber; thermo-intrusion; holography; sputtering.

For citation: Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Heat transfer in capillary-porous natural coatings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 206-217. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-206-217.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Весьма актуально проводить научные исследования теплообмена в капиллярно-пористых природных материалах КПП [1]. В качестве таких материалов выбираются горные породы: кварциты, граниты и тешениты. Из них изготавливаются порошки и наносятся напылением на обложку. На основе физической модели в реальной КПС записываются уравнения теплопроводности термоупругой задачи. Решение проводится для предельных величин тепловых потоков плавления $q_{пл.}$, сжатия $q_{сж.}$ и растяжения $q_{раст.}$, вызывающих соответствующие термические напряжения σ . Модель проверяется экспериментом с использованием скоростной киносъёмки образующихся частиц (шелушке) СКС-1М.

Однако требуется создать термоинструмент с детонационной струей, провести технологию получения порошков, раскрыть механизм протекающих процессов теплообмена и разрушения покрытий.

Построена научная методика исследования с проведением интегрального эксперимента для испытания девяти камер сгорания термоинструмента [2], который предназначен для обработки естественных минеральных сред. Для понимания природы разрушения использована скоростная киносъёмка.

Однако требуется создать технологию нанесения напылением порошков природных материалов (факелы, дробление материалов) и изучить механизм разрушения.

Наряду с изучением природных КПП на предмет их предельного состояния $q_{пред.}$, $\sigma_{пред.}$ [1,2] производятся исследования кризиса теплообмена кипением в КПС металлургических сеток [3,4]. Строится физическая модель кипящего потока с учетом совместного действия капиллярных $\Delta P_{кап.}$ и массовых $\Delta P_{кап+g}$ сил с избытком $m_{ж}/m_{п.}$. Механизм процесса теплообмена познается с помощью голографической интерферометрии и скоростной киносъёмки. Определяются критические удельные тепловые потоки $q_{кр.}$ для разных давлений P через интегральные и термогидравлические характеристики.

Однако не исследован совместный теплообмен в КПП, покрытых КПС.

Проводится разработка метода диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности $T_{ст.}$ с помощи дискретного вейвлет – преобразования взамен традиционному преобразованию Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена [5].

Для настоящего исследования представляет интерес взаимосвязь предельного

состояния КПП и кризиса теплообмена в КПС при смене режима теплообмена, что позволит в режиме реального времени создавать систему диагностики покрытий и структур (ϕ' , $\phi'_{кр}$).

Актуальным является изучения прогресса в механизмах реализации охлаждения поверхностей распылением (струйным способом) [6]. Рассмотрены способы улучшения характеристик путем чередования видов применяемой жидкости, изменением схемы потока, параметров воздуха и воды, расстояния между соплом и поверхностью, применение струйно-инжекционного метода.

Однако требуется исследовать воздействие струйного охлаждения на теплообмен в КПП и КПС, особенно его влияние на природные материалы.

В энергетических технологиях перспективны двумерные наноматериалы [7] как интенсификаторы теплообмена (2-Д материалы). Они могут создаваться в виде пленок, композитов, наножидкостей, материалов на основе графена. Интересны теплопередающие способности при процессах испарения, кипения и конденсации, особенно для тепловых труб.

Однако авторы [7] указывают на определенные трудности при выборе двумерных материалов, требуется дополнительные исследования для их активного применения нами исследуемых КПП и КПС.

В работе [8] численно исследовано турбулентное пламя сгорания газа и воздуха. Горелка частично заполнена пористым материалом. Пламя становится короче и более широким при определенном значении пористости. При большей толщине пористого слоя δ температура распределяется в большем объеме при меньшей длине пламени.

Однако в [8] не ясно размещение и вид пористого материала, в работе нет эксперимента.

