https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-73

МРНТИ: 44.31.31

BY 4.0
Check for updates

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ГОРЯЧИМ ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Аннотация: *Исследованы предельные тепловые нагрузки для системы охлаждения с покрытиями из природных материалов в зависимости от избытка окислителя, характеристик термоинструмента и свойств природных материалов. Исследования имеют значение для материалов, работающих с оплавлением и без него (туф, мрамор). Выбран термоинструмент и условия наплавления порошка. Разработана вытеснительная схема питания термоинструмента и условия проведения эксперимента. Рассмотрены процессы деформации и разрушения покрытий методом голографии. Зафиксирована структура факела детонационной струи, коэффициент избытка окислителя на преграде меньше единицы и происходит дожигание горючего, до 6 раз интенсифицируется процесс напыления частиц. Удельные тепловые потоки на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 по оси струи на расстоянии от среза сопла 4×10^{-2} м. Созданы экраны от детонационных высокотемпературных струй, препятствующие разрушению. Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения для покрытий из туфа и мрамора. Показано разрушение покрытия, в котором образовалась каверна размером 2,5×10^{-3} м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке 1,2×10^6 Вт/м^2. Голографические исследования моделируют возможный процесс деградации покрытия и прогнозируют срок его службы.*

Ключевые слова: *теплообмен, природные материалы, покрытия, термоинструмент, деформация, голография.*

Введение

Проведено исследование покрытий из минеральных сред (гранит, кварцит и тешенит) при интенсивном тепломассопереносе вплоть до их предельного состояния (разрушения) [1]. Получены аналитические зависимости удельных тепловых потоков и удельной энергии разрушения от размера отрывающихся частиц и времени подачи тепла. Однако требуется дальнейшая разработка термоинструмента, подготовка материала для напыления с помощью сверхзвуковых высокотемпературных детонационных волн и исследования процессов деформации и разрушения покрытий.

В работе [2] проведена интенсификация процессов тепломассопереноса за счет их управления при совместном действии капиллярных и массовых сил. Изучался механизм процесса с помощью скоростной киносъёмки, однако в качестве покрытий использовались промышленные (металлургические) сетки, из которых формировались капиллярно-пористые структуры. Поэтому для покрытий из природных материалов потребуются другие способы их нанесения и другие научные методы исследования механизма протекающих процессов.

Исследование термомеханических напряжений применительно к минеральным средам для камер сгорания и сопел термоинструмента дано в работе [3]. Однако подготовка природного материала для напыления и изучения механизма процессов деформации и разрушения покрытий не производилось.

Изучались возможности расширения отвода критических (предельных) тепловых потоков в сетчатых покрытиях [2] и даны расчетные зависимости удельных тепловых нагрузок от режимных и конструктивных факторов, в том числе от внутренних (термогидравлических) характеристик. Однако получение покрытий путем нанесения порошка минеральной среды и изучение прочностных характеристик таких покрытий требуют специальных исследований. Особо отметим вклад в исследования чл. – корреспондента, доктора технических наук, профессора МГТУ им. Баумана Владимира Михайловича Поляева [1-4].

©А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев, М.Д. Ерболатов, 2026

В современной технике находят применение монокристаллические никелевые суперсплавы [5-7] взамен покрытиям. Однако даже столь дорогим образцам свойственна термомеханическая усталость с отчетливой микроструктурной эволюцией. Изучались концентрации напряжения на кончике трещины, которая приводила к отказу образца от напряжения усталости.

В развитии монокристаллических образцов [5] разрабатываются термобарьерные покрытия [8-9] для создания систем защиты газовых турбин [10] для их работы при более высоких температурах газа [11]. Это требует значительных расходов для выявления новых материалов с лучшими характеристиками, чем отраслевой стандарт, стабилизированный иттрием циркония. Однако стратегия в разработке требует длительного эксперимента, интуитивных аргументов, основанных на кристаллографии и моделировании и не может быстро привести к разработке новых материалов. Поэтому природные материалы являются наиболее привлекательными и исследуются в данной работе.

Более того, монокристаллы [5-7] и термобарьерные покрытия [8-9, 11-12] приходится охлаждать потоком охладителя. Покрытия выполнены в виде толстых пленок, толщиной до 2×10^{-3} м из огнеупорного материала. Теплопроводность покрытия определяет падение температуры по всему объёму. Тем не менее, в ожидании более высоких температур, продолжается поиск новых термобарьерных покрытий [5, 8-12].

