

УДК 621.11+667.64

Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЕМАЯ ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ КЕРАМИКИ**

Высокотемпературное материаловедение определяет, что телам кристаллической структуры, т.е. металлам, оксидам и тугоплавким соединениям на основе боридов, карбидов, нитридов, силицидов металлов присущи законы изменения физико-механических показателей от температуры близкие к линейным, как, например, для авиационных лопаточных сплавов или конструкционной керамики (рис. 1).

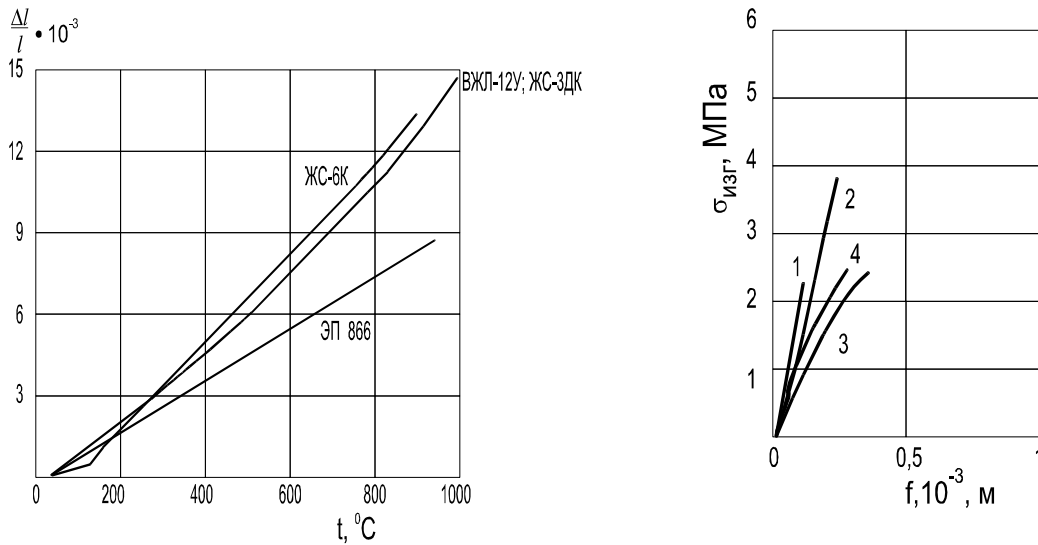


Рисунок 1 – Зависимости от температуры: относительного удлинения сплавов для лопаток турбин авиационных двигателей и предела прочности при изгибе фрагментов покрытий на основе оксидов: Mg –1, Al –2, муллита – 3 и кордиерита – 4 при 800 °С

Однако, керамике присущ наиболее существенный для данного класса материалов недостаток – неудовлетворительная термическая стойкость, определяемая, в первую очередь, сравнительно малой сдвиговой механической прочностью и достаточно высоким термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Поэтому повышение термостойкости керамики можно достичь двумя путями – созданием материалов с ТКЛР близким к нулю и сообщение ей макроструктуры, способной своей податливостью релаксировать напряжения, создаваемые приложенной извне термической нагрузкой.

Податливость структуры твердых тел может предопределяться или трещиноватостью структуры, которая искусственно создается для некоторого повышения термостойкости огнеупорных материалов, либо наличием вязкоупругости, что свойственно полимерным материалам [1], характеризующимися максимальными температурами применения, не превышающими 600 °С.

Исследования по синтезу керамических материалов, обладающих априорно заданными свойствами, позволили разработать наполненные неорганические полимеры, способные образовывать вязкоэластичные структуры (рис. 2). Как оказалось, такие неорганические полимеры могут существовать и при температурах, соответствующих 1000 °С и выше, а присущая им вязкоупругость определяет аномально высокую термостойкость изделий, получаемых на их основе [2].

На основе открытого нового класса керамических материалов созданы высокотемпературные электроизоляционные эрозионностойкие покрытия и подложки датчиков определения термо- и вибронпряженного состояния компрессорных, рабочих и сопловых лопаток турбин, топливных трубопроводов, заклапанных полостей камер сгорания и сопел современных авиационных ГТД. Разработанные материалы позволили повысить температуры измерений температур и уровней напряжений с 600 до 1200 °С на жаропрочных сплавах для элементов турбин и до 1500 °С на керамических датчиках температуры газового потока, керамических турбинных лопатках и измерителях максимальных температур на основе облученных алмазов. Работы были внедрены практически на всех предприятиях Минавиапрома бывшего СССР [3].

