

16. The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites // *Composites Science and Technology*. 2007. № 67. P. 3041–3050.

17. Zhou T., Wang X., Wang T. Cure reaction of multi-walled carbon nanotubes/diglycidyl ether of bisphenol A/2-ethyl-4-methylimidazole (MWCNTs/DGEBA/EMI-2,4) nanocomposites: effect of carboxylic functionalization of MWCNTs // *Polym. Int.* 2009. № 58. P. 445–452.

18. Акатенков Р.В., Алексахин В.М., Аношкин И.В., Бабин А.Н., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В., Минаков В.Т., Раков Э.Г. Влияние малых количеств функционализированных нанотрубок на физико-механические свойства и структуру эпоксидных композиций // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 11. С. 35–40.

19. Акатенков Р.В., Алдошин С.М., Алексахин В.Н., Аношкин И.В., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В. Повышение свойств эпоксидных полимеров малыми добавками функционализированных углеродных наночастиц / В сб. докл.: Международный форум по нанотехнологиям. М. 2008. С. 138.

20. Hernandez-Pereza A., Avilesa F., May-Pata A., Valadez-Gonzaleza A., Herrera-Francoa P.J., Bartolo-Perez P. Effective properties of multiwalled carbon nanotube/epoxy composites using two different tubes // *Composites Science and Technology*. 2008. № 68. P. 1422–1431.

21. Wang S., Liang R., Wang B., Zhang C. Covalent Addition of Diethyl Itoluenediamines Onto Carbon Nanotubes for Composite Application // *Polymer composites*. 2009. DOI 10.1002/pc.20654.

22. Stivastava V.K. Enhancement of elastic modulus of epoxy resin with carbon nanotube // *World J. of Nano Science and Engeneering*. 2011. 1 DOI 10.4236/wjnse, 2011.11001.

23. Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B., Schulte K. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study // *Composites Science and Technology*. 2005. V. 65. P. 2300–2313.

24. Gojnya F.H., Wichmanna M.H.G., Kopkeb U., Fiedlera B., Schulte K. Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content // *Composites Science and Technology*. 2004. V. 64. P. 2363–2373.

См.С. СОЛНЦЕВ, В.А. РОЗЕНЕНКОВА,
Н.А. МИРОНОВА

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Трещиностойкие (квизипластичные)
керамические нанокмполиты и жаровые трубы из них*

Градиент роста температуры газа в «горячей» части авиационных двигателей намного опережает повышение предельной температуры эксплуатации используемых материалов. Работоспособность деталей «горячей» части двигателей в настоящее время обеспечивается преимущественно применением интенсивного охлаждения, что приводит к удорожанию двигателей. Использование новых материалов позволит отказаться от охлаждения или заметно снизить необходимое на охлаждение количество воздуха. Одним из направлений в поиске материалов

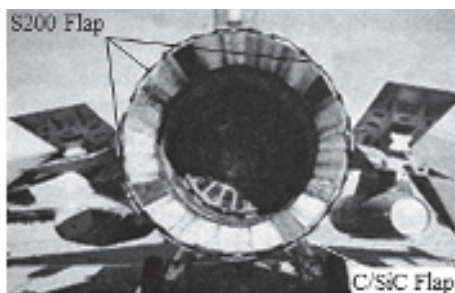


Рис. 1. Материалы (разработка США), примененные в форсажной камере самолета

являются работы по созданию и разработке технологии применения трещиностойких (квазипластичных) высокотемпературных углерод-керамических нанокomпозиционных материалов для изготовления «горячих» деталей авиационных двигателей. Авторы данного исследования разработали концепцию создания трещиностойких (квазипластичных) высокотемпературных углерод-керамических нанокomпозиционных материалов. Совместно с Т.Д. Каримбаевым и его сотрудниками*

продемонстрирована возможность создания деталей сложной формы, в частности жаровых труб из трещиностойких керамических композиционных материалов (ТККМ).

