https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-62

МРНТИ: 44.31.31

CC 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 ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: *Исследованы тепловые нагрузки для пористых покрытий из природных материалов в зависимости от их свойств. Применены из исследованных 26 камер сгорания и сопел устройство и разработана схема питания порошком и термитом для напыления на металлическую поверхность. Нанесение напылением пористых покрытий производилось при коэффициенте избытка окислителя α<1, а горючее дожигалось на поверхности пористого покрытия сверхзвуковыми пульсирующими детонационными высокотемпературными факелами, истекающими из камер сгорания и сопел. Удельные тепловые потоки на покрытии в 2 и более раза выше, чем при обычных струях. Явление детонации является одновременно упрочняющей технологией для создания покрытий. Имеет место структурная спиновая детонация, состоящая из семи участков, а угол наклона поперечной скорости близок к 45 градусам, а сама скорость близка к скорости детонации. Частота колебания давления на покрытии – около 200 Гц. Пористые поверхности имеют более высокие критические нагрузки, хорошо управляемы в области предельных режимов. Теплотехническая оценка покрытий показала их преимущества над традиционными системами. Разработана модель взаимодействия детонационной волны с покрытием, определена температура покрытия.*

Ключевые слова: *тепловые нагрузки, природные материалы, покрытия, детонационный факел, модель, термоинструмент.*

Введение

Поиск новых материалов для изготовления теплозащитных покрытий становится всё более актуальной задачей [1-2] в энергетическом секторе.

Разработан новый никелевый суперсплав, перспективный для применения при 700^{0}С и более. Основным режимом отказа являлись трещины на поверхности сплава. Режимы разрушения оценивались до 760^{0}С, от напряжений растяжения, ползучести, усталости, что явно недостаточно для современных температур цикла [3]. В никелевом суперсплаве четвертого поколения [4] исследовалась зависимость силы ползучести от межфазных дислокаций при температуре 1100^{0}С. Однако данные авторы в более поздней работе [5] переходят на изучение и рекомендацию монокристаллических сплавов. Для упрощения конструкций охлаждающих схем [6] применяют керамические покрытия [7-8], через которые пропускают холодоноситель. Покрытие [7] разработано с помощью процесса плазменного напыления. Смесь стабилизированных иттрием порошков циркония и полиэфиры использовались в качестве покрытия, которое наносилось на подложку из суперсплава на основе никеля. Однако прочность на сцепления пористого покрытия была ниже на 20% по сравнению с термобарьерным покрытием [2, 9].

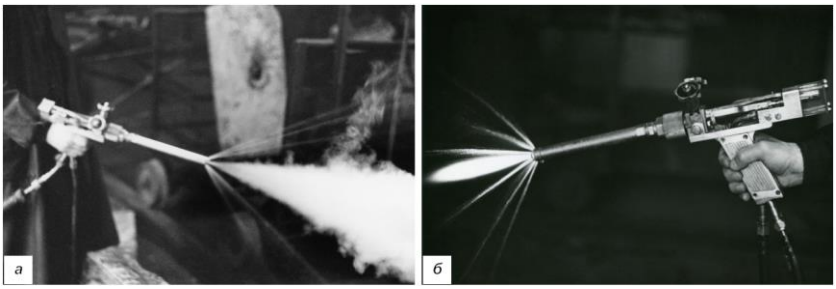
Актуальным является поиск покрытий в виде нанесения на необработанную поверхность меди наночастиц, микрочастиц и микро/наночастиц [10]. Это может привести к интенсификации теплообмена и увеличению (или снижению) отвода критических тепловых потоков. Поэтому представляет интерес исследовать в сочетании минеральные среды (наношкала) [11] и металлургические сетки (микрошкала) [12].

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

Задачей настоящего исследования является изучение процессов формирования и теплового воздействия на пористые покрытия из природных материалов при использовании сверхзвуковых пульсирующих высокотемпературных детонационных факелов. Дополнительно решались задачи разработки схемы подачи порошка и термита, анализа особенностей взаимодействия детонационной волны с покрытием и построения модели, позволяющей определить температурное состояние покрытия в условиях высокотемпературного воздействия.

Материалы и методы

Перспективным тепловым прибором для нанесения порошков природного материала является разработанная горелка ракетного типа (рис. 1), выполненная в виде автоматического пускового устройства с плексигласовой приставкой. Калибратор имеет детонационный наконечник. Вода в виде струй обеспечивает технологические функции.