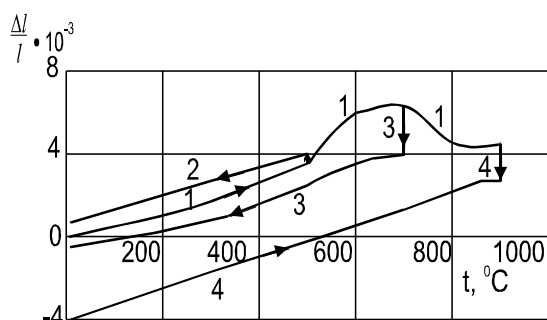


Рисунок 2 – Зависимости изменения относительных размеров образцов из корунда с неорганическим связующим при нагреве (кривая 1), изотермической выдержке в течении 2 часов и охлаждении от температур, °С: 500– кривая 2, 700 – кривая 3, 900 – кривая 4

Разработанные высокотемпературные электроизоляционные материалы с высокими адгезионными свойствами нашли применение в приемниках лучистых потоков, установленных на внешней поверхности искусственного спутника Земли «Искра-2».

Отсутствие термостойких электроизолирующих покрытий также сдерживало развитие конструкций двигателей ориентации космических кораблей на орбите. Разработка керамической изоляции в толсто пленочном исполнении, обладающей стойкостью к агрессивному воздействию плазмы, вместо массивных керамических материалов, разделяющих основные рабочие элементы двигателей, является одним из путей снижения их массы и габаритов. Для этого были созданы коррозионностойкие электроизоляционные покрытия с температурой эксплуатации до 1500 °С рабочих частей двигателей ориентации космических кораблей с целью уменьшения их массы и объема. Материалы покрытий и технология нанесения внедрены в серийное производство двигателей.

На основе этого класса керамики создана технология и материалы для нанесения теплозащитных эрозионностойких покрытий на внутренние поверхности деталей сложных форм, в частности, элементы выпускного тракта ДВС. Такие теплозащитные покрытия позволяют уменьшить расход топлива транспортных средств, повысить КПД двигателей, снизить их материалоемкость, уменьшить объем системы охлаждения двигателей [4]. Проблему создания материалов и технологии теплозащитных покрытий внутренних поверхностей выпускных ДВС газа решают известнейшие научно-исследовательские центры развитых стран: ИПМ НАН Украины, НПО «Технология» (г. Обнинск, 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. [5–12].

Тематика работ специализированных лабораторий этих компаний связана, в основном, с созданием керамических элементов – фрагментов теплозащитных покрытий на основе тита-

ната 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 его кристаллы обладают высокой анизотропией теплового расширения, являющейся причиной образования структурных трещин в изделиях, которые стремятся получить с нулевым значением ТКЛР. Однако технология отливки металлов на фрагменты покрытий, даже нагретые до температур  $600 \div 800$  °С, не реализована, и фирма Порше использует на экспериментальных двигателях гоночных машин только керамические вставки простейших форм. Таким образом, задачу создания внутренней теплоизоляции элементов выпускного тракта ДВС следует считать до настоящего времени не решенной.

Разработанная нами технология отличается тем, что процесс формирования и нанесения покрытий происходит непосредственно при отливке деталей и формирования теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускных каналов ДВС аналогов не имеет [13,14].

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 присущи 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, составляющих покрытие. Т.е. нами предложен принцип совмещения различных свойств в одном покрытии, который определяется его многослойным строением.

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  $600$  °С под покрытием толщиной в  $2$  мм на металле при температуре стенки, подверженной воздействию газа в  $1200$  °С.

Новые материалы, которые дает возможность разработать технологические основы вязкоупругой керамики, позволяют создать, в свою очередь, новые технологии. Например, получили развитие работы по созданию керамических нагревателей направленной передачи тепла (рис. 3).

