



## НОВЫЙ КЛАСС КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Товажнянский Л.Л., Ведь В.Е.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина

**Реферат** – Создан новый класс высокотемпературной керамики, на основе которой можно получать многофункциональные покрытия металлов, нагреватели направленной передачи тепла, посредством которых можно разрабатывать энергоэффективные современные технологии.

**Ключевые слова:** керамика, вязкопластичность, теплозащита, нагреватели, добыча нефти.

## NEW CLASS OF CERAMIC MATERIALS PROVIDES ENERGY-EFFICIENCY OF HIGH TEMPERATURE TECHNOLOGIES

Tovajneanskii L.L., Vedi V.E.

National Technical University "Kharkov polytechnic institute", Ukraine

**Abstract** - A new class of high-temperature ceramics which is basis for obtaining of multi-functional coatings for metals, directed heat transfer heaters which allow to develop energy-efficient modern technologies was created.

**Keywords:** ceramics, viscoplastic, thermal protection, heaters, oil extraction.

## CLASĂ NOUĂ DE MATERIALE CERAMICE CE ASIGURĂ EFICIENȚA ENERGETICĂ A TEHNOLOGIILOR DE TEMPERATURĂ ÎNALTĂ

Tovajneanskii L.L., Vedi V.E.

Universitatea tehnică națională „Institutul Politehnic din Harkov”, Ucraina

**Rezumat** – În lucrare se prezintă o clasă nouă a ceramicii de înaltă temperatură, pe baza căreia se poate obține acoperiri multifuncționale a metalelor, încălzitoarelor de transmisie orientată a căldurii, prin intermediul cărora se poate elabora tehnologii moderne energetic eficiente.

**Cuvinte cheie** – ceramică, viscozitate plastică, protecție termică, încălzitoare, extragerea petrolului.

Выполненные исследованиями по синтезу керамических материалов, обладающих априорно заданными свойствами, позволили разработать наполненные неорганические полимеры, способные образовывать вязкоэластичные структуры. Как оказалось, такие полимеры могут существовать и при температурах, соответствующих 1000°C и выше, а присущая им вязкоэластичность определяет аномально высокую термостойкость изделий, получаемых на их основе [1]. Разработанные теоретические основы создания нового класса материалов позволяют осуществлять управление температурными свойствами многофункциональных покрытий (таблица 1), которые позволили создать целый ряд их высокотемпературных модификаций, нашедших применение в нескольких отраслях промышленности. На основе нового класса керамики решена проблема создания теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов газового тракта двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Проблема

эта является весьма актуальной, поскольку основными стратегическими направлениями развития современного двигателестроения является повышение КПД и мощности двигателей. Рост мощности двигателей в наибольшей степени определяется повышением температуры рабочего тела в двигателе. Тенденция роста этой температуры в мировом двигателестроении, определяемая 50-60°C 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.

**Таблица 1. Эксплуатационные показатели разработанных материалов для покрытий**

Свойства	Показатели
Температура применения, °С	-140 ÷ +175
Коэффициент теплопроводности при 700°С, Вт/(м·К)	0,05÷35
Открытая пористость, %	0÷80
Энергия разрушения при температуре 900°С, Дж	<3
Удельная энергия отрыва, Дж/м <sup>2</sup>	<2
Удельное объемное электросопротивление при 1000°С, Ом·м	10 <sup>0</sup> ÷10 <sup>4</sup>
ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> град <sup>-1</sup>	2÷16
Предел прочности при изгибе, МПа	<8
Предел прочности при сжатии, МПа	<200
Термостойкость, °С	<1600
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2÷20
Пластическая прочность структуры при 700°С, кПа·м	<95
Виброперегрузка, ед. нагружений	8 ÷ 10
Виброскорость при 300 Гц, мм/с	40 ÷ 45
Циклы виброн нагружения, 10 <sup>6</sup> ед.	<5,4

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. В ближайшем будущем в конструкциях двигателей можно ожидать использование комбинированных металлокерамических деталей и специальных керамических покрытий. 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 наружной 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. 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 одному покрытию осуществлено при создании его многослойным, при этом каждый слой покрытия проявляет максимальный параметр одного из свойств, которые сообщаются в целом композиционному покрытию. На рис.1 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.



Рис.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.

Литейный стержень 1 (рис.2) с такими различными по структуре и свойствам материалами, составляющих покрытие 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, непосредственно связанное с металлом через его слой 4, ставшим внутренним слоем покрытия металлической детали. Рис 2 показывает, что созданная технология позволяет получать теплозащитные покрытия внутренних поверхностей любой сложности.