Таким образом, требуется исследовать процессы термического воздействия детонационного высокотемпературного сверхзвукового факела на природные материалы из минеральных сред (горных пород) таких как мрамор и туф. Необходимо разработать технику и технологию нанесения порошков материалов для создания покрытия на металлической подложке. Для познания механизма процессов деформаций и разрушений материалов будет использоваться метод голографической интерферометрии.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые произведена фиксация структуры детонационного факела за счет укороченного диффузора сопла Лаваля, что позволило значительно интенсифицировать процесс напыления, создать экраны от струй, препятствующих разрушению покрытий и качественно с помощью голографической интерферометрии диагностировать отклонения волн от покрытий, прогнозируя срок их службы. В известных методах не решен вопрос интенсификации напыления детонационного факела и защиты покрытий от генерирующих волн для создания термической устойчивости покрытий, изготавливаемых из природных материалов. Детонация получается с помощью гранул взрывчатых веществ.

Материалы и методы

Условия повторяемости испытаний (воспроизводство эксперимента) и число проведенных экспериментов проводились путем контроля толщины покрытия, которое обычно составляло до $(0{,}5\div1)\times10^{-3}$ м в зависимости от назначения покрытия и необходимости корректировки его путем обработки поверхности. При этом средняя высота микронеровностей составляла $R_z = 5\div10\times10^{-6}$ м. Частицы отбирались по крупности $(0{,}1\div0{,}5)\times10^{-3}$ м. Это позволяло создавать необходимую степень адгезии покрытия. Тепловые потоки измерялись теплоприемником, который состоит из медного цилиндра. Цилиндр с одной торца воспринимает действие газовой струи, а с другой - охлаждается водой. Боковые стенки цилиндра теплоизолированы.

В качестве изолятора используется керамика на основе диоксида циркония. В цилиндре размещены две хромель-копелевые термопары. На милливольтметр подается разность термо-ЭДС, показывающая перепад температур по длине цилиндра. Датчик вмонтирован в охлаждаемую преграду с площадью, превышающей пятно торможения всей газовой струи. При измерении тепловых потоков ведется контроль расходов горючего и окислителя и измеряется давление внутри камеры сгорания.

ЭДС термопар измерялись потенциометром класса точности 0,05.

Расходы охлаждающей и циркулирующей жидкости определялись электрическими ротаметрами типа РЭД с вторичным электронным прибором типа КСДЗ 43 кл. точность 1.

Наибольшая погрешность при измерении расхода жидкости ротаметрами не превышала ±3%.

Коэффициент проницаемости при обобщении опытных данных не превышал ±16%.

Невязка материального баланса между расходом охлаждающей жидкости и конденсата не превышала ±10%.

Максимальная относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи не превышала ±7%.

Максимальная относительная погрешность расчетного значения числа Стэнтона не превышала ±15%. Отклонение экспериментальных точек, которых было более ста, от расчётного уравнения находится в пределах ±20%.

Условия повторяемости испытания оценивались по состоянию материала покрытия после напыления, используя метод обобщения опытных данных по критериальному уравнению теплообмена. Проведено более ста опытов, которые обобщались через критерий теплообмена Стэнтона St, зависящий от числа Рейнольдса Re и геометрии теплообменной поверхности и покрытия (размер пор, толщины покрытия). Это дало достаточную точность (±20%) и повторяемость для многочисленных и целенаправленных результатов эксперимента.

Пористость покрытий составляет 50÷55%, проницаемость покрытий – $1{,}7\times10^{-12}$ м^2.Термоинструмент представляет собой горелку ракетного типа, которая имеет высокотемпературную сверхзвуковую пульсирующую детонационную струю (факел). Порошком служили частицы минеральной среды (туф, мрамор). Покрытия наносились на теплообменную поверхность из меди и нержавеющей стали при температуре факела до 2500÷3500 ^{0}С и скорости потока до 2500 м/с. Схема питания термоинструмента (рис. 1) – вытеснительная. Горючее – керосин. Окислитель – кислород. Система охлаждения – вода, пористые покрытия. Также применялась насосная система [3].