В работе [9] разработана пористая решетчатая структура, работающая при соударении струи. Высота h структуры $(4\div 12)\times 10^{-3}$ м, пористость ε $(0.52\div 0.92)$ и скорость струи V $(1\div 4)$ м/с. Теплообмен возрастал с уменьшением пористости, и имел оптимум при высоте решетки 6×10^{-3} м. Теплообмен на 35% больше, чем у ребристой структуры, и улучшался за счет интеграции структуры и воздействия струи.

Исследование [9] трудно применить для процесса нанесения напылением покрытия.

Проведены испытания [10] на влияние высоких температур на сжатие образцов гранита с тремя отверстиями, от 450 °С до 900 °С. Изменился цвет, объем гранита увеличился, масса уменьшилась, плотность ρ снизилась. Прочность сначала увеличивалась, а потом снижалась, модуль упругости уменьшался. Пик деформации резко возрастал после 450 °С. 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 они связаны с температурой термообработки.

Данное исследование [10] представляет интерес для случая применения напыления порошков горных пород для создания покрытий, а также для применения голографии, СКС-1М и термоупругости для понятия механизма слияния трещин. Исследовались характеристики пористой структуры гранитов при различных режимах охлаждения на основе технологии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [11]. 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.

Однако необходимо провести исследования напыления порошка гранита с целью образования природного покрытия термоинструментом и эксплуатации покрытия для различных удельных тепловых нагрузках q , включая предельные $q_{пред.}$ и степени перегрева покрытия ΔT , $\Delta T_{кр}$.

Напыление порошков производится в основном [12-15] на установках с электрической дугой и взрывными веществами, с применением плазмотронов с

электродуговой металлизацией и с помощью газопламенных горелок, работающих с малыми скоростями истечения применительно в подавляющем большинстве случаев к металлам и их сплавам.

Существующие сверхзвуковые горелки являются плазмотронами с электрической дугой весьма большой мощности N_3 ($> 40 \div 50$ кВт) и работающие при высоких температурах T ($> 3 \div 4$) $\times 10^3$ К и до 10^5 К), сами требующие системы охлаждения подложки [12].

Однако в литературных источниках нет единой модели по предельным тепловым нагрузкам и термическим напряжениям σ , которая позволит рассчитывать тепловые потоки плавления $q_{пл.}$, сжатия $q_{сж.}$ и растяжения $q_{раст.}$, время τ полета частиц порошка, его размеры и толщину δ покрытия, что требуется разработать.

Весьма мало рассмотрены процессы нанесения напыления порошков из природных материалов. В основном изучаются напыления соединений металлоидного типа оксидных покрытий [12-15].

Не исследованы [12-15] инструменты для напыления природных материалов детонационным высокотемпературным пульсирующим двухфазным факелом на металл с целью создания КПП и КПС для системы охлаждения.

Не рассмотрены интегрированные системы с порошковыми напылением и КПС с кипением, с использованием струйных способов с кипением на покрытии, учитывающие совместный потенциал $\Delta P_{кап+г.}$ [5-15].

Предстоящее исследование [1-4] явится развитием разработок теплоэнергетических установок ТЭУ (выбор теплохолодностеля, вид циркуляции, материала интенсификаторов, давления (разрежения), подвода и вида энергии, ориентации). Разработана область применения новой КПС, состоящей из структур и КПП, многие из которых применяются на предприятиях.

Для управления энергетическими процессами нами предлагается разделить общую энергию на две составляющие: энергию тепловой волны, взрывообразно возникшего парового зародыша, и энергию сжатого парового потока, что также важно для моделирования и аналогии процессов кипения в порах структуры (покрытия) [2,3]. Этот принцип используется для получения порошков.

Поэтому в данной работе разрабатываются режимы регулирования напыления естественных минеральных сред, устанавливаются предельные области тепловых нагрузок, пути интенсификации процесса напыления и управления тепловой волной в термоинструменте и в покрытии, исследуется механизм процессов теплообмена с помощью голографии, фото – и киносъемки, теории термоупругости и интегрального эксперимента.