В процессе же эксплуатации слой 4 (рис.1) выполняет функции теплоизолятора, поскольку он специально создавался с низкой теплопроводностью, соответствующей 0,3 Вт/(м К) при температурах более 700°С [2], (рис.3). В зависимости от условий эксплуатации двигателя этот слой может быть сформирован толщиной от 1,0 до 5,0 мм.



Рис. 2. Литейный стержень с многофункциональным покрытием.

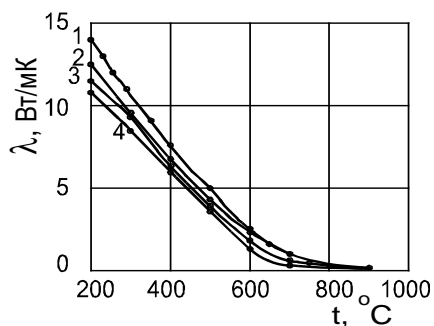


Рис.3. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности алюмосиликатных композиций от содержания волокон оксида алюминия (% масс. сверх 100): 1 – 5; 2 – 15; 3 – 25; 4 – 35

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  $600^{\circ}\text{C}$  на покрытии толщиной в 2 мм при температуре стенки  $1200^{\circ}\text{C}$  [3]. Совершенствование современных газотурбинных двигателей основано на диагностике их теплового и напряженного состояния, основными инструментами которой служат измерители температур и деформаций, монтируемые на элементах двигателей посредством электроизолирующих высокотемпературных керамических материалов с высокой степенью адгезии к металлам. Это определило необходимость создания покрытий с экстремальными параметрами работоспособности для покрытий и подложек датчиков определения термо- и вибронпряженного состояния компрессорных, рабочих и сопловых лопаток турбин, топливных трубопроводов, заклапанных полостей камер сгорания и сопел современных авиационных газотурбинных двигателей. Разработанные покрытия позволили повысить температуры работоспособности высокотемпературных пленочных термомпар и тензометров с  $600$  до  $1200^{\circ}\text{C}$  на жаропрочных сплавах для элементов турбин и до  $1500^{\circ}\text{C}$  на керамических датчиках температуры газового потока, керамических турбинных лопатках и измерителях максимальных температур на основе облученных алмазов. 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  $1500^{\circ}\text{C}$  рабочих частей двигателей ориентации космических кораблей с целью уменьшения их массы и объема. Материалы покрытий и технология нанесения внедрены в серийное производство двигателей. Нами проанализированы конструкции известных типов электрических нагревателей и установлено, 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 [4]. При этом в теле нагревателя на расстоянии в 2 мм от теплоотдающей поверхности монотельно располагаются резистивные элементы, «отслеживающие» поверхность теплоотдачи (рис. 4).

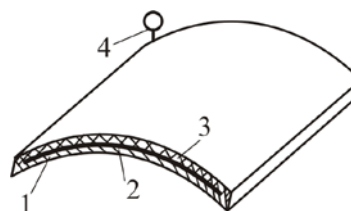


Рис.4. Поперечное сечение керамического нагревателя, обеспечивающего передачу тепла теплопроводностью объектам цилиндрической формы: 1 – слой керамики с высокой теплопроводностью; 2 – резистивный элемент; 3 – теплоизолирующий слой керамики; 4 – токовывод.

Развитие тепловыделяющей поверхности до максимально возможной достигается за счет разработанного приема компоновки нагревателей в блоки. Блочная компоновка позволяет достичь еще большего снижения температуры, как на самом резистивном элементе, так и на поверхности теплоотдачи от нагревателя. Созданными нами керамическими нагревателями оснастили различные промышленные установки – например, химические реакторы мощностью от 10 до 60 кВт. С их помощью была практически обеспечена безградиентность температуры по поверхности теплоотдачи реакторов. Отказов в работе нагревателей ни разу не отмечалось за 5 лет эксплуатации. На основе предложенных нами нагревателей разработан и реализован пластинчатый электрический теплообменник мощностью 30 Вт для обогрева помещений. Конструкция его отличается малыми габаритами, устройству также присуща высокая динамика разогрева жидкостей до заданной температуры с практически 100 % передачи тепла в заданном направлении. Созданы инфракрасные нагревательные устройства, направленное генерирующие более 70 % чистого теплового потока. Себестоимость разработанных нами нагревательных устройств по отношению к импортным аналогам той же мощности оценивается как 1 к 10. Описанные условия рационального и энергоэффективного процесса передачи тепла созданием направленного теплового потока реализуются в предлагаемой комплексной технологии резистивного нагрева участков поверхности насосно-компрессорных труб, размещенных в глубине скважин для добычи высоковязких и парафинизированных нефтей [5]. Изменение термодинамических условий нефти при ее течении по трубам в процессе добычи вызывает ряд существенных осложнений, связанных с извлечением высоковязких и парафинистых нефтей. Снижение температуры в скважине от забоя до устья приводит к значительному увеличению вязкости высоковязких нефтей, особенно обладающих неньютоновскими свойствами. При эксплуатации месторождений с высоким содержанием парафинов в скважине, когда температура становится ниже температуры кристаллизации, на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ) формируются асфальтосмолопарафиновые отложения, приводящие к уменьшению внутреннего сечения НКТ и, как следствие, к резкому снижению дебита скважин. Для того чтобы устранить или уменьшить влияние описанных осложнений, применяют различные методы: паротепловую обработку НКТ; термохимическое воздействие на пласты нефти в забоях; нагрев глубинными кабельными электронагревателями, спускаемыми во внутрь НКТ; введение ингибиторов парафиноотложений; закачку разбавителей и так далее. Эти методы позволяют снизить вязкость нефти и увеличить ее теплосодержание, что положительно влияет на процесс добычи и транспортировки нефти. Но, как правило, все эти методы или очень дорогостоящие