а – пусковой режим, продувка камеры и сопла; б – режим эксплуатации

Рисунок 1 – Установка для термического напыления покрытий – термоинструмент

На рисунке 2 представлена схема питания термитом или другим порошком природного материала (кварцит, гранит, тешенит, мрамор, туф) термоинструмента: 1 – бункер из термита или другого порошка; 2 – воздушное сопло; 3 – порошок; 4 – транспортирующая трубка; 5 – хомут; 6 – термоинструмент.

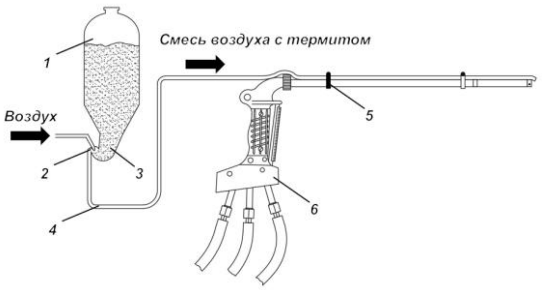


Рисунок 2 – Схема питания порошком природного материала термоинструмента.

Термит применялся в приспособлении для процесса оплавления покрытий из вязких и высокопористых минеральных сред (туф и мрамор). Подача порошка производится из бункера (рис. 2) путем эжектирования его истекающими струями (рис. 1, (*б*)).

Скорость истечения газа определялась при адиабатном расширении (газодинамика потока). Для получения сверхзвуковой скорости потока сопло является комбинированным, т.е. состоит из двух частей: сужающейся и расширяющейся (сопло Лаваля). Максимальный расход газа определяется поперечным сечением горловины – самой узкой части сопла в месте перехода этих частей.

При рассмотрении тепловых потоков допущением являлось принятие поверхности воздействия (покрытия) факелом в виде свободной со всех сторон пластины толщиной $2h$. К поверхности $z = +h$, начиная с момента времени $\tau = 0$, подводится постоянный тепловой поток q. Нижняя поверхность $z = -h$ и боковые края пластины считаются теплоизолированными. Записывалось уравнение теплопроводности [12] с граничными и начальными условиями и определялись тепловые потоки q. Другие допущения приводятся в разделе Результаты: скорость потока известна из газодинамического расчета; статическая температура потока

газа T; коэффициент адиабаты k; молярная масса газа μ; лучистым теплообменом и теплоемкостью пластины пренебрегаем; режим течения в пограничном слое – турбулентный.

Для измерения q использовались теплоприемники, состоящие из медного цилиндра, который с одного торца воспринимал действие газовой струи, а с другого – охлаждался водой. В качестве изолятора использовалась керамика на основе диоксида циркония. В цилиндре размещались две хромель-копелевые термопары. Погрешность измерения q составляла ± 35%.

Результаты

Вид структурной детонации имеет место в смеси продуктов сгорания керосин – кислород термоинструмента в свободной струе (см. рисунок 3). Струя предназначена для нанесения напылением покрытий на металлическую подложку из природных материалов.

В наших исследованиях детонация проявляется не в трубке, а в стационарном потоке газа (в свободной струе, рис. 3, (*а*), (*б*), (*в*), (*г*)). Это пример стационарного гидродинамического процесса с горением за ударной волной. Такой процесс устойчив и непрерывен.

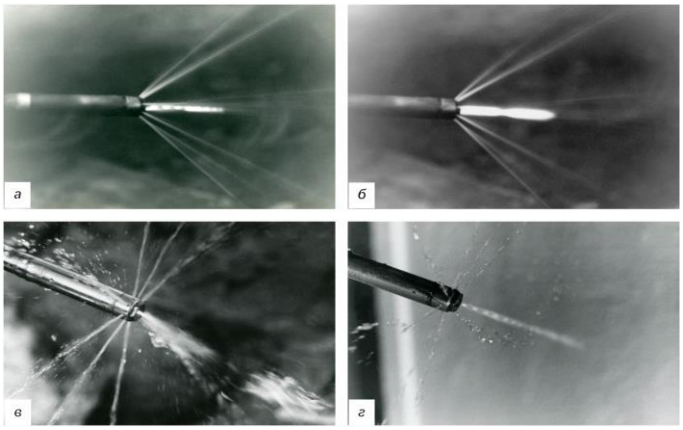


Рисунок 3 – Проявление детонации в стационарном потоке газа (в свободной струе)

На рисунке 3, (*а*), (*г*) – это поперечная волна за детонационным фронтом, периодически появляющаяся в виде световых вертикальных полос. Наблюдаемая периодичность воспламенения связана с отрывом области горения газа от факела ударной волны (см. рисунок 3, (*в*)) при его резком расширении, вызванном воспламенением [11]. На рисунке 3, (*б*) представлен вид структуры затопленной струи термоинструмента.

