

УДК 621.793

**ТЕРМОИЗОЛЯЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ  
КЕРАМИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ**

**THERMAL INSULATION OF ENGINE PARTS WITH CERAMIC  
PLASMA COATING**

**В. С. Ивашко**, д-р техн. наук, проф., **В. М. Изойтко**, канд. техн. наук, доц., **К. В. Буйкус**, канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

V. Ivashko, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
V. Izoitko, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
K. Buikus, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Проведены исследования адгезионной прочности термобарьерных покрытий из оксида циркония, нанесенного плазменным напылением, при термоциклировании, а также испытания двигателя с термобарьерным покрытием на выпускных каналах головки блока цилиндров и выпускном коллекторе. Показано положительное влияние термобарьерного покрытия на эффективность дизеля с турбонаддувом.*

*Researches of the adhesion strength of plasma-sprayed zirconium oxide thermal barrier coatings during thermal cycling, as well as tests of an engine with a thermal barrier coating on the cylinder head exhaust ports and the exhaust manifold are carried out. The positive influence of the thermal barrier coating on the efficiency of a turbocharged diesel engine is shown.*

*Ключевые слова: термобарьерное покрытие, плазменное напыление, покрытие оксида циркония, термоудары, детали двигателя.*

*Keywords: thermal barrier coating, plasma spraying, zirconium oxide coating, thermal shock, engine parts.*

## ВВЕДЕНИЕ

Выхлопные газы с более высокой температурой имеют и большую скорость истечения, что в значительной степени способствует быстрой очистке камеры сгорания, ведущей к повышению ее наполнения воздухом и, следовательно, мощности двигателя. При быстром выводе горячих газов из коллектора в выпускную трубу снижается общая температура подкапотного пространства, а это позволяет снизить температуру воздуха во впускном коллекторе и, как дополнительное положительное действие, снижается изнашивание резиновых и пластиковых деталей.

Напыление термобарьерного покрытия производили в выпускные каналы головки блока цилиндров и на поверхность коллектора. Термобарьерное покрытие представляло собой частично стабилизированное керамическое покрытие из диоксида циркония, нанесенное плазменным напылением.

В статье мы приводим данные об испытаниях устойчивости керамических покрытий к термоударам и их анализ.

Расчеты выполненные на чугуне показывают, что для обеспечения надлежащей изоляции требуется керамический слой толщиной около 3 мм. Эта изоляция соответствует 50 %, т. е. потери тепла уменьшаются вдвое.

## ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Помимо высокой термостойкости, материал, используемый в качестве термобарьера в дизеле должен сохранять свою механическую прочность (достаточная инертность, адекватные механические свойства, физическая совместимость с прилегающим металлом (аналогичное тепловое расширение коэффициенты), высокая устойчивость к тепловым ударам).

Последний пункт очень важен ввиду резких перепадов температуры, которые возникают при работающем двигателе и тепловых изменениях в толстом изоляционном слое.

Керамическое покрытие, состоящее из диоксида циркония, частично стабилизированного 5 % CaO по весу, и подслоя из нихрома NiCr (соотношение 80 % / 20 %), наносили плазменным напылением при атмосферном давлении.

Испытание проводилось на битурбодвигателе Фольксваген (ARE) рабочим объемом 2,7 л и мощностью 250 л.с. На двигатель были установлены головка блока цилиндров, на выпускные каналы которого напылено термобарьерное покрытие, и выпускной коллектор с наружным термобарьерным покрытием.

Максимальная продолжительность испытания была установлена на уровне 100 часов.

Результаты сравнения работы двигателя до и после модернизации следующие:

- снижение удельного расхода топлива не превышает точности измерения;
- повышение температуры газа на выходе (при 1000 мин<sup>-1</sup>) составило +30 °С;
- снижение температуры подкапотного пространства не менее 10 °С.

В таблице 1 представлены результаты исследования прочности сцепления покрытий толщиной 1 мм при изменении количества термоциклов – термических ударов с перепадами в 1000 °С.

Таблица 1

Параметр	Количество термоциклов, ед.					
	0	2000	4000	6000	8000	10000
Прочность сцепления покрытия толщиной 1 мм, МПа	10,85	10,26	10,11	9,82	9,59	9,49

Как видно из табл. 1, количество термических циклов практически не влияет на прочность сцепления покрытия.

В таблице 2 представлены результаты исследования прочности сцепления покрытий после 10000 термоциклов при изменении их толщины от 0,4 до 2,5 мм – термических ударов с перепадом в 1000 °С.

Как видно из табл. 2, прочность сцепления покрытия с поверхностью подложки значительно снизилась, когда толщина покрытия была увеличена.

Растрескивание всегда начиналось с потери когезии в слое диоксида циркония вблизи границы раздела с подслоем (рисунок 1).

Таблица 2

Параметр	Толщина, мм						
	0,4	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5
Прочность сцепления покрытия после 10000 термоциклов, МПа	11,06	10,49	9,49	7,41	4,63	3,25	1,35

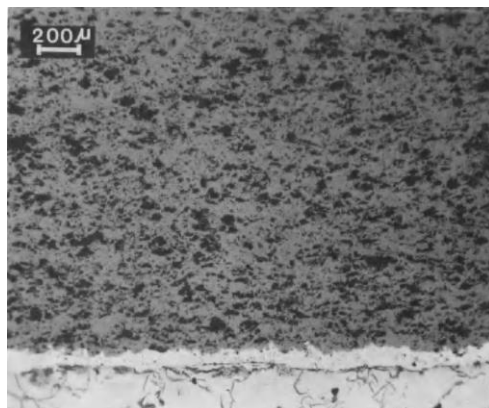


Рисунок 1 – Покрытие толщиной 2,5 мм после 100000 термоударов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания двигателя с термобарьерным покрытием на выпускных каналах головки блока цилиндров и выпускном коллекторе обнадёживают и после перенастройки параметров двигателя (избыток воздуха, степень сжатия, опережение угла впрыска и т. д.), можно ожидать многообещающих результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> / А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск : НИИ ПМ с ОП, 1998. – 128 с.
2. Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония / Д. С. Рутман [и др.]. – М. : Металлургия, 1985. – 137 с.
3. Kvernes, I. Ceramic coatings as thermal barriers in diesel and gas turbine engine components / I. Kvernes // Proc. of the World Congr. High-Tech. Ceram. Techn. – 1987. – P. 2519–2536.

Представлена 31.05.2021