Из введения читатель должен понять, что было сделано и зачем. Поэтому в нем представляется изучаемая проблема и поясняется, что является самым важным в вашем исследовании и по какой причине.

Материалы и методы (Materials and methods)

Термоинструмент для напыления нанесением порошка покрытия представлен на рисунках 1, 2 и 3 позволяет производить напыление пульсирующей двухфазной детонационной высокотемпературной струей. Порошком служили частицы минеральной среды (кварцит, гранит, тешенит, мрамор, порфит и туф).



Рис. 1. Установка, выполненная в виде огнеструйной горелки ракетного типа 1. Камеры сгорания и сверхзвукового сопла 2. Охлаждение – КПП

Fig. 1. Installation made in the form of a rocket-type flame-jet burner 1. Combustion chamber and supersonic nozzle 2. Cooling - CPC

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

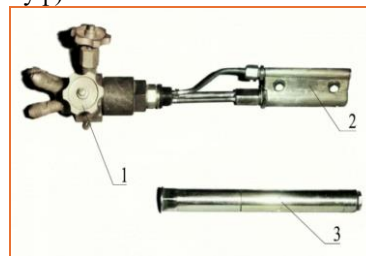


Рис. 2. Установка 1 для производственной линии. Обозначения см. на Рис. 1

Fig. 2. Installation 1 for the production line. See Fig. 1 for designations

Термоинструмент (см. рис. 1,3) за счет автоматического устройства позволяет

управлять режимами создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела L . Контролируется качество покрытия и экономится расход горючего и окислителя. Вязкие и высокопористые материалы (туф) напылялись с оплавлением покрытия.

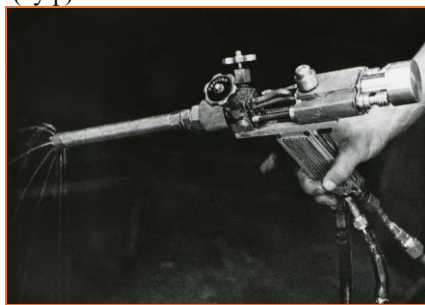


Рис. 3. Термоинструмент с встроенным автоматическим устройством в ждущем режиме

Fig. 3. Thermal tool with integrated automatic device in standby mode

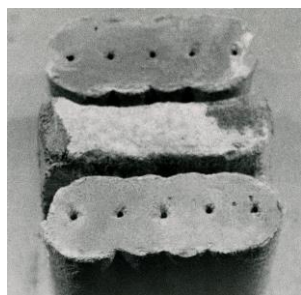
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для проведения эксперимента с ракетными горелками (инструментом) применялась вытеснительная схема питания горелки (вода из баллона вытеснялась воздухом). В качестве горючего использовали керосин, окислителя – кислород. В системе охлаждения применялись вода и пористые покрытия.

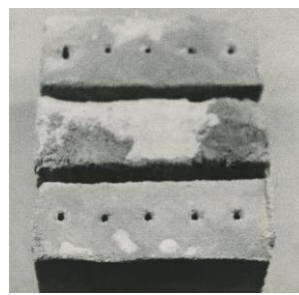
Тепловые потоки q струи термоинструмента измерялись датчиком из медного цилиндра, которому с торца подводится q , а с другой стороны, торец охлаждается водой. Поверхность цилиндра теплоизолирована керамикой на основе диоксида циркония. В цилиндре размещаются две хромель-алюминиевые термопары. Цилиндр крепился к покрытию с площадью, большей пятна торможения.

Для определения удельных тепловых потоков q на оси струи и в пятне торможения (на покрытии) по радиусу r измерялся расход G , давление P и температуры T охладителя, с целью сведения теплового баланса.