Удельные тепловые потоки в (2÷6) раз выше, чем для обычной сверхзвуковой высокотемпературной струи. Горючее (керосин) дожигается на покрытии.

Анализ влияния изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha_{\text{к.}}$ и параметров газового потока на конечный результат приведены в таблице 1. Каждому давлению в камере сгорания $P_{\text{к.}}$ соответствует оптимальное значение $\alpha_{\text{к.}}$, при котором температура T_a и скорость струи W_a на выходе из сопла имеют максимальное значение. Максимальной температуре газа на срезе сопла соответствует $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,87÷0,93, а максимальной скорости истечения $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,7÷0,75.

Таблица 1 – Газодинамические параметры сверхзвуковой струи на выходе из сопла керосино-кислородного термоинструмента.

$\alpha_{\text{к.}}$	$P_{\text{к.}}$ = 1 МПа		$P_{\text{к.}}$ = 1,5 МПа	
	T_a, К	W_a, м/с	T_a, К	W_a, м/с
0,7	2750	2250	2665	2420
0,8	2850	2240	2780	2410
0,9	2685	2220	2830	2400
1	2870	2140	2810	2320

Изменение $\alpha_{\text{к.}}$ от 0,7 до 0,9 практически не влияет на скорость. При $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8÷0,9 с ростом давления $P_{\text{к.}}$ приводит к росту скорости и небольшому снижению температуры на срезе.

Следовательно, оптимальным значением является $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8÷0,9. Принято в области сверхзвуковых течений, что газодинамические параметры берутся из расчета, при этом

эксперимент обобщается с точностью ± (25÷30) %. Одним из вариантов нанесения покрытий может служить применение микровзрывов гранул твердых взрывчатых веществ в детонационной волне (рис. 4).

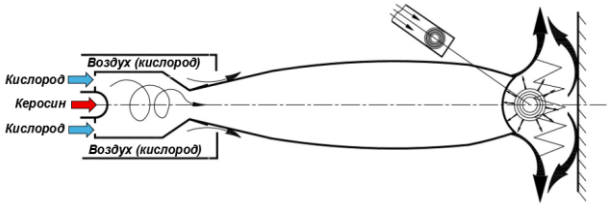


Рисунок 4 – Модель создания капиллярно-пористого покрытия в стационарной детонационной волне

Однако процесс создания капиллярно-пористого покрытия может существенно упроститься при использование детонационных термоинструментов (рис. 1), когда тот же энергетический эффект достигается без взрывчатых веществ. Положение факела показано на рисунке 5.

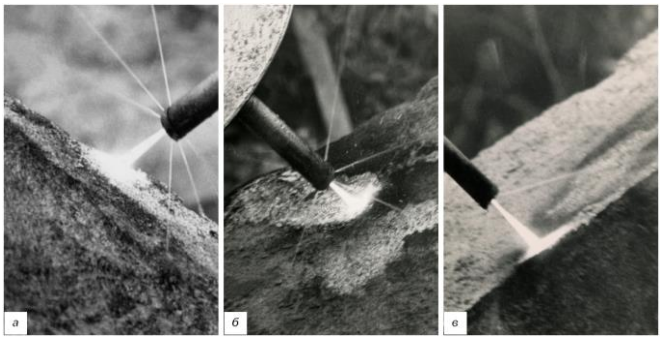


Рисунок 5 – Положение сверхзвукового высокотемпературного детонационного факела к поверхности воздействия покрытия

На фотографии зарегистрирована оптимальная структура факела (а), растекание струи с радиусом пятна торможения (б), длина струи от среза сопла до покрытия (в). Отвод воды от поверхности покрытия осуществлялся согласно технологии изготовления

Режим горения может проходить с оплавлением поверхности, особенно для мягких и высокопористых пород (мраморы, туфы). Детонационная струя (рис. 3, 5) является одновременно и упрочняющей технологией при создании покрытий. На графике (рис. 6), представлено распределение удельных тепловых потоков q в пятне торможения газовой струи радиусом r, см. рисунок 5, б.

