

УДК 621.436.313

Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е.

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫПУСКНОГО ТРАКТА ДВС**

Основными стратегическими направлениями развития современного двигателестроения являются исследования, направленные на повышение КПД и мощности двигателей. Мощность двигателей увеличивает скорость перемещения транспортных средств и определяет их маневренность. Рост мощности двигателей в наибольшей степени определяется повышением температуры рабочего тела в двигателе. Тенденция роста этой температуры в мировом двигателестроении, определяемая в 50–60 °С в десятилетие, достигается за счет прогрессивных конструкторских решений и разработки новых жаропрочных сплавов. Однако приемы охлаждения конструктивных элементов из сплавов не являются безграничными и имеют ограниченные возможности, а верхний температурный предел применимости металлических материалов к настоящему времени практически достигнут. Поэтому качественный скачок в двигателестроении может быть совершен только на основе применения конструкционной керамики.

Проблема создания двигателей внутреннего сгорания из керамики требует весьма значительных объемов финансирования, которые превышают возможности отдельных государств. Это связано с созданием принципиально новых керамических материалов, оригинальных методов синтеза керамических элементов сложных форм, осуществляемых при высоких температурах и давлениях, решением весьма обширного круга теплофизических и прочностных, а также материаловедческих технологических, теоретических и технических задач, с созданием теории адиабатного двигателя с соответствующими методами исследований и испытаний. Промышленное решение такой проблемы может быть реализовано проведением интенсивных исследований, определяемых несколькими десятилетиями.

Перспектива ближайшего будущего состоит в использовании комбинированных металлокерамических деталей и специальных керамических покрытий в конструкциях двигателей.

В настоящее время интенсивно ведутся работы над созданием теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускного тракта ДВС, позволяющих повысить их адиабатность, что достигается высокой степенью тепловой изоляции выпускных каналов газового тракта за счет сохранения тепла его носителем.

Теплозащитные покрытия внешних поверхностей элементов двигателей не позволяют поддерживать заданное теплосодержание рабочего тела и допускают интенсивный внутренний теплообмен между деталями, который приводит к отводу тепла от развитой внешней поверхности двигателя. Это явление исключается при использовании покрытий внутренних поверхностей теплонапряженных элементов конструкции.

Создание керамической теплоизоляции внутренних поверхностей выпускных каналов газа позволит уменьшить удельный расход топлива транспортных средств, токсичность отработавших газов, что приведет к экономии энергоресурсов и улучшению экологической обстановки.

Проблему создания материалов и технологии теплозащитных покрытий внутренних поверхностей выпускных ДВС газа пытаются решить известнейшие научно-исследовательские центры развитых стран: ИПМ НАН Украины, НПО «Технология» (г. Об-

нинск, Россия), МТИ, Даймлер-Бенц, Фольксваген, ККК (Германия) по заказу фирмы Порше, Пикардо (Англия), Дженерал электрик, Форд, Вестнигауз, Пратт Энд Уитни, Камминс Энджин (США) и др. [1–8].

Тематика работ специализированных лабораторий этих компаний связана, в основном, с созданием керамических элементов – фрагментов теплозащитных покрытий на основе титаната алюминия ($Al_2O_3 \cdot TiO_2$, тиалита), на поверхность которых отливаются металлы. Технология синтеза тиалита отличается высокой степенью сложности и является весьма дорогостоящей, поскольку кристаллы $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ обладают высокой анизотропией теплового расширения, являющейся причиной образования структурных трещин в изделиях, которые стремятся получить с нулевым значением термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Однако технология отливки металлов на фрагменты покрытий, даже нагретые до температур 600–800 °С, не реализована и фирма Порше использует на экспериментальных двигателях гоночных машин только керамические вставки простейших форм. Т.о. задачу внутренней теплоизоляции элементов выпускного тракта ДВС следует считать до настоящего времени нерешенной.¹

Накопленный авторами теоретический и экспериментальный материал в области керамического материаловедения позволили открыть новый класс керамических материалов, обладающий аномально высокой термостойкостью [9]. На основе этого класса керамики создана технология нанесения теплозащитных покрытий внутренних поверхностей деталей сложных форм, в частности, элементов выпускного тракта ДВС, которые образуются непосредственно в процессе формирования самой детали при отливке металла [10].

Требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов газового тракта ДВС, являются трудно достижимыми в одном материале. Покрытия должны одновременно обладать: низкой теплопроводностью, высокой эрозионной стойкостью, термостойкостью, высокой степенью чистоты рабочей поверхности, то есть являться многофункциональными. Сообщение многофункциональных свойств покрытиям можно осуществить на основе принципа создания заданных параметров нескольких свойств, которые присущих каждому из различных материалов, составляющих одно композиционное покрытие. Свойства, которые присущи каждому из материалов, последовательно изменяются по сечению покрытия в соответствии с изменением самих материалов. Т.е. нами предлагается принцип совмещения различных свойств в одном покрытии, что достигается его многослойным строением.

Принцип реализован в созданном многослойном теплоизолирующем покрытии внутренних поверхностей элементов газового тракта ДВС (рис. 1). На этом рисунке приведена условная схема литейного стержня с многослойным покрытием, выполняющим функции тепловой защиты и эрозионной стойкости, а также обеспечивающим высокие газодинамические характеристики каналов для прохождения газов и адгезию покрытия к металлу. Литейный стержень 1 (рис. 1) с такими различными по структуре и свойствам материалами, составляющих покрытие – 2, 3, 4, помещается в литейный ящик и заливается металлом. При высоких температурах происходит деструкция связующего в стержне и его тело становится хрупким. После остывания литейной системы литейный стержень легко выбивается из тела металлической отливки и оголяет покрытие, непосредственное связанное с металлом через его слой 4, ставшим внутренним слоем покрытия металлической детали.

Литейный стержень с покрытиями до отливки на него металла приведен на

рис. 2, из которого следует, что созданная технология позволяет получать теплозащитные покрытия внутренних поверхностей любой сложности.

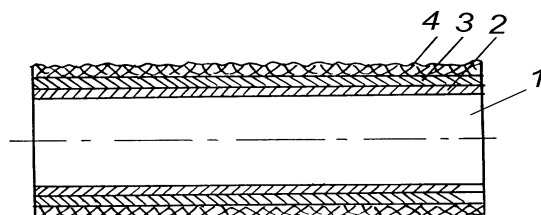


Рисунок 1 – Схема литейного стержня с многослойным теплоизолирующим покрытием:
1 – литейный стержень; 2 – временный, возгоняемый слой; 3 – эрозионноустойчивый слой;
4 – теплоизолирующий слой с развитой внешней поверхностью



Рисунок 2 – Литейный стержень с многофункциональным покрытием

Поскольку литейный стержень формирует каналы в деталях, то его поверхностные дефекты зеркально передаются поверхности образованных каналов. Низкая чистота поверхности образованных каналов для прохождения по ним газов значительно ухудшает газодинамические характеристики элементов выпускного тракта двигателя.

Для обеспечения высокой степени чистоты выпускных газовых каналов ДВС были подобраны материалы временного покрытия литейного стержня, которые впитываются в поры последнего и после высушивания обладают блестящей ровной поверхностью с гидрофобными свойствами.

Следующий слой покрытия, наносимый из паст на основе порошков микронных фракций на гладкую поверхность временного покрытия, повторяет ее как зеркальное отображение.

В дальнейшем, при технологической сушке литейного стержня с многослойным покрытием, временный слой, наносимый для обеспечения чистоты канала, возгоняется при температурах до 300 °С. Образующий при этом незначительный зазор между стержнем и покрытием служит компенсатором расширения при увеличении объема стержня в процессе отливки металла.

Разработан и реализован способ искусственного увеличения компенсационного зазора между стержнем и эрозионноустойчивым слоем покрытия созданием демпфирующего слоя из волокнистых оксидов, наносимых как подслой временного покрытия на стержень.

С целью уменьшения величин объемного расширения самих литейных стержней, предложено использовать при их изготовлении специально подобранные материалы с весьма низким ТКЛР, а также с высокой теплопроводностью, для обеспечения возможности снижения градиентов температур в теле покрытия в процессе отливки на него металла и при последующем охлаждении детали.