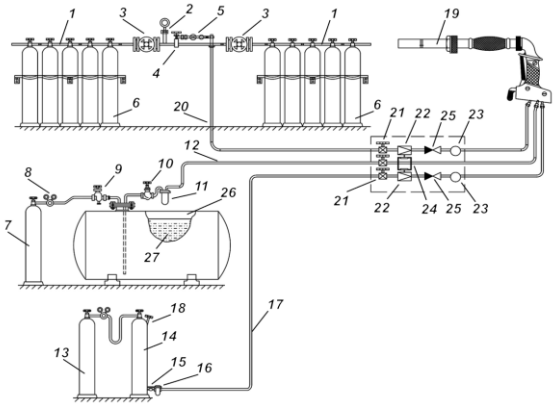


Рисунок 1 – Схема питания термоинструмента

На рисунке 1 приняты обозначения: 1 – коллектор; 2 – манометр; 3 – запорный вентиль коллектора; 4 – запорный вентиль отбора кислорода; 5 – рамповый редуктор; 6 – кислородный баллон; 7 – воздушный баллон; 8 – редуктор давления; 9 – трехходовой вентиль; 10 – запорный вентиль; 11 – водяной отстойник; 12 – водяной шланг; 13 – воздушный баллон; 14 – керосиновый баллон; 15 – запорный вентиль; 16 – керосиновый отстойник; 17 – керосиновый шланг; 18 – пробка; 19 – термоинструмент; 20 – кислородный шланг; 21 – запорные вентили; 22 – командные редукторы; 23 – фильтры; 24 – дроссельная шайба; 25 – обратные клапаны; 26 – воздух; 27 – вода.

Расход компонентов: кислорода при давлении 1,2÷1,5 МПа, 15÷18 м^3/ч; керосина при давлении 1,3÷1,5 МПа, 10÷12 кг/ч; давление подающего воздуха для транспорта порошка, МПа – 0,2÷0,4; расход порошка, г/мин – 5÷10; дистанция напыления, 10^{-2} м – 4÷12, для обеспечения удельных тепловых потоков на поверхности покрытия – 5÷12 МВт/м^2.

Размеры образцов и их геометрия описаны в [1-3]. Химический и минералогический состав природных материалов принимается по справочным данным.

Результаты

Вид спиновой (структурной) детонации в смеси продуктов сгорания керосин – кислород показан на рисунке 2. Поперечная скорость участка воспламенения определяется из наклона к образующей спирального следа, оставляемого волной. Угол наклона близок к 45 градусам, т.е. поперечная скорость близка к скорости детонации.

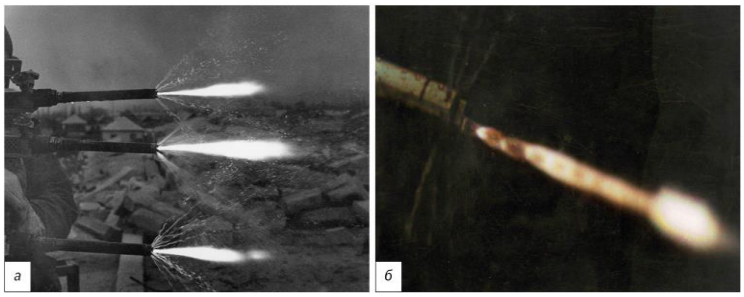


Рисунок 2 – Вид полигона с тремя работающими термоинструментами (*а*) и детонационного факела термоинструмента (*б*). Струи воды имеют технологическое значение

На рисунке 2, *б* – это поперечная волна за детонационным фронтом, периодически появляющаяся в виде световых вертикальных полос. Эту волну называют шлейфом. Она вращается вместе с воспламеняющимся участком фронта и близка к скорости детонации, т.е. почти вдвое превышает скорость звука в сгоревшем газе.

Такое возмущение не может быть простой акустической или ударной волной. На фотоснимке эта волна сделала семь полных оборота.

В наших исследованиях детонация проявляется не в трубке, а в стационарном потоке газа (в свободной струе). Это пример стационарного гидродинамического процесса с горением за ударной волной. Такой процесс устойчив и непрерывен.

Наблюдаемая периодичность воспламенения связана с отрывом области горения газа от факела ударной волны при его резком расширении, вызванном воспламенением [1].

В струе возможно явление пульсирующего горения подобно автоколебательным процессам в детонационных волнах.

Имеющее место задержка воспламенения от температуры приводит к неустойчивости схемы ударная волна – горение, т.к. в отдельных участках фронта ударной волны появляются местные воспламенения. Стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на покрытии и в виде сверхзвукового потока смеси.

Переход горения в детонацию может проходить в процессах нестационарного горения газовых смесей. Физическая причина – взрыв адиабатически сжатой газовой смеси при формировании волн сжатия и ударных волн. Это происходит в неограниченном объёме смеси. Нестационарное адиабатическое сжатие газа вызывается ускорением сгорания при изменении формы поверхности пламени вследствие внутренней неустойчивости течения и внешней турбулизации потока перед пламенем.