За рубежом ведутся широкомасштабные работы по созданию деталей «горячей» части авиационных двигателей из керамических композиционных материалов (ККМ). Результаты некоторых разработок показаны на рис. 1. Створки из ККМ проходят летные испытания на самолетах F-16 и F-15. В проведенных испытаниях не замечен износ, нет признаков деградации микроструктуры и снижения прочности материала.

Новый трещиностойкий (квазипластичный) ККМ, разработанный авторами, выдерживает температуры 1250–1350°C без охлаждения, имеет прочность при изгибе 220–300 МПа, удельную массу 1,8–2 г/см³ (в 3 раза меньшую, чем масса материала металлического прототипа). Технология создания неохлаждаемых деталей сложной геометрической формы для узлов «горячих» частей авиационных двигателей путем высокотемпературной переработки полуфабрикатов из углеродных и керамических волокон и поликарбосианов считается наиболее дешевой, позволяющей существенно снизить стоимость изделий. К достоинствам нового материала следует отнести также хорошее сопротивление росту трещин. Этот материал выдерживает удары острыми и тяжелыми предметами, сверление и при этом не распадается на отдельные части (как это имеет место при разрушении монолитной керамики), а локализует разрушение в точке приложения нагрузки. Другим преимуществом является возможность изготавливать изделия значительных габаритов и весьма сложной формы, так как технология производства изделий состоит из выкладки ткани, намотки жгутов и т.п. с последующей пропиткой растворами полимеров и тепловой обработкой [1]. Кроме того, результаты первых проведенных исследований свидетельствуют, что свойства изделий находятся на уровне свойств зарубежных аналогов.

Рассмотрены перспективные направления получения наноструктурированного КМ, состоящего из элементоорганических полимеров типа поликарбосианов и полисилазанов, высокопрочных углеродных волокон УКН-5000, ЛУ-24П и модификаторов, углеродных нанотрубок (НТ) и нановолокон (НВ), обладающих рекордно высокими жесткостью при

* ФГУП «ЦИАМ» ГНЦ РФ.

изгибе (1 ГПа) и модулем упругости (~1,25 ГПа). Используются однослойные углеродные НТ и НВ диаметром 0,3–5,0 нм, устойчивые в вакууме до 2800°C; их теплопроводность в осевом направлении вдвое превышает теплопроводность алмаза и в тысячи раз – электропроводность меди.

Для синтеза данного материала проведен выбор основных компонентов, методов их подготовки, технологии получения отдельных компонентов и температурно-временных режимов формирования трещиностойкого наноструктурированного керамического композиционного материала (ТНККМ).

Образование керамической матрицы включало получение в холодном режиме методом золь-гель исходного прекурсора, а затем путем контролируемого пиролиза формировали матрицу композита состава $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$. Характерной особенностью технологического процесса получения карбидокремниевых наноконпозиционных материалов из полимерных предшественников является твердофазный синтез керамической матрицы, состоящий из двух стадий. Первая – отверждение низкомолекулярного поликарбосилана на стадии формирования и обеспечение за счет этого требуемой формы и прочности предкерамического материала, и вторая – образование карбидокремниевой матрицы при его высокотемпературной обработке, в результате термической деструкции сшитого полимера. Высокий выход керамического остатка и минимальное содержание в нем кислорода являются необходимыми условиями для обеспечения высокой окислительной стойкости и прочности получаемого ТНККМ.

Установлено, что применение в качестве сшивающих агентов полиорганосилазанов (ПОСЗ) разветвленного строения позволяет проводить отверждение и формование материала в бескислородной среде при температурах 200–300°C с образованием сшитого предкерамического полимера (до 90%) практически без потерь массы. Поликарбосилан (ПКС), термообработанный по такому режиму, не претерпевает изменений до температуры 400°C, выше которой начинается процесс деструкции. Вторая стадия – образование керамической матрицы в результате термической деструкции ПКС, отвержденного полисилазаном, протекает в области 400–800°C.

