

УДК 629.12

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Загоровский Владимир Викторович<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент

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

Рязановский Павел Дмитриевич<sup>1</sup>, студент

e-mail: [prz1604@gmail.com](mailto:prz1604@gmail.com)

Каменев Кирилл Сергеевич<sup>1</sup>, студент

e-mail: [kamkir03@gmail.com](mailto:kamkir03@gmail.com)

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

**Аннотация.** Целью применения теплозащитных покрытий являются тепловая защита деталей и увеличение термического КПД тепловых двигателей. Для двигателей внутреннего сгорания наибольшее значение имеет защита поверхностей камеры сгорания. Существует множество материалов покрытий из керамики, но наибольшее распространение получила оксидная керамика. Основная технология для получения покрытий – плазменное напыление. Эта технология и материалы имеют ряд особенностей, ограничивающих применение теплозащитных покрытий.

**Ключевые слова:** теплозащитные покрытия, оксидная керамика, плазменное напыление.

## FEATURES OF THE APPLICATION OF HEAT PROTECTIVE COATINGS IN HEAT ENGINES

Zagorovsky Vladimir Viktorovich<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

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

Ryazanovsky Pavel Dmitrievich<sup>1</sup>, Student

e-mail: [prz1604@gmail.com](mailto:prz1604@gmail.com)

Kamenev Kirill Sergeevich<sup>1</sup>, Student

e-mail: [kamkir03@gmail.com](mailto:kamkir03@gmail.com)

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

**Abstract.** The purpose of using heat-shielding coatings is to thermally protect parts and increase the thermal efficiency of heat engines. For internal combustion engines, protection of the combustion chamber surfaces is of greatest importance. There are many ceramic coating materials, but oxide ceramics are the most widespread. The main technology for producing coatings is plasma spraying. This technology and materials have a number of features that limit the use of heat-protective coatings.

**Keywords:** thermal protective coatings, oxide ceramics, plasma spraying.

При сжигании топлива в камерах сгорания тепловых двигателей выделяется энергия, часть которой преобразуется в механическую. Часть энергии идет на нагрев поверхностей, ограничивающих камеру сгорания. В тепловых двигателях камера сгорания ограничивается крышкой цилиндра, стенками цилиндровой втулки и доньшком поршня.

Как правило, для изготовления этих деталей используются легированные стали, чугуны и алюминиевые сплавы, обладающие, благодаря добавкам, повышенной жаропрочностью. Во избежание перегрева деталей и выхода их из строя тепло отводится системой охлаждения. В целях увеличения эффективности использования энергии, выделяющейся при сгорании топлива, было бы оправданно снизить количество теплоты, уходящее с отработавшими газами и с охлаждающей жидкостью. Одним из способов снижения тепловых потерь является применение различного рода теплозащитных покрытий.

К самим покрытиям можно предъявить следующие требования:

- низкая теплопроводность. Ввиду ограниченности объема камеры сгорания, большая толщина покрытия может отрицательно сказаться на изменении объема камеры сгорания, а, следовательно, на протекание процесса сгорания, особенно в дизельных двигателях;
- сопоставимые значения коэффициента линейного расширения материала покрытия и детали.

В процессе эксплуатации дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) подвергаются наиболее интенсивным циклическим тепловым и механическим нагрузкам, что в значительной степени определяет ресурс двигателя в целом, и, кроме того, является наиболее критическим ограничивающим фактором для повышения таких эксплуатационных характеристик двигателя, как удельная мощность и удельный расход топлива. При этом наиболее нагруженной частью ДВС является поршень.

Как показывают расчеты и экспериментальные данные, формирование эффективного теплозащитного покрытия на днище поршня и его жаровом поясе позволяет снизить расход топлива на 5 – 7%, либо повысить мощность двигателя до 8% при условии обеспечения оптимальных свойств теплозащитного слоя. Помимо повышения межремонтного ресурса важной задачей является восстановление деталей ЦПГ с кратным увеличением срока службы (до следующего планового техобслуживания), которая также может быть комплексно решена с применением перспективных методов формирования покрытий на алюминиевых сплавах, в частности, путем формирования износостойких покрытий [1].