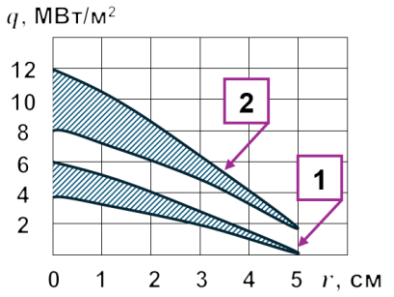


Рисунок 6 – Анализ удельных тепловых потоков

На рисунке 6 заштрихованная область 1 соответствует тепловым процессам для сверхзвуковых факелов в пятне торможения на покрытии при различных методах напыления, а область 2 – сверхзвуковым факелам при исследованном детонационном напылении покрытия. Расхождение q для каждой из областей 1 и 2 отвечает различному расстоянию сопла термоинструмента до капиллярно-пористого покрытия.

В качестве примера определим температуру покрытия $T^*_{\text{ст.}}$. Напыление производится термоинструментом на металлическую подложку в виде тонкой теплоизолированной пластины, продольно обтекаемой сверхзвуковым потоком газа. Скорость газовой струи W известна из эксперимента или из газодинамического расчета. Статическая температура потока газа T. Коэффициент адиабаты k = 1,22; молярная масса газа (продуктов сгорания) μ = 23 кг/кмоль. Лучистым теплообменом и теплоемкостью пластины пренебрегаем. Режим течения в пограничном слое – турбулентный.

Газовая постоянная:

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{23} = 362, \text{ Дж/(кг·К)}. \quad (1)$$

Скорость звука струи:

$$\alpha = \sqrt{kRT} = \sqrt{1{,}22 \cdot 362 \cdot T}, \text{ м/с}. \quad (2)$$

Число Маха $M = W/\alpha$, $M = M_\infty$ (для невозмущенного потока).

Число Прандтля

$$Pr = \frac{4k}{9k-5} = \frac{4 \cdot 1{,}22}{9 \cdot 1{,}22-5} = 0{,}815. \quad (3)$$

Коэффициент восстановления:

$$r = \sqrt[3]{Pr} = \sqrt[3]{0{,}815} = 0{,}93. \quad (4)$$

Температура покрытия (пластины):

$$T^*_{\text{ст.}} = T\left(1 + \frac{K-1}{2} r M^2\right), \quad (5)$$

где $T^*_{\text{ст.}}$ также называется температурой восстановления $T_{r\infty}$ ($T^*_{\text{ст.}} = T_{r\infty}$).

Величину $T_{r\infty}$ также можно записать:

$$T_{r\infty} = T_\infty + r\frac{W_\infty^2}{2Cp_\infty}, \quad (6)$$

где T_∞ или T (статическая температура потока газа) – термодинамическая температура невозмущенного потока, это такая температура, которую показал бы термометр, перемещающийся вместе с потоком с одинаковой с ним скоростью. W_∞ или W – скорость невозмущенного потока (скорость газовой струи), с индексом «∞». Cp_∞ – изобарная теплоемкость невозмущенного потока («∞»), Дж/(кг·К).

Для керосино-кислородного термоинструмента имеем: $\alpha_{\text{к.}}$ = 0,8, $T_a = T_\infty$ = 2780 К; $W_a = W_\infty$ = 2410 м/с; $P_{\text{к.}}$ = 1,5 МПа, где $\alpha_{\text{к.}}$ – коэффициент избытка окислителя; T_a – адиабатная температура на выходе из сопла, К; W_a – скорость истечения газа, м/с; $P_{\text{к.}}$ – давление в камере сгорания, МПа.

Тогда:

$$\alpha = \sqrt{kRT} = \sqrt{1{,}22 \cdot 362 \cdot 2780} = 1{,}12 \cdot 10^3, \text{ м/с}; \quad (7)$$

$$M = \frac{2410}{1120} = 2{,}28. \quad (8)$$

$$T^*_{\text{ст.}} = 2780\left(1 + \frac{1{,}22-1}{2} \cdot 0{,}93 \cdot 2{,}28^2\right) = 4250, \text{ К}. \quad (9)$$

Удельный тепловой поток к стенке (обложке), омываемой высокоскоростным потоком газа, для $Pr \neq 1$, равен:

$$q_w = \alpha(T_{r\infty} - T_w) = \alpha(T_{aw} - T_w), \quad (10)$$

где $T_{r\infty} = T_{aw}$, К; T_{aw} – адиабатная температура стенки (обложки), К; α – коэффициент теплоотдачи от покрытия (пятна торможения) к стенки (обложке), Вт/(м²·К).