В качестве наполнителей использовались высокомодульное углеродное волокно, нанодисперсные керамические бескислородные модификаторы, углеродные нановолокна, нанотрубки, SiC, Si_3N_4 . Образцы ТНККМ системы SiC–C были получены пропиткой углеродного наполнителя (волокно УКН-5000, ЛУ-24П) раствором полимерного связующего ПКСЗ-21 с введенным порошкообразным модификатором, с последующим формированием, отверждением и пиролизом. Были проведены рентгеноструктурные исследования образцов ТНККМ с добавками модификаторов и без добавок. По данным рентгенофазового и химического анализов матрица образцов без модификаторов состоит из аморфных фаз SiC, Si_3N_4 , SiO_2 состава $2\text{SiC} \cdot 0,2\text{Si}_3\text{N}_4 \cdot 0,1\text{SiO}_2$. В матрице, полученной с добавками модификаторов НВ и НТ, наблюдается появление кристаллических фаз SiC, Si_3N_4 , SiO_2 .

Методом сканирующей электронной микроскопии проведены исследования микроструктуры образцов ТНККМ с углеродными модификаторами НВ и НТ. Установлена совместимость компонентов ТНККМ. Фазо-

вая стабильность сохранялась не только на стадии приготовления материала, но и при его прогреве при температуре 1000°C в течение 5 ч.

Волокна УКН-5000 и ЛУ-24П в ТНККМ хорошо смачиваются и пропитываются связующим ПКСЗ-21. Скол матрицы имеет мелкозернистую структуру с размером зерна ~100–150 нм. Микроструктура поверхности расщепления ТНККМ системы C-SiC с модифицирующими добавками НВ и НТ аналогична структуре без этих добавок.

С целью улучшения адгезионных характеристик на границе раздела «матрица–армирующий наполнитель» были опробованы методы химической и термической очистки армирующих углеродных наполнителей. Установлено, что углеродные волокна УКН-5000 и ЛУ-24П, прошедшие химическую или термическую обработку, имеют идентичные адгезионные свойства. Процесс пропитки волокон УКН-5000 и ЛУ-24П происходит быстрее по сравнению с углеродными волокнами, поверхность которых не подвергалась термической обработке.

Исследовалось также влияние технологических параметров процесса формирования ТНККМ на их свойства. В качестве изучаемых параметров рассматривали температуру, продолжительность выдержки и давление; влияние количества циклов пропитки и концентрации пропиточных растворов на плотность и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Установлено, что с увеличением концентрации пропиточных растворов, количества циклов пропитки и модифицирующих добавок пропорционально возрастают значения плотности и незначительно ТКЛР материала.

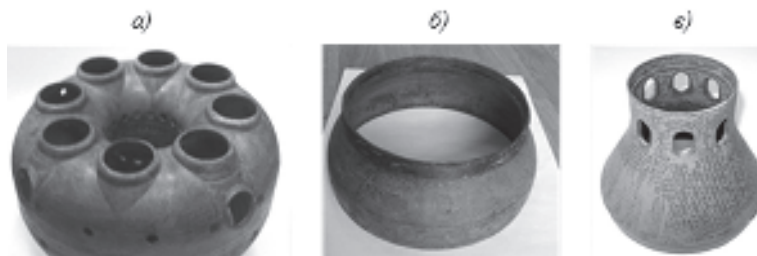


Рис. 2. Жаровая труба, состоящая из трех частей:

а – фронтальная часть; *б* – наружная обечайка; *в* – внутренняя обечайка

Установлена зависимость физико-механических характеристик ТНККМ от температурно-временных параметров технологического процесса изготовления материала. С повышением температуры и усилий деформации, плотность и прочность нанокompозита возрастают на 10–15%. Полученные данные показывают, что с увеличением давления прочность образцов ТНККМ при изгибе растет, но увеличение давления свыше 25 МПа приводит к образованию неоднородной структуры из-за выдавливания связующего ПКСЗ-21 и повреждения армирующего наполнителя УКН-5000 или ЛУ-24П. Исследование изломов образцов ТНККМ методом сканирующей электронной микроскопии показало, что на границе «волокно–матрица» наблюдается торможение микротрещин, зарождающихся в наполненной наночастицами матрице.