Порошки из природного материала приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа [1-4]. 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, представляющих собой замкнутый объем, ограниченный в одном случае системой сопряженных эллиптических поверхностей, в фокусах которых расположены шпury (модель №2), а в другом случае ограниченный прямолинейными свободными поверхностями (модель №1) (рис. 4).



А) Модель №1
A) Model №1



Б) Модель №2
B) Model №2

Рис. 4. Общий вид моделей:

А) Модель №1 с эллиптическими свободными поверхностями,
Б) Модель №2 с прямолинейными свободными поверхностями

Fig. 4. General view of the models:

A) Model №1 with elliptical free surfaces,
B) Model №2 with rectilinear free surfaces

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Модель А), рис. 4 состояла из четырех сопряженных эллиптических цилиндров с эксцентриситетом 0.47, в фокусах которых располагались шпury диаметром $d_{ш} 5 \times 10^{-3}$ м глубиной $h 50 \times 10^{-3}$ 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, %.

На рис. 5 представлено распределение по фракциям гранулометрического состава.

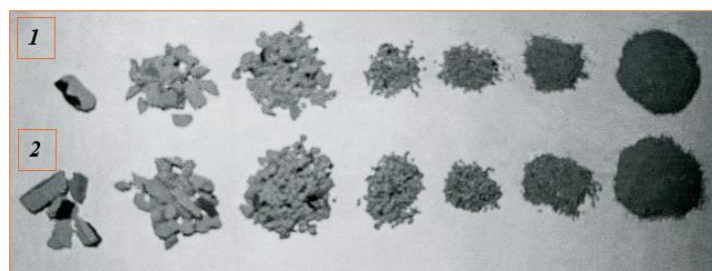


Рис. 5. Распределение по фракциям гранулометрического состава: 1) – для модели с эллиптической свободной поверхностью; 2) – для модели с прямолинейной свободной поверхностью

Fig. 5. Distribution by fractions of granulometric composition: 1) - for the model with elliptical free surface; 2) - for the model with rectilinear free surface

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Величина суммарной вновь образованной поверхности

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

где n – число фракций; P_i – вес каждой фракции, г; γ – удельный вес материала, г/см³; S_0 – первоначальная поверхность модели, см².

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показывают, что для модели №1 выход отдельных классов от 0 до 2×10^{-3} м составил 12.5%, а для модели №2 – 8.6 %. Кроме то, возрастает степень упрочнения частиц порошка. Для проведения экспериментов по влиянию эксцентриситета эллиптических цилиндров на качество дробления (рис. 6, 7) выбирались две модели: Модель №1: $\varepsilon = 0.74$. Модель №2: $\varepsilon = 0.47$.

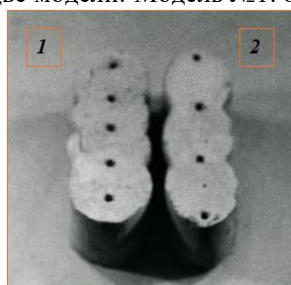


Рис. 6. Общий вид моделей:

- 1) Модель №1 с эксцентриситетом 0.74;
- 2) Модель №2 с эксцентриситетом 0.47

Fig. 6. General view of the models:

- 1) Model №1 with an eccentricity of 0.74;
- 2) Model № 2 with eccentricity 0.47

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показали, что для модели №1 выход класса $(0 \div 2) \times 10^{-3}$ м дает 27.2%, а для модели №2 – 18.2%. Данная технология позволяет увеличивать степень упрочнения порошка.