или экологически небезопасны. Кроме того им присущ непродолжительный эффект воздействия на процесс интенсификации добычи. Нами предложен новый метод повышения температуры нефти в скважинах и в трубопроводах за счет передачи тепла поверхностям труб с помощью специально разработанных керамических нагревателей резистивного типа. Повышение температуры нефти достигается за счет омического нагрева поверхности трубы с помощью специально разработанных для этого керамических нагревателей, которые участками нагревают поверхность НКТ на научно обоснованных, рассчитанных глубинах. Эти глубины и тепловая мощность, подводимая к нефти, зависят от параметров, характеризующих скважину, и являются расчетными величинами для каждой скважины. Такие нагреватели, являющиеся нагревателями нового типа, повторяют своими поверхностями, которыми они выделяют тепло, внешние поверхности НКТ. Нагреватели размещаются блоками заданной мощности на наружных поверхностях НКТ в рассчитанных глубинах нефтедобывающих скважин. Глубина размещения нагревателей, количество зон подогрева, их тепловая мощность и поверхность теплоотдачи являются расчетными величинами, зависящими от реологических параметров нефти в месторождении, скорости ее истечения, грунтов, которые проходит скважина и др. факторов и определяются для каждой скважины в обязательном порядке. В начале работ по оснащению скважины нагревателями формулируется и решается ряд теплофизических задач нефтепромысловой механики. Для выбора мест теплового воздействия на скважину, т. е. определения глубин установки блоков электрических нагревателей на поверхность НКТ, их эффективной поверхности теплоотдачи, мощности решается задача конвективного теплообмена нефти, движущейся в насосно-компрессорных трубах, с окружающей средой – колонной обсадных труб, цементным кольцом и породой вокруг скважины. Далее следует процедура составления математической модели конвективного теплообмена нефти на отдельных участках насосно-компрессорной трубы, оснащенных электрическим обогревом. Расчеты, проведенные по разработанным моделям, позволяют определить необходимую поверхность НКТ, которую необходимо прогреть выделением заданной тепловой мощности, и глубину размещения таких участков по скважине, т. е. определить рациональное количество нагревателей и число их блоков на заданных глубинах. Для создания условий рационального процесса повышения теплосодержания нефти на соответствующих участках НКТ температура нефти на выходе из участков нагрева контролируется термодатчиками, которые передают информацию на микропроцессорное устройство, позволяющее изменять подаваемую на нагреватели электрическую мощность по априорно заданному режиму управления нагревом нефти.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.Е. Ведь, *Описание деформационных характеристик упруговязких покрытий*, Вестник Харьковского политехнического института, Сборник научных трудов. Вып. 26. Харьков: ХГПУ, 1999, с. 122-124.
- [2] Ю.М. Мацевитый, В.Е. Ведь, В.А. Иванов, С.Ф. Лушпенко, *Разработка безобжиговых теплоизолирующих материалов для высокотемпературных покрытий металлов*, Доповіді НАН України, 1998, № 10, с. 112-117.
- [3] Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.Е. Ведь, *Новые материалы и технология теплозащитных покрытий внутренних поверхностей элементов выпускного тракта ДВС*, Интегровані технології та енергозбереження, 2007, № 3, с. 139-143.
- [4] Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.С. Ведь, Н.І. Гусева, О.Г. Верба, *Керамические нагреватели для энергоэффективной направленной передачи тепла // Международный информационно-технический журнал «Оборудование, Инструмент. Для профессионалов*, 2006, № 3, с. 96-98.
- [4] Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.Е. Ведь, Л.М. Ульев, *Энергоэффективное решение проблем добычи и транспорта высоковязкой нефти организацией направленных тепловых потоков*, Интегровані технології та енергозбереження, 2007, № 2, с. 13-18.