Принципиальная особенность работы заключается в том, что основные исследования по технологии ТНККМ проводятся на прототипах,

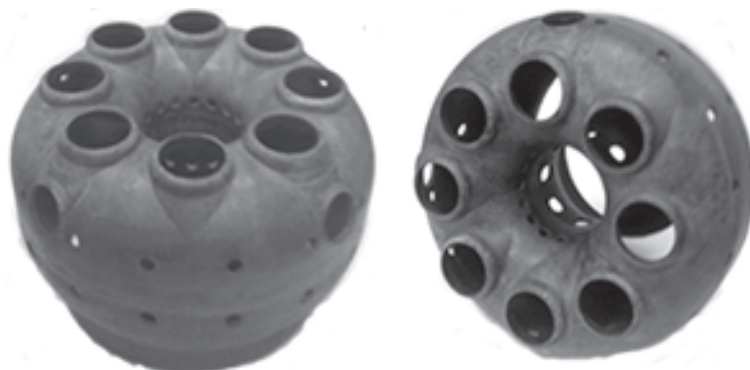


Рис. 3. Жаровая труба из керамического композиционного материала

являющихся деталями малоразмерных и короткоресурсных двигателей. В прототипе жаровая труба изготавливается из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ-ВИ с удельной массой $>8 \text{ г/см}^3$. Жаровая труба эксплуатируется в продуктах сгорания авиационного топлива и требует охлаждения потоком воздуха. Технология изготовления жаровой трубы является сложным многоэтапным процессом. В ЦИАМ разработана и изготовлена необходимая технологическая оснастка. В соответствии с принятой технологией изготовления конструктивно жаровая труба выполнена из трех составных частей – фронтальная часть, наружная и внутренняя обечайки (рис. 2). В ЦИАМ совместно с ВИАМ изготовлено 5 жаровых труб (рис. 3) для испытаний на малоразмерном ГТД типа МГТД-120.

Упрочняющие покрытия для пористых материалов из неорганических волокон

Эксплуатационные свойства теплозащитных, теплоизоляционных и звукопоглощающих материалов из неорганических волокон могут существенно повышаться, если на поверхность волокон нанести специальное упрочняющее (термоармирующее) покрытие, которое модифицирует поверхность волокна и одновременно скрепляет волокна в тех местах, где они контактируют между собой в объеме материала. Действие упрочняющих покрытий эффективно отражается на значениях механических свойств и при термических воздействиях на волокнистый материал. Применение этих покрытий можно рассматривать как способ повышения термостойкости и конструктивных характеристик волокнистых теплозащитных и других материалов.

Синтез наноразмерных упрочняющих покрытий осуществляли на основе диоксида, карбида и нитрида кремния. Упрочняющие покрытия сложного состава получали в результате процесса пиролитического разложения керамических полимеров с добавками термодинамически устойчивых тугоплавких нанодисперсных кислородных и бескислородных соединений, а также по золь-гель технологии.

В качестве основы для получения упрочненного теплозащитного материала использовались супертонкие кремнеземные, кварцевые и карбидокремниевые волокна в виде тканей и формованных нетканых матов; для

уплотнительных пористых истираемых материалов – дискретные металлические волокна систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y, Fe–(Ni)–Cr–Al–Y.

Образцы из кварцевых волокон обладали малой плотностью (120 кг/м^3), низкой теплопроводностью (при температуре 20°C : $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; при 1200°C : $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$), хорошей стойкостью к химическому и биологическому воздействию, что важно для авиакосмической техники. Нанесение покрытия на стекловолоконный материал осуществляли методом вакуумной и свободной инфильтрации. С целью достижения максимального содержания керамообразующего полимера и его равномерного распределения по объему микропористого материала исследовали влияние последовательности операций взаимодействия с растворами разной концентрации.