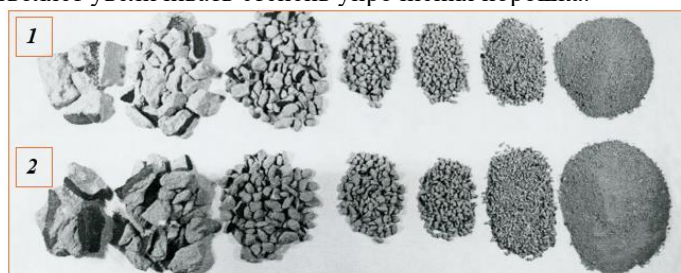


Рис. 7. Общий вид распределения по фракциям массы моделей:

- 1) Модель №1 с эксцентриситетом 0.74;
- 2) Модель №2 с эксцентриситетом 0.47

Fig. 7. General view of the mass fraction distribution of the models:

- 1) Model №1 with an eccentricity of 0.74;
- 2) Model №2 with eccentricity 0.47

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Эксцентриситет эллипса

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

где $2c$ – расстояние между фокусами; $2a$ – длина большой оси. Высота эллиптических цилиндров $h = 95 \times 10^{-3}$ м.

Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: 0.1×10^{-3} м – 3.1%; 0.25×10^{-3} м – 4.2%; 0.5×10^{-3} м – 7.3%.

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разделения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз [2,3].

Использованы детонационные высокотемпературные пульсирующие двухфазные факелы керосино-кислородного термоинструмента, позволяющие дожигать горючее на поверхности покрытия с $\alpha = 0.6 \div 0.8$. Это позволяет существенно увеличить удельные тепловые потоки q при небольшом перегреве ΔT покрытия, которые могут быть до шести раз выше по сравнению с обычным процессом сжигания. Максимальные q на покрытии достигали величины $(2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м² (рис. 8, 9).



Рис. 8. Зарегистрирована структурная спиновая детонация факела (восемь участков) *Fig. 8. Structural spin detonation of the plume (eight sites) recorded*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Граниты, кварциты и тешениты напылялись без оплавления. В то же время вязкие высокопористые материалы преднамеренно подвергались некоторой степени оплавления (туф).

За счет системы управления термоинструментом регулировалась длина L детонационной струи, истекающей из сопла.



Рис. 9. Структурная спиновая детонация факела с вздутием струи на конечном участке *Fig. 9. Structural spin detonation of the plume with jet implosion at the end section*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Частота колебаний давления на покрытии составляла около 200 Гц, процесс напыления протекал стабильно. Температура струи находилась в пределах $(3000 \div 850)$ °С, радиусы струи $r_a = 3 \times 10^{-3}$ м, $r_c = 10 \times 10^{-3}$ м.

Зависимость предельных тепловых потоков q , вызывающих напряжения σ сжатия, растяжения и оплавления различных природных материалов, представлены в работах [1,4]. Определены различные толщины отрывающихся частиц (шелушек) покрытий в зависимости от времени τ подачи теплового потока. Экспериментальное подтверждение проведено за счет скоростной киносъемки СКС-1М, когда определялось время процесса τ и размер оторвавшейся частицы δ .

На рисунке 10 показано взаимодействие детонационного факела с поверхностью. Автоматическая система управления устанавливает оптимальное расстояние струи от среза сопла до покрытия. Формируется оптимальное пятно растекания струи с установкой угла оси горелки к покрытию. Выброс струй воды имеет технологическое значение для формирования покрытия.

Поперечная скорость участка воспламенения спинового детонационного факела (см. рис. 8-10) определяется из наклона к образующей спирального следа. Поскольку угол наклона близок к 45 градусам, то поперечная скорость вдвое превышает скорость звука в газовой струе. На рис. 8 эта волна сделала восемь полных оборотов. Процесс дожигания горючего (керосина) протекает устойчиво на покрытии, непрерывно и наблюдается за ударной волной, а периодичность воспламенения связана с отрывом горения газа от фронта ударной волны.



Рис. 10. Взаимодействие детонационного факела с гранитной поверхностью

Fig. 10. Interaction of the detonation plume with the granite surface

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В целом, стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на покрытии КПП в виде сверхзвукового потока смеси, аналогично процессам в ударных трубах.