Для определения α величины q_w принимаются из эксперимента, либо величины α рассчитывается для условия продольного обтекания сверхзвуковым потоком с поправками на число M и фактор сжимаемости в области турбулентного пограничного слоя. Температура стенки T_w определяется для системы охлаждения (внешняя задача).

Для применяемых ракетных керосино-кислородных горелок q_w = (5÷12) МВт/м² для r = 0 и l = (4÷12)×10^{-2} м, где r – радиус пятна торможения, м; l – расстояние от среза сопла до покрытия, м (см. рисунок 5).

Капиллярно-пористая система охлаждения обеспечивает T_w = 800 + 273 = 1073 К.

Тогда:

$$\alpha = \frac{q_w}{T_{aw}-T_w} = \frac{(5 \div 12) \cdot 10^6}{4250-1073} = (1580 \div 3500), \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}, \quad (11)$$

где $T_{aw} = T^*_{\text{ст.}} = T_{r\infty}$.

Расчет произведён для сверхзвукового потока с учетом коэффициента восстановления r и числа Маха M.

Обсуждение

Теплозащитные покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, в настоящее время рассматриваются как наиболее освоенное решение для газотурбинных установок. Однако повышение рабочих температур перспективных газотурбинных установок до 1200÷1600 ^{0}C требует поиска новых материалов и принципов организации теплозащиты. В предлагаемом подходе защитная система формируется за счёт сочетания металлических сетчатых структур [12] и природных минеральных материалов [11], наносимых детонационным методом на поверхность деталей. Дополнительная эффективность достигается использованием двухфазного охлаждения в капиллярно-пористой среде. Такое сочетание материалов и способов охлаждения ориентировано прежде всего на улучшение теплотехнических характеристик покрытия при сохранении необходимой механической прочности.

Поиск новых покрытий осложняется большим количеством возможных комбинаций компонентов и соединений. В связи с этим в исследовании рассматриваются природные поликристаллические материалы – граниты, кварциты, тешениты, мраморы и туфы. Эти материалы наносятся на металлическую подложку в виде слоёв толщиной от сотен микрон до нескольких миллиметров с применением детонационного напыления. Для отвода тепла используется система охлаждения на основе двухфазного потока и сетчатых структур [12], а также струйное охлаждение. Подобные покрытия обладают низкой теплопроводностью, устойчивостью к эрозии, коррозионному воздействию и агрессивным средам. Кроме того, пористая структура слоёв обеспечивает компенсацию термических деформаций при циклических режимах работы установки.

Разрабатываемая система представляет собой многофункциональную конструкцию, где внешний слой выполняет роль термобарьерной защиты, а внутренние сетчатые элементы обеспечивают интенсивный теплоотвод. Основное внимание при создании покрытия уделяется именно теплотехническим свойствам, поскольку они определяют работоспособность высоконагруженных деталей газотурбинных установок. Вместе с тем проведённые эксперименты показали, что природные минеральные материалы сохраняют достаточную прочность при воздействии детонационного факела. Концепция покрытия основана на объединении подходов теплотехники, минералогии, кристаллографии и материаловедения, что позволяет рассматривать природные минеральные среды как перспективную альтернативу традиционным тугоплавким оксидам.

Современные методы моделирования позволяют сравнивать свойства различных материалов, включая оксиды циркония, пирохлоры, кварцевые стёкла и другие соединения, однако расчётные подходы имеют ограничения. На результаты существенно влияют химическая неоднородность, наличие примесей и пористость, которые трудно учесть при моделировании. Поэтому в данном исследовании основное значение придаётся натурному эксперименту, в котором оценивается работа многослойных покрытий в сочетании с капиллярно-пористой системой охлаждения. Практические испытания позволяют определить, сохраняются ли требуемые теплотехнические свойства при температурах выше 500÷1000 ^{0}C. Полученные результаты показывают, что при высокотемпературной эксплуатации эффективные термозащитные свойства могут обеспечиваться не только материалами с минимальной теплопроводностью, но и покрытиями, характеристики которых изменяются в условиях реальной работы установки.