Плотность образцов после пяти циклов обработки возрастает в 4 раза по сравнению с плотностью исходных образцов. Установлено, что с увеличением концентрации рабочих растворов плотность образцов возрастает пропорционально концентрации растворов, и также пропорционально замедляется рост плотности по мере увеличения числа циклов обработки. Максимальная плотность образцов составила $300\text{--}500 \text{ кг/м}^3$.

По результатам электронно-микроскопического анализа установлено, что слой керамики на поверхности волокна толщиной $0,1\text{--}1 \text{ мкм}$ представляет собой наноструктурированное покрытие.

Исследованы температуростойчивость и термостойкость образцов теплозащитных материалов с упрочняющим покрытием (ТЗМ) и без покрытия при температуре 750°C и выдержке 750 ч , а также при температурах $1000\text{--}1500^\circ\text{C}$ и выдержке 2 ч .

На образцах ТЗМ без покрытия после 300 теплосмен появились трещины. Образцы с упрочняющими покрытиями были сняты с испытаний после 750 теплосмен без каких-либо признаков разрушения. Применение упрочняющих покрытий позволило повысить термостойкость теплозащитных материалов на основе стеклянных и кварцевых волокон в $2,5$ раза.

Стеклокерамический материал с упрочняющим покрытием температуростойчив при 1200°C в течение 1000 ч , механическая прочность ($\sigma_{\text{сж}}$, $\sigma_{\text{изг}}$) образцов возрастает в $2\text{--}4$ раза. Применение упрочняющего покрытия на пористом (90%) истираемом волокнистом металлическом материале позволило повысить рабочую температуру с 900 до 1200°C , термостойкость – в $5\text{--}7$ раз при теплосменах $1200 \rightleftharpoons 20^\circ\text{C}$ (один цикл: 10 мин) при стойкости к абразивному износу 1500 и соотношении износа уплотнительного материала к износу лопаток при врезании $5 : 1$ [2].

Не менее интересные результаты получены при нанесении упрочняющего покрытия на градиентный керамический волокнистый материал (ГКВМ) на основе корунда и муллита. Установлено, что эффективность упрочняющего покрытия на ГКВМ зависит от концентрации исходной суспензии покрытия. Увеличение концентрации суспензии в два раза сопровождается повышением прочности ГКВМ в $1,5\text{--}2$ раза (на $94\text{--}110\%$). Разработанные упрочняющие покрытия на основе неорганических полимеров позволили повысить термопрочностные характеристики керамических, стеклокерамических и металлических волокнистых материалов: рабочую температуру – на $250\text{--}300^\circ\text{C}$, термостойкость – в $7\text{--}10$ раз, механическую прочность – в $2\text{--}3$ раза.

Универсальное бесфриттовое технологическое покрытие

Высокопрочные стали типа ВКС отличаются интенсивным окислением при нагревах в обычной окислительной среде воздуха. Эти стали необходимо защищать от окисления при термомеханической обработке, отжиге, закалке, нормализации, гомогенизации.

Исследование закономерностей изменения свойств и особенностей строения гетерогенных многокомпонентных стеклокерамических и керамических систем позволили разработать для сталей типа ВКС стеклокерамические шликерные покрытия марок ЭВТ-70 и ЭВТ-70М для закалки стали ВКС после нагрева при 900–950°C в течение 5 ч и керамическое бесфриттовое шихтовое покрытие ЭВТ-79 (нагрев при 1150–1200°C в течение 5 ч) [3].

Применение покрытия ЭВТ-79 при полном цикле термической обработки стали ВКС позволило снизить окисляемость стали в 30 раз и уменьшить величину припусков на механическую обработку, повысить качество полуфабрикатов. Процесс изготовления покрытия ЭВТ-79 является экономичным, так как проводится по бесфриттовой технологии, исключая трудоемкий процесс получения фритты.

Защитное технологическое покрытие марки ЭВТ-79 является универсальным, так как может применяться для разных стадий термообработки сталей типа ВКС: отпуск, старение, отжиг, нормализация, гомогенизация, закалка – в широком диапазоне температур (950–1200°C).