Нами проанализированы конструкции известных типов электрических нагревателей и определено, что для совершенствования параметров их работоспособности и энергоэффективного применения в устройствах необходимо: снизить температуры на резистивных элементах и на теплоотдающей поверхности; максимально развить поверхности теплообмена; задать соответствие геометрических форм теплоотдающих поверхностей нагревателей конфигурации внешних поверхностей нагреваемых объектов; максимально направить потоки передачи тепла в заданном направлении. Перечисленные требования определили отказ от традиционных форм нагревательных элементов и разработку принципиально новых их конструкций. Материалом, на основе которого созданы нагреватели с новыми параметрами работоспособности, является керамика с аномально высокой термостойкостью. Исходя из необходимости обеспечения условий наиболее полной и равномерной передачи тепла керамическими нагревателями, следует, что их необходимо изготавливать в виде тонкопрофильных конструкций, теплопередающая поверхность которых повторяет контур поверхности нагреваемых объектов

[15]. При этом в теле нагревателя на расстоянии в 2 мм от теплоотдающей поверхности монослойно располагаются резистивные элементы, «отслеживающие» поверхность теплоотдачи.



Рисунок 3 – Общий вид керамических нагревателей

Рисунок 4 – Действующая модель устройства термоинтенсификации добычи нефти, представляющая собой блок керамических нагревателей контактного типа, приклеенных к поверхности отрезка НКТ. На фотографии нагреватели скрыты за слоем материала, представляющего собой гидро-, тепло-, электро- и нефтеизоляцию нагревателей и НКТ.

Внешний блестящий слой – теплоотражающее покрытие.

Провода вверху – выводы термодатчиков, внизу – шнур подключения к электросети

Применение разработанных керамических нагревателей контактного типа позволило реализовать передачу тепла нагреваемым объектам за счет теплопроводности, т.е. с минимальными тепловыми сопротивлениями в теплопередающей системе, а также передавать тепло направленным и равномерно распределенным тепловым потоком с максимально развитой теплопередающей поверхностью заданной сложной конфигурации. Это позволило впервые создать электрический пластинчатый теплообменник с практически 100 % передачей тепла нагреваемым средам, который рекомендован для применения для перекачки высоковязкой нефти в шлейфах и применен на предприятиях лакокрасочной промышленности, а также для обогрева промышленных помещений.

Применение керамических нагревателей нового типа и организация приемов направленной передачи тепла, например в химических реакторах, сушильном оборудовании, бытовых приборах и др. позволяет достичь 20–40 % экономии электроэнергии. Разработаны и инфракрасные нагреватели, генерирующие направленно 80–90 % теплового потока, позволяющие оценить энергоэффективность их использования выше 50 %.

Еще одной принципиально новой технологией основанной на использовании керамики нового типа является технология термоинтенсификации добычи высоковязкой и парафинизированной нефти (рис. 4).

При течении такой нефти по скважинам от забоя до устья при ее добыче происходит уменьшение ее температуры, что увеличивает вязкость и уменьшает текучесть нефти, особенно если она обладает неньютоновскими свойствами. При эксплуатации месторождений с высоким содержанием парафинов в нефти в скважине, когда температура в ней становится ниже температуры кристаллизации парафинов, на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ), по которым течет нефть, формируются асфальтосмолопарафиновые отложения, рост которых приводит к уменьшению внутреннего сечения НКТ и, как следствие, к резкому снижению дебита скважин или их закупорке.

Для того чтобы устранить или, хотя бы, уменьшить влияние описанных явлений, затрудняющих добычу нефти, используют различные технологические приемы, позволяющие повысить температуру нефти: паротепловую обработку НКТ; закачку горячей воды в пласт; термохимическое воздействие на пласт нефти в забое; нагрев нефти глубинными электронагревателями, спускаемыми внутрь НКТ или размещаемыми рядом с ними; введение ингибиторов, сдерживающих отложения парафинов; закачку разбавителей в пласты и так далее. Эти методы позволяют снизить вязкость нефти и увеличить ее теплосодержание, что сдерживает процессы зарастания труб и положительно влияет на процесс добычи нефти. Но, как правило, все известные методы или очень дорогостоящие или экологически небезопасны. Кроме того им присущ непродолжительный эффект воздействия на процесс интенсификации добычи. Использование же известных методов глубинного электронагрева нефти позволяет передать ей незначительную часть выделяемого тепла.