Заключение

В качестве природных материалов выбирались кварциты, граниты, тешениты, мраморы и туфы, которые превращались в порошки и наносились на металлическую поверхность на разработанном стенде питания и измерения. Термоинструмент позволял создавать мощные пульсирующие спиновые детонационные высокотемпературные струи, которые в (2÷6) раз интенсифицировали процесс образования покрытий от вида напыляемого материала. Горючее дожигалось на поверхности при α = 0,3÷0,8. Детонационная струя являлась упрочняющей, имела семь участков с поперечной скоростью близкой к детонационной. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности (0,1÷0,5)×10^{-3} м. Управление

процессом нанесения напыления заключалось в способе сжигания топлива на поверхности покрытия, регулировании длиной струи, углом наклона струи, отводом охладителя от покрытия. Предельные области удельных тепловых нагрузок для покрытий составили $(2,2÷15)×10^6$ Вт/м^2 при поддерживаемом перегреве покрытий в диапазоне (20÷75) К. Нано- и микроструктуры в виде природных покрытий и сеток дают суммарный эффект, имеют синэргические преимущества их объединения, расширяют предельные нагрузки и управляют технологией получения.

Список литературы

1. Firoozi A.A. Advancing durability in the energy sector: Novel high-temperature resistant coatings and their challenges / A.A. Firoozi, A.A. Firoozi, T. Saidani, // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16. – P. 103431. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103431.
2. Vaßen R. A Perspective on Thermally Sprayed Thermal Barrier Coatings: Current Status and Trends / R. Vaßen, E. Bakan, Mack, D.E. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31. – P. 685-698. https://doi.org/10.1007/s11666-022-01330-2.
3. Zhong Z. Mechanical properties and fracture modes of an advanced Ni–Co-base disk superalloy at elevated temperatures / Z. Zhong, Y. Gu, Y. Yuan // Materials Characterization. – 2012. – Vol. 67. – P. 101-111. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.02.021.
4. Zhang J.X. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138 / J.X. Zhang, T. Murakumo, H. Harada // Scripta Materialia. – 2003. – Vol. 48. – P. 287-293. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00379-2.
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. Yang X. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow / X. Yang, Z. Liu, T. Simon // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 140. – P. 25-40. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109.
7. Arai M. Porous Ceramic Coating for Transpiration Cooling of Gas Turbine Blade / M. Arai, T. Suidzu // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol. 22. – P. 690-698. https://doi.org/10.1007/s11666-013-9883-1.
8. Dhairiyasamy R. Enhancing biodiesel engine efficiency through tungsten carbide ceramic coatings: a performance and emission optimization study / R. Dhairiyasamy, D. Varshney, S. Singh // Discover Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 4. – P. 29. https://doi.org/10.1007/s44245-025-00114-6.
9. Bagathi M.R. O. Coating Characteristics of Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings on Internal Diameter (ID) Surfaces / M.R. Bagathi, R. Vaßen, O. Guillon // Journal of Thermal Spray Technology. – 2025. – Vol. 34. – P. 2918-2938. https://doi.org/10.1007/s11666-025-02042-z.
10. Khan S.A. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces / S.A. Khan, N. Sezer, M. Koç, // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 153. – P. 168-180. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133.
11. 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.
12. 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.

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

КАПИЛЛЯРЛЫ-КЕУЕКТІ ЖАБЫНДАРДЫ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ШАШЫРАТУ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ ҮДЕРІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

Табиғи материалдардан жасалған кеуекті жабындардың жылулық жүктемелері олардың қасиеттеріне байланысты зерттелді. Зерттелген 26 жану камерасы мен саптамадан құрылғы таңдалды және металл бетіне шашырату үшін ұнтақ пен термитпен қоректендіру схемасы

әзірленді. Жабындар тотықтырғыш артығының коэффициенті α<1 кезінде шашыратылды, ал жану камерасы мен саптамалардан шығатын дыбыстан жылдам пульсациялы жоғары температуралы детонациялық факелдер арқылы кеуекті жабын бетінде жанармайдың кейінгі жануы орын алды. Жабын бетіндегі меншікті жылулық ағындар кәдімгі ағындармен салыстырғанда 2 және одан да көп есе жоғары болды. Детонация құбылысы бір мезгілде жабын жасаудың нығайту технологиясы болып табылады. Жеті учаскеден тұратын құрылымдық спинді детонация байқалды; көлденең жылдамдықтың еңіс бұрышы 45 градусқа жақын, жылдамдықтың өзі детонация жылдамдығына жақын. Жабын бетіндегі қысымның тербеліс жиілігі шамамен 200 Гц. Кеуекті беттер жоғары критикалық жүктемелерге ие және шекті режимдер аймағында жақсы басқарылады. Жабындардың жылотехникалық бағалауы дәстүрлі жүйелер алдындағы артықшылықтарын растады. Детонациялық толқынның жабынмен өзара әрекеттесу моделі әзірленді және жабынның температурасы анықталды.