Защитные покрытия как высокоэффективные технологические смазки при изотермической штамповке жаропрочных сплавов

Реализация новых прогрессивных технологий обработки жаропрочных никелевых сплавов типа ЭК151, ЭП742, ЭИ698 практически невозможна без применения защитных и смазочных покрытий. Технологические покрытия ЭВТ-24, ЭВТ-100 не обеспечивают получение изотермическим деформированием штамповок с качественной поверхностью [4]. В связи с этим разработана высокопластичных защитных покрытий с регламентированным коэффициентом контактного трения путем дисперсного легирования алюмосиликатных матриц представляется актуальной. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: получены математические модели зависимости свойств покрытий от их состава и температуры испытания, исследованы влияние дисперсного легирования аморфным бором на свойства алюмосиликатных покрытий и зависимость состава покрытия от термомеханических режимов деформирования жаропрочных никелевых сплавов, влияние дисперсности ингредиентов на свойства гидросуспензий. Разработана технология получения и нанесения покрытия. Разработано новое сверхпластичное покрытие марки ЭВТ-108М, которое сочетает прочную структуру с высокой пленкообразующей способностью, надежно защищает контактные поверхности от сваривания при различных степенях деформации и обладает регламентированным коэффициентом контактного трения.

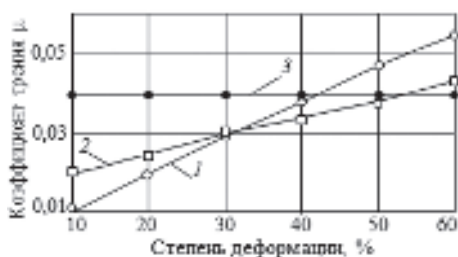


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения образцов из сплава ЭК151 с покрытием ЭВТ-108М от степени деформации:

1 – стеклопокрытие; 2 – стеклопокрытие + твердая фаза; 3 – стеклопокрытие с оптимизированным содержанием твердой фазы

Исследована зависимость коэффициента контактного трения (μ) от степени деформации образцов сплавов со стеклопокрытиями, а также дисперснолегированные композиции с различным содержанием твердой фазы. Установлено, что с увеличением степени деформации образцов коэффициент трения имеет практически линейный характер. Оптимальное соотношение жидкой и твердой модифицирующих фаз позволяет повысить пластичность покрытий и получить в процессе деформации жаропрочных никелевых сплавов равномерную сплошную пленку, обеспечивающую стабильный коэффициент контактного трения (рис. 4).

Изучение окисления, глубины обезлегированного слоя показало, что разработанное защитное технологическое покрытие ЭВТ-108М является эффективным средством защиты никелевого сплава от окисления при температурах 1050–1200°C и экспозициях до 5 ч.

Внедрение в промышленность покрытия ЭВТ-108М позволило обеспечить защиту от окисления, выгорания легирующих элементов заготовок и деталей различной конфигурации и габаритов при изотермической штамповке в интервале температур 1050–1200°C; получить экономию металла 3–10% за счет исключения окалины и уменьшения припусков на механическую обработку; повысить стойкость штамповой оснастки в 1,5–3 раза; реализовать процесс изотермического деформирования в условиях сверхпластичности; снизить трудоемкость пескоструйной очистки деталей – в 3–5 раз, механической обработки – в 1,5–2 раза, массу штамповки – на 20–30%; производить нагрев деталей в обычных печах вместо печей с контролируемой атмосферой.

Покрытие ЭВТ-108М внедрено в промышленность при изотермической штамповке дисков из жаропрочных никелевых сплавов на предприятиях ОАО «Калужский двигатель», ОАО «Мотор Сич».

Комплексная система защиты бериллия от окисления

Сложные условия эксплуатации конструкций из бериллия обуславливают необходимость разработки новых защитных покрытий, удовлетворяющих специфическим требованиям, предъявляемым к современным изделиям. Создание надежной системы защиты бериллия от окисления и сублимации токсичных оксидов бериллия в процессе высокотемпературных нагревов является весьма актуальной задачей.