Коэффициент избытка окислителя на преграде меньше единицы и происходит дожигание горючего, до 6 раз интенсифицируется процесс напыления частиц. О 6-кратной интенсификации процесса напыления судили по удельным тепловым потокам детонационного факела горелки, создаваемого специальным укороченным соплом горелки, которые сравнивались с обычным факелом. Интенсификация процессов обеспечивается не температурным уровнем покрытия, а плотностью теплового потока. В качестве численной оценки приводится величина q = (5÷12) МВт/м^2, полученная опытным путем.

Режимы возникновения детонации:

1. Увеличение скорости пламени приводит к адиабатическому взрыву смеси в волне сжатия (за счет укороченного сопла Лаваля), см. рисунок 2, *б*.

2. Образование детонации при отражении, созданной перед пламенем волны сжатия от капиллярно-пористого покрытия, аналогично опытам в ударных трубах.

Сопоставление с современными исследованиями по детонационному напылению и диагностике деформаций затруднительно, т.к. в наших исследованиях впервые детонация производится за счет конструкции сопла горелки, а в других работах используются гранулы взрывчатых веществ.

На рисунке 3 представлены частицы природного материала, полученные при обработке массива термоинструментом (рис. 2) для напыления их в виде порошка на теплообменную поверхность.

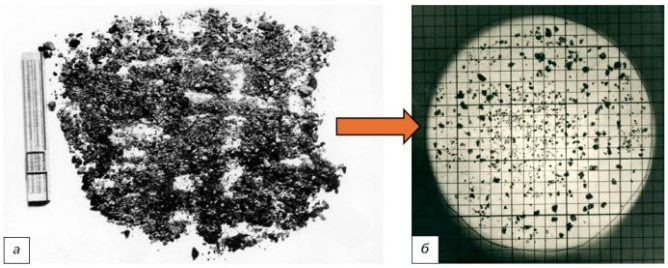


Рисунок 3 – Продукты разрушения, «шелуха» (*а*). Для напыления порошка на металлическую подложку частицы отбирались по крупности (*б*): $0{,}1\times10^{-3}$ м (2,9%); $0{,}25\times10^{-3}$ м (3,8%); $0{,}5\times10^{-3}$ м (7,1%) [3]

Среднеквадратичная шероховатость поверхности (средняя высота микронеровностей), 10^{-6} м, составляла $R_z = 5\div10$. Частицы отбирались по крупности $(0{,}1\div0{,}5)\times10^{-3}$ м (см. рисунок 3, *б*). Величина R_z, техника и технология (рис. 2, 3) создают необходимую степень адгезии покрытия.

На рисунке 4 показано взаимодействие струи с поверхностью обработки покрытия.

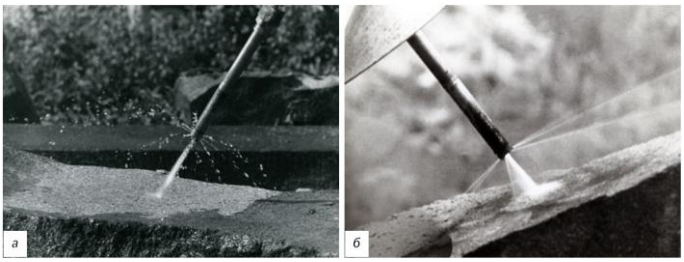


Рисунок 4 – Взаимодействие струи с поверхностью обработки покрытия. Сверхзвуковой высокотемпературный пульсирующий детонационный факел (*а*). Пятно растекания струи на поверхности с определенным радиусом и оптимальной длиной факела от среза сопла (*б*)

Теплотехнические характеристики капиллярно-пористых покрытий по сравнению с другими высокоинтенсивными системами охлаждения представлены в работе [3], которые в диапазоне $\Delta T = T_{ст.} - T_{н.}$ перепада температур (20÷80) К способны отводить удельные тепловые потоки от 2×10^6 Вт/м^2 (тешенитные покрытия) до 1×10^7 Вт/м^2 (кварцевые покрытия). Принято: ΔT – температурный напор (перегрев покрытий), К; $T_{ст.}$ – температура стенки (покрытия), К; $T_{н.}$ – температура насыщения, К.

Удельные тепловые потоки q на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 для $r = 0$ и $l = (4\div12)\times10^{-2}$ м; (2÷5) МВт/м^2 для $r = 4\times10^{-2}$ м и $l = (4\div12)\times10^{-2}$ м. Принято: r – радиус пятна торможения на покрытии (радиус растекания струи, см. рисунок 4, *б*), м; l – расстояние от среза сопла (выходной части) горелки до покрытия, м (см. рисунок 4, *а*).