Различают следующие способы получения теплозащитных покрытий:

1. диффузионный. Покрытия, получаемые в результате диффузии в защищаемый металл атомов защитного вещества в твердой, жидкой или газообразной фазе при высокой температуре;
2. наплавочный. Покрытия, наносимые методами дуговой или газопламенной наплавки. Метод подходит для нанесения материалов с относительно невысокой температурой плавления наплавочного материала;
3. высокотемпературное окисление. Метод используется для деталей из алюминиевых сплавов и заключается в нагреве поверхности детали и образовании на ее поверхности оксидной пленки [2]. Недостатком материала является низкий коэффициент линейного расширения, что приводит к возникновению напряжений на поверхности раздела детали и покрытия и, как следствие, его отслаиванию;
4. плазменные методы. Методы различаются по давлению в среды, в которой происходит формирование покрытия (атмосферные и вакуумные технологии), по наличию защитной среды. Кроме того, существуют дозвуковые и сверхзвуковые плазмотроны. Плазменный метод нанесения покрытия получил наибольшее распространение по причине более высоких температур, необходимых для расплавления частиц керамики в потоке.



Керамические покрытия характеризуются устойчивостью к воздействию высоких температур, повышенной химической стабильностью и твердостью, низкой средней пористостью, устойчивостью к износу, низкой теплопроводностью [3].

Наибольшее применение в качестве теплозащитных покрытий получил диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) частично стабилизированный оксидом иттрия ( $Y_2O_3$ ). Материал обладает высокой температурой плавления и устойчивостью к термоударам, а также имеет хорошие показатели стойкости к коррозионному и эрозионному воздействию. Есть примеры применения в дизельных двигателях и лопастях турбин для снижения теплопередачи [4]. Данный материал обладает достаточно низким коэффициентом линейного расширения относительно стали, чугуна и алюминиевых сплавов. Поэтому, во избежание отслоений покрытия используют либо так называемые градиентные покрытия, в которых состав покрытия плавно изменяется от материала с близкими к основе коэффициентом линейного расширения до керамического покрытия, либо используют несколько слоев с промежуточными значениями коэффициента линейного расширения [5].

Технология плазменного напыления заключается в подаче наплавочного материала в струю плазмы, перемещения этих частиц к поверхности и образовании покрытия на поверхности подложки. Температура плавления диоксида циркония составляет более  $2500^{\circ}C$ . Чтобы образовать покрытие, частица керамики должна расплавиться. Учитывая малое время пребывания частицы в потоке плазмы, необходима высокая температура. Обеспечить ее можно только в потоке плазмы. Поскольку первоначально от обрабатываемой поверхности, как правило, обеспечивается хороший теплоотвод, то частицы, попавшие на поверхность, быстро твердеют и образуют на поверхности первый слой прилипших капель. Форма застывшей на поверхности отдельной капли будет зависеть от температуры состояния поверхности, условий теплообмена капли с окружающей средой и поверхностью, скорости и температуры капли. Основные этапы застывания капли изображены на рисунке 1.

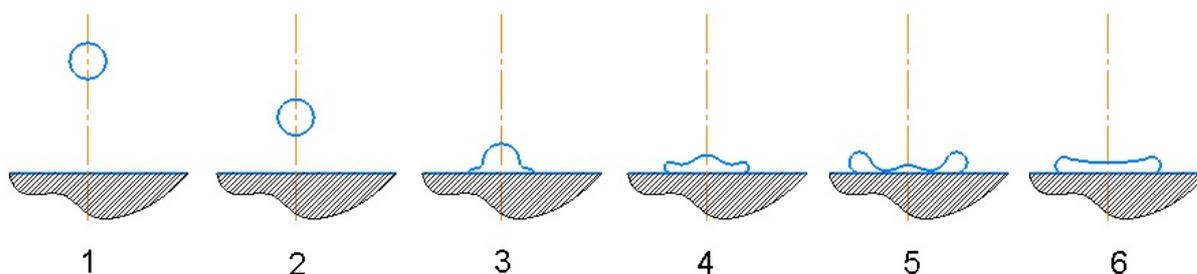


Рисунок 1 – Этапы затвердевания капли на поверхности

Последующие частицы будут взаимодействовать с остывающими, но все еще горячими каплями на поверхности, поэтому время застывания становится больше, а слой – более плотным (с меньшим количеством пор). Есть работы, экспериментально доказывающие, что при увеличении толщины покрытия его средняя плотность становится выше, а пористость ниже [6].

