

УДК 621.4

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

**Сибриков Дмитрий Александрович<sup>1</sup>**, заместитель директора Института инженерных и цифровых технологий

*e-mail:* [sibrikov@nsawt.ru](mailto:sibrikov@nsawt.ru)

**Иванчик Сергей Николаевич<sup>1</sup>**, старший преподаватель

*e-mail:* [tkstitm.isn@yandex.ru](mailto:tkstitm.isn@yandex.ru)

**Губин Евгений Сергеевич<sup>1</sup>**, доцент

*e-mail:* [e.v.gubin@nsawt.ru](mailto:e.v.gubin@nsawt.ru)

**Швецов Игорь Витальевич<sup>1</sup>**, заведующий лабораторией Судовых двигателей внутреннего сгорания кафедры Судовых энергетических установок

*e-mail:* [ksdvs@nsawt.ru](mailto:ksdvs@nsawt.ru)

**Тельцов Дмитрий Сергеевич<sup>1</sup>**, учебный мастер кафедры Судовых энергетических установок

*e-mail:* [ksdvs@nsawt.ru](mailto:ksdvs@nsawt.ru)

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

**Аннотация.** Обзор технологий и материалов, используемых для теплозащитных покрытий, недостатки технологий, сложности применения и распространения теплозащитных покрытий, перспективы применения.

**Ключевые слова:** теплозащитные покрытия, плазменное напыление, теплоизоляция деталей камер сгорания

## PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF HEAT PROTECTIVE COATINGS IN HEAT ENGINES

**Sibrikov Dmitriy Aleksandrovich<sup>1</sup>**, Deputy Director of the Institute of Engineering and Digital Technologies

*e-mail:* [sibrikov@nsawt.ru](mailto:sibrikov@nsawt.ru)

**Ivanchik Sergey Nikolaevich<sup>1</sup>**, Senior Lecturer

*e-mail:* [tkstitm.isn@yandex.ru](mailto:tkstitm.isn@yandex.ru)

**Gubin Evgeniy Sergeevich<sup>1</sup>**, Associate Professor

*e-mail:* [e.v.gubin@nsawt.ru](mailto:e.v.gubin@nsawt.ru)

**Shvetsov Igor Vitalievich<sup>1</sup>**, Head of the Laboratory of Marine Internal Combustion Engines, Department of Marine Power Plants

*e-mail:* [ksdvs@nsawt.ru](mailto:ksdvs@nsawt.ru)

**Teltsov Dmitry Sergeevich<sup>1</sup>**, Training Master of the Department of Marine Power Plants

*e-mail:* [ksdvs@nsawt.ru](mailto:ksdvs@nsawt.ru)

<sup>1</sup> Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** Review of technologies and materials used for thermal protective coatings, disadvantages of technologies, difficulties in the use and distribution of thermal protective coatings, application prospects

**Keywords:** heat-protective coatings, plasma spraying, thermal insulation of combustion chamber parts.

Применение теплозащитных покрытий является актуальным в тех случаях, когда требуется оградить детали от воздействия высокотемпературной среды, в частности, в тепловых двигателях. Известны случаи применения теплозащитных покрытий на лопатках газотурбинных двигателей [1], элементах турбин в агрегатах наддува и поверхностях камер сгорания поршневых двигателей внутреннего сгорания. В указанных случаях покрытия должны позволять не только снизить температуру деталей, но и увеличить эффективность работы [2, 3]. Эффективность преобразования теплоты в механическую работу оценивается термическим коэффициентом полезного действия (КПД), определяемым по известной формуле:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – средняя температура подвода теплоты к рабочему телу;

$T_2$  – средняя температура отвода теплоты от рабочего тела.

Для увеличения КПД нужно увеличивать температуру подвода теплоты, и отводить теплоту от рабочего тела при более низкой температуре. Температура отвода теплоты ограничивается, как правило, температурой окружающей среды. Подвод теплоты к рабочему телу происходит в результате сгорания органического топлива.

Конструкционные материалы обладают тепло- и термостойкостью, т.е. способностями сохранять форму и противостоять внешним нагрузкам под действием высоких температур.

Температура в камерах сгорания поршневых двигателей может превышать 2000°C, в камерах сгорания турбин меньше за счет разбавления продуктов сгорания свежим воздухом. Несмотря на то, что импульс температуры в камерах сгорания поршневых двигателей носит кратковременный характер, средняя температура цикла рабочего тела гораздо выше допустимой температуры по условию прочности материала деталей.

Теплозащитные или термобарьерные покрытия должны позволить уменьшить нагрев поверхностей деталей, следовательно, улучшить условия работы, продлить ресурс и дать возможность большую часть теплоты преобразовать в полезную работу, совершаемую машиной.

Таким образом, к материалу покрытия нужно предъявлять требования температуростойкости и низкого коэффициента теплопроводности. Указанным свойствам удовлетворяет оксидная керамика на основе циркония ( $ZrO_2$ ), алюминия ( $Al_2O_3$ ), бориды [4] и карбиды кремния, циркония и хрома. Все материалы являются тугоплавкими, поэтому для образования покрытия из указанных материалов необходим высокотемпературный источник теплоты для их расплавления.

В качестве технологии получения покрытия могут рассматриваться анодное микродуговое оксидирование [5], газодетонационное напыление [6], лазерная наплавка [7] или плазменное напыление [8].