Обсуждение

Внимание читателя акцентируется на голографии, т.к. научная новизна исследования – в создании экранов от струй, препятствующих разрушению покрытий, что позволяет качественно диагностировать отклонения детонационных волн для покрытий. В противном случае, создав детонационные волны факела, не будет решена задача термической устойчивости покрытий из природных материалов.

Сведения о доверительных интервалах и статистической достоверности детально изложены в наших исследованиях [1-3], причем в работе [2] уделено внимание по обобщению внутренних (термогидравлических) характеристик теплообмена, когда покрытие входит в состав композитной системы охлаждения.

На покрытии происходит активный процесс кипения. Диагностика деформаций [1, 3] проведена прецизионным способом (голографией), который в практике еще не применяется.

Голографический стенд показан в работе [2]. Голографические интерферограммы (рис. 5, 6) получены методом «на отражение» в реальном масштабе времени и характеризуют механизм процесса в поверхностном слое образца, который можно рассматривать как покрытие массива, из объёма которого от одного (или трех) электрических источников поступает тепловой поток.

Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения. Они имели изломы, если в поверхностном слое образца обнаруживались дефекты, микро- и макротрещины, зародышевые микротрещины, инородные включения, например, газово-жидкие, дислокации, вызванные напряжением при тепловом расширении участка породного слоя. Голографические исследования [2] позволяют моделировать то, что следует ожидать в поведении натурных капиллярно-пористых структур, которым они подвергаются при тепловом воздействии. Появляется понимание и предсказание кинетики разрушения покрытия, моделирование возможного процесса деградации. Моделируется прогнозирование «жизни» покрытия, то есть срок его службы. Например, возможно избежать конструкторам термомеханического усталостного скола и растрескивания покрытия при термоциклировании.

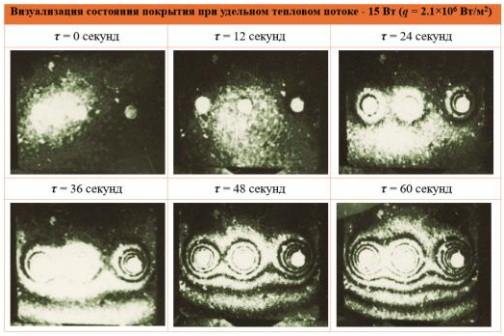


Рисунок 5 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из туфа

При нагреве образца электрическим источником, расположенном внутри (моделирование факела горелки, рис. 4), прилегающая часть покрытия нагревается, а другая ее часть будет иметь исходную температуру. Возникает градиент температуры и покрытие начинает расширяться неравномерно. Окружающие ненагретые части покрытия расширяются также неравномерно. Возникают термические напряжения из-за сопротивления окружающих частей расширению.

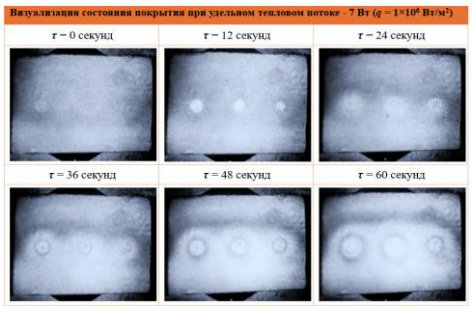


Рисунок 6 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из мрамора.

При нагревании поверхности возникающие напряжения всегда сжимающие. Прочность на сжатие на порядок выше прочности на растяжение и сдвиг, то разрушение вызывается последними напряжениями. Напряжения растяжения могут вызывать разрывы в покрытии в виде трещин, расположенных в плоскостях, перпендикулярных к ее поверхности (рис. 7). Такие трещины тормозят процесс термического разрушения («шелушения»), который состоит в отделении пластинок по плоскостям, параллельным поверхности покрытия. Также пластинки могут отделяться в результате деформации и сдвига.

На рисунке 7 показана фактура поверхности капиллярно-пористого покрытия, в которой образовалась каверна размером $2{,}5\times10^{-3}$ м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке $1{,}2\times10^{6}$ Вт/м^2 [1, 3]. Механизм процесса разрушения (рис. 7) состоит в отделении пластинок по плоскостям, параллельным поверхности покрытия, с участием процессов деформации и сдвига. Поверхности образующихся «чешуек» имеют характерные сколы (срезы), вызываемые касательными напряжениями с образованием трещин, которые ориентированы в направлении максимальных касательных напряжений, что было изучено с помощью электронного микроскопа (рис. 3, *б*).