Наплавочный материал подается в поток в виде частиц порошка. Более качественные результаты получаются при подаче относительно узкой по размеру фракции сфероидизированного порошка, т.е. частицы которого имеют форму шара или близкого к ней.

Диоксид циркония является катализатором в реакции восстановления оксидов азота [7]. Это свойство можно использовать для улучшения экологических показателей тепловых

двигателей. Известно, что пиковые температуры в цикле тепловых двигателей могут превышать 2000°C. При такой температуре азот, содержащийся в атмосферном воздухе, начинает окисляться. Оксиды азота являются крайне токсичными и, поэтому, их содержание жестко контролируется [8]. При образовании нагара на поверхностях покрытых теплозащитным покрытием каталитический эффект ослабляется. Так же известны работы, в которых приводятся данные о разрушении покрытия в результате попадания продуктов сгорания топлива в открытые поры на поверхности покрытия.

Подводя итог выше сказанному, можно сделать вывод, что на настоящий момент остается и в ближайшее время наиболее перспективна оксидная керамика на основе частично стабилизированного оксида циркония в качестве материала теплозащитного покрытия. Высокие температуры плавления керамики требуют соответствующих технологий. Наиболее подходящая – плазменное напыление. С целью выравнивания теплового расширения оправданным является применение промежуточных подслоев с градиентными значениями коэффициента расширения. В качестве финишной обработки для снижения разрушения поверхности покрытия можно использовать лазерное оплавление, позволяющее выровнять поверхность и заплавить открытую пористость [9].

### Список литературы:

1. Аль-Бдейри, М.Ш.Х. Повышение эксплуатационных характеристик поршней дизельных ДВС методом гальвано-плазменной модификации: специальность 05.02.07 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль-Бдейри Махмуд Шакир Хассан. – Белгород, 2021. – 20 с.
2. Варрик, Н.М. Оксид-оксидные композиционные материалы для газотурбинных двигателей (обзор) / Н.М. Варрик, Ю.А. Ивахненко, В.Г. Максимов // Труды ВИАМ. – 2014. – № 8. – С. 3. – EDN SJLDIP.
3. Могажи, П.Б. Обзор методов упрочнения керамических материалов, применяемых для изоляции камеры сгорания блока цилиндров автомобильного двигателя / П.Б. Могажи, Т. Жамиру, Д. Десай, Р. Садику // Новые огнеупоры. – 2014. – № 9. – С. 53 – 59.
4. Кузнецов, И.В. Улучшение показателей двигателя внутреннего сгорания с керамическим покрытием на рабочей поверхности цилиндра / И.В. Кузнецов, В.И. Бажанов // Машиностроение и инженерное образование. – 2011. – № 2(27). – С. 22 – 26. – EDN NXNDBV.
5. 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.
6. Губин, Е.С. 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.
7. Неронов, В.А. Диоксид циркония: общие сведения. Фазовые равновесия в системах  $ZrO_2 - CaO$ ,  $ZrO_2 - MgO$ ,  $ZrO_2 - Y_2O_3$ : свойства: препринт/ Неронов Владимир Александрович, Сибриков Дмитрий Александрович; Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН – Новосибирск, 2002. – 49 с.
8. ГОСТ 31967-2012. Межгосударственный стандарт. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. // Консультант: [сайт]. – URL: <https://dsm.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&base=OTN&n=19258&cacheid=986438775B2>



[EBE4465F08F29F07F2DE6&mode=splus&rnd=XQ1yug#pZiaQCUgB6xcVGUI](https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-3-114-119)

(дата

обращения: 11.05.2024)

9. Ильинкова, Т.А. Лазерная обработка плазменных теплозащитных покрытий / Т.А. Ильинкова, С. Л. Балдаев, М. О. Федорова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – Т. 20, № 3(231). – С. 114-119. – DOI 10.36652/1813-1336-2024-20-3-114-119. – EDN CCLTJP.