Предельная область работы тепловых нагрузок для КПП из естественных (природных) материалов, не имеющих оплавления поверхности, для поддерживаемого перегрева покрытия $\Delta T = T_{ст} - T_n = (20 \div 75) \text{ К}$, дает следующие величины: для тешенитных покрытий – $(2.2 \div 4) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$; для гранитных покрытий – $(4 \div 6.2) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$; для кварцевых покрытий – $(6.2 \div 15) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$. Полученные области q значительно превосходят такие высокофорсированные системы, как кипение в тонких пленках и в большом объеме, кипение в сетчатых фитилях тепловых труб.

Результаты (Results)

Голографический стенд представлен в [3, 4]. Представим интерференционные голограммы КПП, выполненных из гранита с пористостью $\varepsilon = 5\%$, вязкой породы с $\varepsilon = 30\%$ - туфа и мрамора. Покрытия могут создавать среду с различной акустической жесткостью управлять температурным полем в поверхности ограждения (рис. 11).



Рис. 11. Голографические интерферограммы покрытия из туфа

Fig. 11. Holographic interferograms of the tuff coating

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Покрытия с малой пористостью (гранит рис. 12) находятся в сильно напряженном состоянии по сравнению с вязкими и пористыми средами (туф, мрамор, см. рис 11 и рис.

13). Рост q в два раза приводило у них к росту деформации на поверхности до трех раз, тогда как у образцов с большой пористостью – в полтора раза. Количество полос выше у покрытий гранита и мрамора, т.к. в них выше термические напряжения.

Предотвращение разрушения покрытий факелом с совместным действием отраженных волн от интерференции и дифракции волн достигается экранами, показанными на рисунках 11-13.

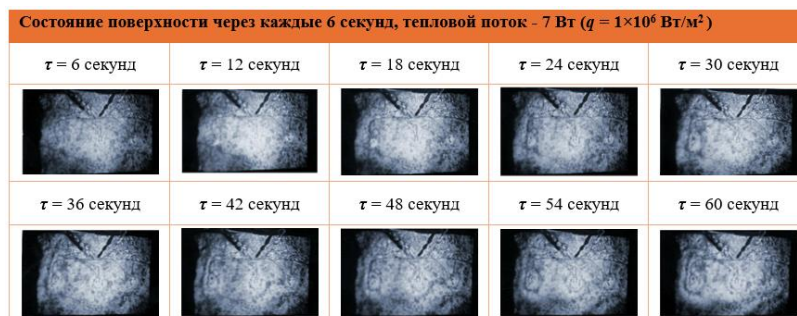


Рис. 12. Голографические интерферогаммы Fig. 12. Holographic interferograms of the покрытия из гранита granite coating

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Интерферогаммы позволили обнаружить на поверхности покрытий дефекты и трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы (см. рис. 13). Более того, в практике даже используется визуальное наблюдение для прогнозирования разрушения.



Рис. 13. Голографические интерферогаммы Fig. 13. Holographic interferograms of the покрытия из мрамора marble coating

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны факела термоинструмента.

Обсуждение (Discussions)

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 минеральных сред при определенных размерах δ частиц и времени подачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия [1-4].

Более того, различные методы термического напыления (атмосферно-плазменный процесс; высокоскоростной кислородо-топливный, высокоскоростной воздушно-топливный [12-15] 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 расплавленные частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы.

Создаваемое термическим способом КПП будет всегда анизотропно, что имеет преимущества в процессе охлаждения, т.к. активнее участвуют капиллярные силы в

равномерности распределения охлаждаемой жидкости.

Для исследования с помощью интерфериметрии точкой отсчета всегда будет остаточная деформация в КПП, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки (см. рис. 11-13).

Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частицы, что положительно влияет на коррозионную стойкость КПП [12-15]. Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа КПП не является основной.

Расшифровка интерферограмм (см. рис. 11-13) для всех покрытий показывает нелинейную кривую перемещения частиц [1-4], причем кислородно-керосиновое напыление имеет преимущество в том, что расплавление частиц на КПП достигается с помощью спинового детонационного факела на поверхности покрытия. Это значительно снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц в КПП.