Материал слоя покрытия 3 (рис. 1), наносимого на таковое временное 2, возгоняемое при сушке, создавался практически беспористым и характеризовался повышенной прочностью ($\sigma_{изг} \geq 6 \text{ МПа}$), которая обеспечивает, в основном, высокую эрозионную стойкость. На этот эрозионноустойчивый слой, который в процессе эксплуатации воспринимает воздействие скоростных газовых потоков, наносился теплозащитный слой покрытия – 4, армированный волокнами неорганических оксидов нескольких модификаций. Этот слой при отливке металла на теплоизолированный стержень, в основном, воспринимает механическую и тепловую нагрузку. В процессе же эксплуатации слой 4 выполняет функции теплоизолятора, поскольку он специально создавался с низкой теплопроводностью, соответствующей $0,3 \text{ Вт/(м К)}$ при температурах более $600 \text{ }^\circ\text{C}$. В зависимости от условий эксплуатации двигателя этот слой может быть сформирован толщиной от $1,0$ до $5,0 \text{ мм}$.

Теплозащитный, а особенно эрозионноустойчивый, слои имеют достаточно высокие ТКЛР и обладают способностью увеличивать свои размеры при высоких температурах эксплуатации. Рост размеров слоев покрытий обеспечивает появление радиальных напряжений сжатия в покрытиях внутренних поверхностей металла. Такое напряженное состояние покрытий в замкнутых каналах усиливает степень адгезии покрытий к металлу и способствует снижению вероятности образования термических трещин, развивающихся при охлаждении деталей с покрытиями при термоциклировании. При высоких температурах, соответствующих таковым эксплуатации, материал слоя, выполняющего теплозащитные функции, обладает определенной долей вязкостной составляющей, способной релаксировать приложенные извне деформации без развития в нем и покрытии в целом катастрофических магистральных трещин.

Внешнюю поверхность теплозащитного слоя, на которую отливается металл, признано целесообразным поризировать и химически насыщать соединениями, способствующими достижению низкого угла краевого смачивания чугуном или алюминием - в зависимости от типа отливаемого металла. Такие разработанные технологические приемы способствуют реализации вкладов в адгезионные составляющие покрытия к металлу – химического и электрохимического взаимодействия металла и покрытия, и механического проникновения жидкого металла в открытые поры покрытия.

Описанная последовательность нанесения слоев покрытий, согласованных по свойствам между собой, на литейный стержень обеспечивает получение теплозащитных покрытий без нарушений структуры, которые могут возникать при высоких температурах при формировании покрытий на деталях в процессе отливки металла вследствие возникновения термических напряжений в них [10]. При этом каждый слой, благодаря своим специфическим свойствам, придает покрытию в комплексе многофункциональную направленность, обеспечивающую высокие эксплуатационные показатели теплоизолированным элементам выпускного тракта ДВС.

Созданная технология позволила разработать теплоизолирующие покрытия выпускных каналов головок цилиндров двигателей СМД-60 и ДТ-2, прошедшие стендовые и 100 часовые ресурсные испытания в условиях, отвечающих эксплуатационным. Был достигнут градиент температуры в $600 \text{ }^\circ\text{C}$ на покрытии толщиной в 2 мм при температуре стенки $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.



Рисунок 3 – Отливка алюминия, образовавшая головку канала цилиндров двигателя СМД 60, с внутренним теплоизолирующим покрытием

Литература

1. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №11. – P. 479–484, 489.
2. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №12. – P. 525–529.
3. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines // Engineer. – 1977. – Vol.244. – №6303. – 13 p.
4. McLean A.F., Davis D.A. The ceramic gas turbine – a candidate powerplant for the middle – and long-term future // SAE Preprint. – 1976. – №760239. – 18 p.
5. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat // Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – №12. – P. 315–318.
6. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall // Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – №4. – P. 247–252.
7. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines // AIAA Pap. – 1976. – №729. – P. 1–9.
8. Jordan F.D., Napier J.C., Metcalfe A.G., Duffy T.E. Application of ceramics to a radial inflow gas turbine // SAE Prepr. – 1977. – № 770342. – 13 p.
9. Ведь В.Е. Технология нанесения теплозащитных покрытий внутренних поверхностей деталей газового тракта ДВС // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Вып.5.– Харьков: ХАИ. – 1998. –С. 441–445.
10. Ведь В.Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров ДВС // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999.–№2.– С. 81–85.

УДК 621.436.313

Товажняньський Л.Л., Ведь В.Є.

НОВІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ВИПУСКНОГО ТРАКТА ДВЗ

Описано властивості нових матеріалів та технологію виготовлення багатofункціональних покриттів внутрішніх поверхонь елементів випускного тракту двигунів внутрішнього згорання.