Практически полная передача нефти тепла в скважинах при ее добыче реализуется при непосредственном и распределенном контактном нагреве внешней теплоизолированной поверхности НКТ, расположенной в скважине. При этом необходимо создать максимально развитую поверхность теплообмена с тем, чтобы даже ламинарно текущая нефть получила заданное теплосодержание при минимальной, расчетом задаваемой температуре нагреваемой нефти данного состава. Такая температура необходима для обеспечения условий течения нефти без загустевания и кристаллизации вследствие естественного понижения ее температуры при перемещении до следующего участка в скважине, на котором обеспечивается очередной нагрев поверхности НКТ [16].

Ограничение нагрева нефти минимально необходимыми температурами определяется условием необходимостью недопущения протекания процесса графитизации составляющих нефти на внутренних поверхностях НКТ.

Описанные условия рационального и энергоэффективного процесса передачи тепла нефти созданием направленного теплового потока реализуются в предлагаемой комплексной технологии резистивного нагрева участков поверхности НКТ, основанной на:

- использовании керамических нагревателей контактного типа;
- разработке приемов оснащения ими НКТ, а также методов тепло-, электро-, гидро-, нефтеизоляции участков нагрева;
- созданной математической модели процесса конвективного теплообмена нефти на участках НКТ с электрическим обогревом, позволяющей определять количество участков нагрева НКТ вдоль длины скважины, рациональное размещение на них нагревателей и мощность, генерируемую блоками нагревателей;
- способах подвода электропитания нагревателей и термодатчиков и съема термометрической информации;
- создании устройств обработки термометрической информации и автоматического управления процессом нагрева участков НКТ.

Литература

1. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1983. – 535 с.
2. Ведь В.Е. Описание деформационных характеристик упруго-вязких покрытий // Вестник Харьковского политехнического института: Сб. научн. тр. – Вып. 26.– Харьков: ХГПУ. – 1999. – С. 122–124.
3. Ведь В.Е., Гусев Ю.А., Епифанов С.В. Исследование технологии и изготовления и методов обработки сигналов высокотемпературных пленочных тензорезисторов // Электротензометрия: Материалы научн.-практич. семинара.– Л.: ЛДНТП.– 1981.– С. 29–34.
4. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е. Новые материалы и технология теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускного тракта ДВС // Интегровані технології та енергозбереження.– 2007.–№3.– С. 139–143.
5. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №11. – P. 479–484, 489.
6. Walzer P., Höhler M., Potten Kolber P. Hochtemperatur keramik für Automobilgasturbinen // MTZ – 1976. – Vol. 37. – №12. – P. 525–529.
7. Bunting A. Ceramic rotor success for gas turbines // Engineer. – 1977. – Vol.244. – №6303. – 13p.
8. 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.
9. Gudel I.E., Schuster P. Keramische Massen auf der Basis von Aluminiumtitanat // Tonindustrie – Zeitung. – 1974. – Vol. 98. – №12. – P. 315–318.
10. Hayes C.W., Zabierek D. Turbine vane ceramic enduvall // Journal Aircraft. – 1975. – Vol. 12. – №4. – P. 247–252.
11. Liebert C.H., Stepka F.S. Ceramic thermal-barrier coating for cooled turbines // AIAA Pap. – 1976. – №729. – P. 1–9.
12. 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.
13. 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.
14. Ведь В.Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров ДВС // Интегровані технології та енергозбереження. – 1999.–№2.– С. 81–85.
15. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е., Гусева Н.И., Верба А.Г. Керамические нагреватели для энергоэффективной направленной передачи тепла. // «Оборудование. Инструмент». – 2006. –№ 3. – С. 96–98.
16. Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е., Ульев Л.М. Энергоэффективное решение проблем добычи и транспорта высоковязкой нефти организацией направленных тепловых потоков. // Интегровані технології та енергозбереження. – 2007.– №2.– С. 13–18.

УДК 621.11+667.64

Товажнянський Л.Л., Ведь В.Є

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧЕНО  
ЗАСТОСУВАННЯМ НОВОЇ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ КЕРАМІКИ**

Розглянуто властивості нового класу матеріалів, якому притаманна аномально висока термостійкість. На основі запропонованої технології створено високотемпературні покриття датчиків визначення термо- і вібронапруженого стану елементів сучасних авіаційних ГТД, рушіїв космічних кораблів, керамічні нагрівники та ін.