Для частиц туфа высокая степень расплавления частиц достигается за счет увеличения мощности термоинструмента путем применения спаренных горелок. При этом расплавляется большое количество случайных дефектов при изготовлении КПП, а также имеющиеся пустоты и каверны. Целостность КПП обеспечит самую высокую эрозионную стойкость покрытия.

Заключение (Conclusions)

Исследован процесс создания покрытий из природных материалов гранита, кварцита, тешенита, мрамора и туфа. Применен способ образования порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение материала и повысить выход мелких фракций природных материалов в диапазоне гранулометрического состава $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м.

Создан термоинструмент, имеющий спиновую структуру детонационного факела, дожигаемого на поверхности природного покрытия, и имеющей пульсирующую двухфазную высокотемпературную высокоскоростную струю. Поперечная скорость участка воспламенения спинового факела близка к скорости детонации. Интенсификация теплообмена на природном покрытии превосходит кипение в пленках, большом объеме и сетчатых тепловых трубах.

Анализ голографических интерферограмм показал, что имея точку отсчета в виде остаточной деформации в материале, обнаружена сеть мелких трещин, которые не исчезли при снятии тепловой нагрузки и наблюдались на поверхности. Такие наблюдения служат в качестве прогноза поведения материала в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывают состояние прочности.

Обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц, подчеркивая, что в механизме разрушения к упругому поведению материала добавляется его пластичность, оптические методы исследования, дополненные аналитическим решением термоупругостной задачи позволили уточнить механизм процессов в покрытиях и рассчитывать предельные удельные тепловые потоки и напряжения.

Литература

1. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Моделирование термических напряжений, разрушающих пористые покрытие теплообменных поверхностей энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. № 21(3). С. 117-125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125>
2. Genbach A.A., et al. Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines // Energy. 2020. № 199:117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>
3. Genbach A.A., et al. Boiling crisis in porous structures // Energy. 2022. № 259:125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
4. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Илиев И.К. Пути повышения эффективности охлаждения камер сгорания и сопел ГТУ // Вестник КГЭУ. Т. 13. №3(51). 2021. – с. 114-134.
5. Литвинцова Ю.Е., Кузьменков Д.М., Мурадян К.Ю., Делов М.И., Куценко К.В. Диагностика переходных режимов теплообмена при кипении в большом объеме на основе вейвлет-преобразования температурных флуктуаций // Теплоэнергетика. 2023. № 11. с. 42–53. DOI:10.56304/S0040363623110103
6. Jena M., Mishra P.C., Sahoo S.S. Охлаждение металлических поверхностей распылением: прогресс в механизмах его реализации (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 27–51. DOI:

10.56304/S0040363623080052

7. Дмитриев А.С., Клименко А.В. Перспективы использования двумерных наноматериалов в энергетических технологиях (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 3–26. DOI: 10.56304/S0040363623080015

8. Santiphong Klayborworn, Watit Pakdee. Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 14:100451. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451>

9. Miao Qian, et al. Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 49:103244. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244>

10. Yan-Hua Huang, et al. Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. Iss. 4. pp. 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.007>

11. Xinghui Wu, et al. An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 45:102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>

12. Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 15(3). С. 19-27. <https://doi.org/10.12737/12590>

13. Клинов С.В., Косарев В.Ф., Желнина А.С. Нанесение методом ХГН композиционных (металл – металл) покрытий // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. № 47. С. 135-153. DOI:10.15593/2224-9982/2016.47.08

14. Бабин С.В., Егоров Е.Н., Фурсов А.А. Влияние материала подложки и угла напыления на макроструктуру капиллярно-пористого покрытия из титана // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 3(660). С. 61-67. DOI:10.18698/0536-1044-2015-3-61-67

15. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Антонов Л.А., Корчевин Н.А. Математическая модель тепловых процессов в слое пористого металлического покрытия // Иркутский государственный университет путей и сообщений. Машиностроение и машиноведение. 2015. №2(46). С. 65-68

Авторы публикации

Генбач Александр Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Теплоэнергетика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева». E-mail: a.genbach@aukes.kz, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>.