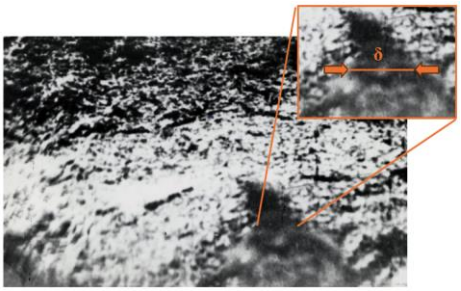


Рисунок 7 – Разрушение покрытия с каверной $\delta = 2{,}5\times10^{-3}$ м, образованной в результате нарушения теплового режима защиты

При достижении различными минералами, составляющими покрытие, определенных температур, от которых зависит физические свойства, в них происходят фазовые (полиморфные) превращения. При этом ряд физических свойств покрытий меняются скачком, и возникают дополнительные напряжения. При температуре 846 К β – кварц переходит в α – кварц.

Анализ голографических интерферограмм произведён качественно в связи с решением задачи научной новизны. Для других целей интерферограммы наряду с теорией термоупругости использовались для определения смещений, деформаций и напряжений [1-3].

Не проводились изображения покрытия и исследования по адгезионной прочности и термоциклической стойкости, т.к. проводилось обобщение теплообмена покрытия с факелом, которое дало достаточную точность и повторяемость многочисленных и целенаправленных результатов эксперимента [1, 3] и [2].

Для устойчивости покрытия к разрушению необходимо иметь небольшой градиент температур и высокий коэффициент теплопроводности, что обеспечит возможно тонкие «шелушки» в случае начала процесса разрушения. Необходимо стремиться использовать режим работы при температуре с минимальными значением коэффициента линейного расширения. Величина теплового потока, требующаяся для хрупкого разрушения, зависит от минералогического состава основы (скелета) покрытия, например наличие калиевого полевого шпата, плагиоклаза хлорита, эпидота и других минералов. Процесс разрушения может меняться от плавления до хрупкого разрушения. Тем более, состав тонкого покрытия на металлической подложке будет отличаться от массива (образца) породы, и зависеть от технологии его получения и нанесения, а само покрытие может иметь преднамеренное оплавление для подобранного режима термоинструмента.

Эффективность термической стойкости покрытия определяется содержанием хрупких и пластичных минералов. Изучение поверхностей «чешуек» с помощью электронного микроскопа (рис. 3, *б*) показало, что они имеют характерные поверхности скола (срезы), вызываемые касательными напряжениями и выражающегося в образовании трещин, ориентированных в направлении максимальных касательных напряжений.

В случае взрыва газово-жидких микровключений в минералах имеет место локальный отрыв. Механизм отделения «чешуек» путем скалывания происходит, когда напряжения сдвига зарождаются на некоторой глубине и от точки к точке выходят на поверхность (режим «шелушения»).

Исходя из описанных механизмов покрытие может шелушиться или плавиться. Добавка в покрытие оксидов циркония и оплавления покрытия существенно расширяет предел его термостойкости. Теплоустойчивость покрытия повышается в случае его охлаждения капиллярно-пористыми структурами, работающими в поле массовых и капиллярных сил [2]. Такие покрытия аналогичны плавящимся теплозащитным покрытиям типа оплавленным однородным стеклообразным материалам, которые получаются за счет работы режима термоинструмента, когда при $\alpha < 1$ догорание углерода горючего в детонационном режиме происходит на поверхности покрытия.

Длительная эксплуатация огнеструйных горелок проводится с 1980 г. на АЗОКе (Алматинском заводе по обработке камня). Минеральные крепчайшие горные породы не подвержены окислению и являются коррозионностойкими.

Заключение

Показано на голографических интерферограммах в реальном масштабе времени, что уменьшается вероятность развития трещин, идущих от отраженной волны. Созданы экраны от детонационных высокотемпературных струй, препятствующие разрушению. Рассмотрены процессы деформаций и разрушения покрытий. Интерференционные линии равных деформаций диагностировали различные отклонения для туфа и мрамора, моделировали возможный процесс деградации покрытий и прогнозировали срок их службы. Зарегистрирована спиновая детонация в смеси продуктов сгорания керосин-кислород, угол наклона близок к 45 градусам, что позволяет производить интенсивно напыления порошков без оплавления, а для вязких материалов – с оплавлением и даже плавлением их поверхности. Показано разрушение покрытия, в котором образовалась каверна размером $2{,}5\times10^{-3}$ м за время 2,2 с при предельном тепловом потоке $1{,}2\times10^{6}$ Вт/м^2. Описаны техника и технология измерений, оценка кл. точности приборов, схем измерения, конструкции измерительных устройств, приборов, расчеты погрешностей при измерении различных параметров, методика обобщения опытных данных по проницаемости и теплообмену покрытий, расчеты невязки при сведении материального и теплового балансов, вопросы аппроксимации, линеаризации, сравнения и обобщения критериальным уравнением процессов гидродинамики и теплопередачи, которые детально изложены в наших работах [1-3], причем в работе [2] уделено внимание по обобщению внутренних (термогидравлических) характеристик теплообмена.