Первый метод подходит для деталей из алюминиевых сплавов и заключается в формировании на поверхности деталей оксидной пленки. Метод ограничен в выборе материала покрытия. Газодетонационный метод может использоваться для материалов с температурой более низкой, чем это необходимо для нанесения керамического покрытия.



Температура в струе плазмы может достигать до 6000°C [9]. Время взаимодействия потока плазмы с порошком, как показывают опыты, является достаточным для расплавления частицы на пути движения от плазмотрона до подложки.

Покрытие, получаемое с помощью плазменного напыления, не является плотным и обладает определенной пористостью [10]. С увеличением толщины покрытия уровень пористости становится ниже. Это связано, видимо, с тем, что долетевшие позже частицы не успевают окончательно сформироваться и остыть, поэтому при увеличении толщины покрытия пор становится меньше. Тем не менее различают открытую пористость (поры выходят на поверхность покрытия) и закрытую (поры внутри слоя покрытия). Открытые поры могут забиваться продуктами сгорания топлива и прочими примесями, что приводит к деградации покрытия и его разрушению. Существуют разные способы борьбы с данным явлением, например оплавление покрытия после нанесения лазером [11], обработка покрытия защитным слоем [12].

Одной из причин, ограничивающих применение оксидных теплозащитных покрытий, является низкий коэффициент теплового расширения. Его значения гораздо ниже, чем для основного материала деталей. Поэтому при увеличении температуры на границе материал-покрытие возникают механические напряжения, которые являются часто причиной его отслоения. В качестве решения этой проблемы применяются так называемые подслои, иногда переменного состава, которые несколько снижают градиент напряжений. В качестве подслоя можно использовать сплавы на основе никеля, хрома, алюминия.

Еще одной особенностью оксида циркония являются полиморфные превращения его структуры. В зависимости от температуры кристаллическая решетка может существовать в моноклинной, тетрагональной и кубической фазе. Каждый из типов решеток обладает своей плотностью и отличающимися физическими свойствами, в том числе и коэффициентом линейного расширения. Для стабилизации решетки вводят добавку оксидов редкоземельных металлов, например иттрия ( $Y_2O_3$ ) до 8% или щелочноземельных металлов: магния ( $MgO$ ) или кальция ( $CaO$ ).

Некоторые зарубежные работы указывают на успешное решение вопроса ресурса теплозащитных покрытий на поверхностях камер сгорания, однако отдельные особенности технологии их получения не разглашаются.

В связи с этим представляются перспективными следующие направления работы: получение материала на основе оксида циркония с более высокими значениями коэффициента линейного расширения и подбор иных материалов, обладающих высоким коэффициентом теплового расширения и термостойкостью при сохранении низкой теплопроводности.

### Список литературы:

1. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, М.В. Куликов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2021. – № 1. – С. 161-172. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023. – EDN UQCDOO.
2. Марченко, А.П. Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС / А. П. Марченко, В. В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 24 – 28. – EDN TSIWMF.
3. Сибриков, Д.А. Снижение теплонапряженности поршневых групп судовых дизелей : специальность 05.08.05 "Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сибриков Дмитрий Александрович. – Новосибирск, 2004. – 18 с. – EDN NHMYCB.



4. Федянин, Н.Е. Формирование градиентного покрытия на основе  $ZrO_2$  на поверхности  $ZrB_2$  иммерсионным методом / Н.Е. Федянин, В.В. Шмаков, И.А. Фотин // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25 – 28 апреля 2023 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 220 – 222. – EDN NBUJTY.

5. Чигринова, Н.М. Тепловая защита поршней высокофорсированным анодным микродуговым оксидированием / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Защита металлов. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 303 – 309. – EDN QCVKAQ.

6. Газодетонационное напыление покрытий поршневых колец двигателя внутреннего сгорания СВС-механокомпозитами на основе карбида титана / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 6(84). – С. 31 – 37. – EDN XVKZQD.

7. Особенности нанесения керамических покрытий из диоксида циркония методом лазерной наплавки / Д.М. Мельников, Т.Е. Бражникова, П.В. Губарева, М.А. Мельникова // XLVI Академические чтения по космонавтике : Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах, Москва, 25 – 28 января 2022 года. Том 2. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – С. 403 – 406. – EDN WOZRQI.

8. Воздушно-плазменное напыление функциональных покрытий / Т.И. Зайко, Б.В. Палагушкин, В.И. Кузьмин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1-3(43). – С. 28 – 34. – EDN TVUNDJ.

9. Гуляев, И.П. Высокогидрофобные керамические покрытия, получаемые методом плазменного напыления порошковых материалов / И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, О.Б. Ковалев // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 615 – 625. – EDN AYWXCR.

10. Анализ влияния пористости плазменных покрытий двигателей на их теплопроводность / Е.С. Губин, Д.А. Сибриков, И.В. Швецов, В.И. Кузьмин // Речной транспорт (XXI век). – 2022. – № 1(101). – С. 46 – 48. – EDN VGTMSS.

11. Ильинкова, Т.А. Поведение теплозащитных покрытий при воздействии лазерного излучения / Т.А. Ильинкова, А.Н. Гурьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 12(132). – С. 31 – 37. – EDN VDFZFP.

12. Гнездилова, А.А. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных ГТД / А.А. Гнездилова // К.Э. Циолковский. История и современность : Материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 20–22 сентября 2022 года. Том Часть 1. – Калуга: Индивидуальный предприниматель Стрельцов Илья Анатольевич, 2022. – С. 397 – 400. – EDN DMCGHN.