Бондарцев Давид Юрьевич — доктор философии (PhD), профессор-преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», НАО Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева. E-mail: d.bondartsev@aukes.kz, ORCID: 0000-0001-8778-7851, Тел.: +7-747-231-29-91.

References

1. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Modeling of thermal stresses destroying the porous coating of heat-exchange surfaces of power plants // Power engineering: research, equipment, technology. 2019;21(3):117-125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125>

2. Genbach A.A., et al. Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines // Energy. 2020. № 199:117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>

3. Genbach A.A., et al. Boiling crisis in porous structures // Energy. 2022. № 259:125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

4. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Puti povysheniya effektivnosti okhlazhdeniya kamer sgoraniya i sopol GTU // Vestnik KGEU. T. 13. №3(51). 2021. – s. 114-134.

5. Litvintsova Yu.E., Kuz'menkov D.M., Muradyan K.Yu., Delov M.I., Kutsenko K.V. Diagnostika perekhodnykh rezhimov teploobmena pri kipenii v bol'shom ob'eme na osnove veivlet-preobrazovaniya temperaturnykh fluktuatsii // Teploenergetika. 2023. № 11. s. 42–53. DOI:10.56304/S0040363623110103

6. Jena M., Mishra P.C., Sahoo S.S. Okhlazhdenie metallicheskih poverkhnostei raspyleniem: progress v mekhanizмах ego realizatsii (obzor) // Teploenergetika. 2023. № 8. С. 27–51. DOI: 10.56304/S0040363623080052

7. Dmitriev A.S., Klimenko A.V. Perspektivy ispol'zovaniya dvumernykh nanomaterialov v

energeticheskikh tekhnologiyakh (obzor) // Teploenergetika. 2023. № 8. S. 3–26. DOI: 10.56304/S0040363623080015

8. Santiphong Klayborworn, Watit Pakdee. Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 14:100451. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451>

9. Miao Qian, et al. Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 49:103244. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244>

10. Yan-Hua Huang, et al. Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. Iss. 4. pp. 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.007>

11. Xinghui Wu, et al. An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 45:102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>

12. Kravchenko I.N., Karelina M.Yu., Zubrilina E.M., Kolomeichenko A.A. Resursoberegayushchie tekhnologii polucheniya funktsional'nykh nanostrukturirovannykh pokrytii vysokoskorostnymi metodami naneseniya // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. № 15(3). S. 19-27. <https://doi.org/10.12737/12590>

13. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zhelnina A.S. Nanesenie metodom KhGN kompozitsionnykh (metall – metall) pokrytii // Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. 2016. № 47. S. 135-153. DOI:10.15593/2224-9982/2016.47.08

14. Babin S.V., Egorov E.N., Fursov A.A. Vliyanie materiala podlozhki i ugla napyleniya na makrostrukturu kapillyarno-poristogo pokrytiya iz titana // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie. 2015. № 3(660). S. 61-67. DOI:10.18698/0536-1044-2015-3-61-67

15. Dement'ev A.I., Podoplelov E.V., Antonov L.A., Korchevin N.A. Matematicheskaya model' teplovykh protsessov v sloe poristogo metallichesкого pokrytiya // Irkutskii gosudarstvennyi universitet putei i soobshchenii. Mashinostroenie i mashinovedenie. 2015. №2(46). S. 65-68

Authors of the publication

Aleksandr A Genbach — NCJC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev».

David Yu Bondartsev — NCJC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev».

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 16.03.2025 г.

Отредактировано 27.03.2025 г.

Принято 01.04.2025 г.