Түйін сөздер: *жылулық жүктемелер, табиғи материалдар, жабындар, детонациялық факел, модель, жылу құралы.*

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

INVESTIGATION OF THERMAL PROCESSES DURING DETONATION SPRAYING OF CAPILLARY-POROUS COATINGS

Heat loads for porous coatings of natural materials were studied as a function of their properties. From 26 investigated combustion chambers and nozzles, a device was selected and a powder-and-thermite feed scheme was developed for spraying onto metallic surfaces. Coatings were deposited at an oxidizer excess coefficient α < 1, with fuel afterburning occurring at the coating surface via supersonic pulsating high-temperature detonation jets issuing from the combustion chambers and nozzles. Specific heat fluxes at the coating surface were at least twice as high as those from conventional jets. The detonation phenomenon simultaneously acts as a hardening technology for coating formation. Structural spinning detonation consisting of seven zones was observed; the transverse velocity inclination angle approached 45°, and the velocity magnitude was close to the detonation velocity. Pressure oscillation frequency at the coating surface was approximately 200 Hz. Porous surfaces exhibited higher critical loads and were well controllable in limiting regimes. Thermotechnical evaluation confirmed their advantages over conventional systems. A model of detonation wave interaction with the coating was developed and coating temperature was determined.

Key words: *heat loads, natural materials, coatings, detonation jet, model, thermal tool.*

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 11.04.2026
Поступила после доработки 14.06.2026
Принята к публикации 16.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-63

IRSTI: 44.09.03

CC BY 4.0
Check for updates

S.M. Akbarova
Azerbaijan University of Architecture and Construction,
Baku, A.Sultanova-11, Az1073, Azerbaijan
e-mail: samira.akbarova@azmiu.edu.az

EVOLUTION OF SCIENTIFIC DISCOURSE AND INVESTMENT PRIORITIES IN RENEWABLE ENERGY INTEGRATION RISKS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Abstract: *The article analyzes the structure of scientific understanding of the risks of integrating renewable energy sources. Based on a bibliometric analysis of 4823 publications of Web of Science database (2015-2025) identified three stable thematic clusters and demonstrated the dominance of the system optimization paradigm under uncertainty. The scientific novelty of the study lies in the development of a system relevance index-a metric for quantitatively ranking risk mitigation strategies based on the topology of a bibliometric network; a gap between scientific priorities and investment practice was identified: for a number of technologies, it reaches +0.6 on a normalized scale. A dynamic analysis of publications over three time periods (2015-2018; 2019-2021; 2022-2025) recorded a shift in the research agenda from regulatory approaches to engineering management of systemic risks. It is shown that grid-forming inverters and machine learning algorithms occupy a central position in the scientific field, ahead of market adoption by 5-10 years, which indicates promising areas for investment policy.*

Key words: *renewable energy integration, system risks, bibliometric analysis, energy storage, system optimization, uncertainty management.*

Introduction

Large-scale integration of renewable energy sources (RES) is a key process in the modern energy transition. According to forecasts by the International Energy Agency, by 2030, RES will account for more than 60% of the increase in global electricity generation, and in a number of countries their share will exceed 50% [1, 2]. At the same time, the growth in the share of RES is associated with systemic technical risks that are fundamentally different from the problems of traditional energy [3]. Three interrelated challenges define the technical agenda for RES integration. The first is generation intermittency: solar and wind installations produce energy intermittently, which requires mechanisms to compensate for imbalances in real time [4]. The second is reducing the inertia of the power system: replacing synchronous generators with inverter devices based on power electronics reduces the physical inertia of the network, accelerating frequency changes during disturbances [5]. The third is overload of the network infrastructure: power flows from decentralized sources create stress at nodes that are not designed for bidirectional transmission [6].

©S.M. Akbarova, 2026