Опираясь на голографические исследования подобное моделирование реальных покрытий поможет проектировщикам избежать термического скола и растрескивания покрытия при мало(много)-цикловой термической усталости материалов покрытий.

Эффективные для напыления порошка удельные тепловые потоки от детонационного факела на поверхности покрытия составляли (5÷12) МВт/м^2 по оси струи (r = 0) на расстоянии от среза сопла $(4\div12)\times10^{-2}$ м, которые в отличии от температурного уровня определяют интенсификацию процесса нанесения напыления. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: $0{,}1\times10^{-3}$ м (2,9%); $0{,}25\times10^{-3}$ м (3,8%); $0{,}5\times10^{-3}$ м (7,1%). Капиллярно-пористая система охлаждения отводила (2÷12) МВт/м^2 при поддержании устойчивого перепада температур, равного (20÷80) К.

Список литературы

1. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces / A.A. Genbach et al // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5.

2. Boiling crisis in porous structures / A.A. Genbach et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076.

3. Genbach A.A. Limiting thermal state of capillary-porous power-plant components / A.A. Genbach, D.Y. Bondartsev // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. – P. 384-389. https://doi.org/10.3103/S1068798X20050093.

4. Polyaev V.M. Boiling of a liquid on surfaces with porous coatings / V.M. Polyaev, B.V. Kichatov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2000. – Vol. 73. – P. 253-258. https://doi.org/10.1007/BF02681726.

5. Zhang J.X. Thermomechanical fatigue mechanism in a modern single crystal nickel base superalloy TMS-82 / J.X. Zhang, H. Harada, Y. Ro // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56. – P. 2975-2987. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.02.035.

6. Shajari Y. Investigation on mechanical properties of nickel open cell metal foam after heat treatment / Y. Shajari, L. Nikzad, M. Razavi // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 16569. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42857-w.

7. Sharifzadeh A.M. Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement using electrodeposited open-cell metal foam / A.M. Sharifzadeh, H. Moghadasi, H. Saffari // International Journal of Thermal Sciences. – 2022. – Vol. 176. – P. 107536. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107536.

8. Liu B. Advances on strategies for searching for next generation thermal barrier coating materials / B. Liu, Y. Liu, C. Zhu // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35. – P. 833-851. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.11.016.

9. Esmaeilkhanian A.H. Thermal barrier coating with improved durability: An overview of doped, nanostructured, multilayered, and gradient-structured zirconia-based thermal barrier coatings / A.H. Esmaeilkhanian // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 37. – P. 107514. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107514.
10. Rajendran R. Gas turbine coatings – An overview / R. Rajendran // Engineering Failure Analysis. – 2012. – Vol. 26. – P. 355-369. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.007.
11. Clarke D.R. Thermal barrier coating materials / D.R. Clarke, S.R. Phillpot // Materials Today. – 2005. – Vol. 8. – P. 22-29. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70934-2.
12. Vaßen R. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings: Current Status and Trends / R. Vaßen, E. Bakan, D.E. Mack // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31. – P. 685-698. https://doi.org/10.1007/s11666-022-01330-2.

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*, М.Д. Ерболатов
Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байтурсынұлы көшесі 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН АЛЫНҒАН ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН ЖАБЫНДАРДЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ГОЛОГРАФИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Табиғи материалдардан жасалған жабындары бар салқындату жүйесінің шекті жылулық жүктемелері тотықтырғыш артығының коэффициентіне, жылу құралының сипаттамалары мен материал қасиеттеріне байланысты зерттелді. Зерттеулер бет балқуымен және онсыз жұмыс істейтін материалдарға (туф, мрамор) маңызды. Жылу құралы мен ұнтақты жалату шарттары таңдалды, жылу құралын қоректендірудің ығыстыру схемасы және эксперимент жүргізу шарттары әзірленді. Жабындардың деформациясы мен бұзылу үдерістері голография әдісімен қарастырылды. Детонациялық ағын алауының құрылымы тіркелді; кедергідегі тотықтырғыш артығының коэффициенті бірден аз, жанармайдың кейінгі жануы орын алды, бөлшектерді шашырату үдерісі 6 есеге дейін қарқындалды. Жабын бетіндегі меншікті жылулық ағындар сопло кесігінен 4×10^{-2} м қашықтықта ағын осі бойынша (5÷12) МВт/м² құрады. Бұзылудың алдын алатын жоғары температуралы детонациялық ағындардан қорғайтын экрандар жасалды. Тең деформациялардың интерференциялық сызықтары туф пен мрамор жабындарының әртүрлі ауытқуларын диагностикалады. Шекті жылулық ағын $1,2\times10^{6}$ Вт/м² кезінде 2,2 с ішінде өлшемі $2,5\times10^{-3}$ м каверна пайда болған жабынның бұзылуы көрсетілді. Голографиялық зерттеулер жабынның ықтимал деградация үдерісін модельдейді және оның қызмет мерзімін болжайды.

Түйін сөздер: *жылуалмасу, табиғи материалдар, жабындар, жылу құралы, деформация, голография.*

A.A. Genbach, D.Yu. Bondartsev*, M.D. Yerbolatov
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov str., 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

HOLOGRAPHIC INVESTIGATION OF THERMAL STABILITY OF COATINGS FROM NATURAL MATERIALS PRODUCED BY THE DETONATION METHOD

The limiting heat loads for a cooling system with natural material coatings were studied as a function of oxidizer excess ratio, thermal tool characteristics, and material properties. The study is applicable to materials operating with and without surface melting (tuff, marble). The thermal tool and powder deposition conditions were selected, and a displacement-type fuel supply scheme with corresponding experimental conditions was developed. Coating deformation and failure processes were analyzed by holography. The detonation jet flame structure was recorded; the oxidizer excess coefficient at the obstacle was below unity, causing fuel afterburning and up to 6-fold intensification of particle deposition. Specific heat fluxes at the coating surface reached (5÷12) MW/m² along the jet axis at 4×10^{-2} m from the nozzle exit. Protective screens against high-temperature detonation jets were developed to prevent coating failure. Equal-deformation interference fringes revealed differing deflections for tuff and marble coatings. Failure was demonstrated in a coating where a cavity of 2.5×10^{-3} m formed within 2.2 s at a limiting heat flux of 1.2×10^{6} W/m². Holographic studies simulate the potential coating degradation process and enable service life prediction.

Key words: *heat transfer, natural materials, coatings, thermal tool, deformation, holography.*

Сведения об авторах

Александр Алексеевич Генбач – д.т.н., проф., каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – докторант каф. «Теплоэнергетика и Физика», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Алексеевич Генбач – т.ғ.д., проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Маулен Дүйсенбекұлы Ерболатов – PhD докторанты каф. «Жылу энергетикасы және физика», Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Information about the authors

Alexander Genbach – d.t.s., prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: a.genbach@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387.

David Bondartsev – PhD, prof. dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: d.bondartsev@aues.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851.

Maulen Duissenbekuly Yerbolatov – PhD student dep. «Thermal Power and Physics», Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev; e-mail: erbolatovmaulen@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5202-6116.

Поступила в редакцию 05.05.2026
Поступила после доработки 28.08.2026
Принята к публикации 02.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-74

IRSTI: 55.09.29

CC BY 4.0
Check for updates

D.R. Baizhan[1,3], Garip Erdogan[2], T. Alimbekuly[1,4*], N.S. Raisov[1], E.E. Birzhan[1]

[1]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Shakarim, 148
[2]Sakarya University, 54050, Turkey, Sakarya
[3]Shakarim University, 071412, Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20A
[4]D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,
070000, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Serikbayev, 19
*e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com

EFFECT OF PLASMA HARDENING PARAMETERS ON 65G STEEL STRUCTURE AND PROPERTIES

Abstract: *This article presents a study of the effect of plasma hardening parameters on the structure and properties of grade 65G steel. The effectiveness of plasma treatment in obtaining a hardened surface layer through localized high-speed heating followed by self-cooling of the material was demonstrated. The studies were conducted at plasma arc currents ranging from 130 to 150 A and plasma-forming gas flow rates of 0.22-0.25 L/min, which made it possible to evaluate the influence of the technological parameters on the*

©D.R. Baizhan, Garip Erdogan, T. Alimbekuly, N.S. Raisov, E.E. Birzhan, 2026