Наиболее эффективным оказалось применение комплексной системы защиты, состоящей из пассивирующей пленки и жаростойких стеклопокрытий. Создание комплексной системы защиты является чрезвычайно сложной задачей, так как необходимо совмещение двух различных –

по химическому составу и технологическим параметрам нанесения и формирования – покрытий. Синтез стеклопокрытий для бериллия проводился в системах $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$.

Основное назначение пассивирующего слоя – защита бериллия от окисления на начальных стадиях окисления ($400\text{--}600^\circ\text{C}$) и создание промежуточного слоя, обеспечивающего прочное сцепление стеклопокрытия с бериллием, повышение его температуростойчивости. Эффективность защитного действия комплексной системы защиты после проведения термической обработки повышается (рис. 5). Комплексному покрытию присвоена марка ВЭС-5ПС, оно внедрено во ФГУП «РФЯЦ» – ВНИИЭФ.

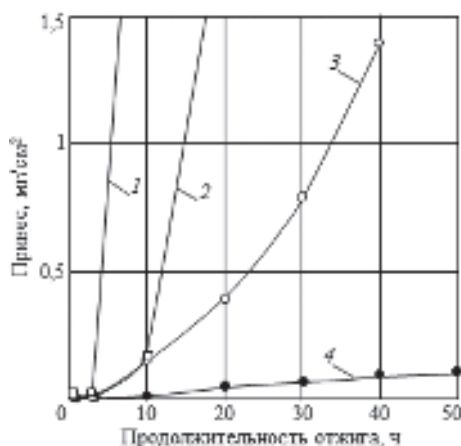


Рис. 5. Кинетика окисления бериллия с различным состоянием поверхности: 1 – после механической обработки; 2 – с пассивирующей пленкой; 3 – то же + отжиг при 600°C ; 4 – с комплексным защитным покрытием

Керамические пигменты

Производство синтетических неорганических пигментов является сложным, многостадийным и энергоемким технологическим процессом, организация которого требует применения высокоточного оборудования. Основные операции разработанной опытно-промышленной технологии синтеза неорганических пигментов – подготовка исходных компонентов, приготовление исходной шихты, термическая обработка шихты, измельчение и сушка готового пигмента и контроль качества продукции.

В США фирма «FerroCorporation» (патент № 6174360) для получения пигментов со специальными характеристиками (высокой степенью отражения, атмосферостойкостью, термостойкостью) использует материалы из оксидов и солей Bi, Cr, Fe, La, Mn, Ti, Zn, Mo, Si, V с высоким содержанием основного вещества – до 99% (по массе). Основной способ получения термостойких пигментов – это высокотемпературное спекание и тонкое измельчение.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования по синтезу составов универсальных керамических синтетических пигментов, выбору технологического оборудования для опытно-промышленного производства и технологических схем получения пигментов семи цветов (светло-зеленого, темно-зеленого, хаки, серого, серо-желтого и серо-коричневого); разработана рецептура универсальных керамических синтетических пигментов систем: $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZnO-CuO}$ – светло-зеленый; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZnO-CoO}$ – темно-зеленый; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiO}$ – серо-зеленый; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiO}$ – хаки; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-ZnO}$ – серый; $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ – серо-желтый; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-ZnO}$ – серо-коричневый – для изготовления светостойких покрытий с требуемыми спектральными характеристиками. Разработана опытно-промышленная технология (на мировом уровне) высокотемпературного синтеза атмосферостойких неорганических пиг-

ментов со специальными спектральными характеристиками семи цветов (светло-зеленого, темно-зеленого, серо-зеленого, хаки, серого, серо-желтого и серо-коричневого). Определены свойства пигментов: цвет пигментов соответствует цвету эталонных образцов; $S_{уд}$ – не менее $900 \text{ м}^2/\text{кг}$; средний размер частиц составляет $1,3\text{--}1,9 \text{ мкм}$, что обеспечивает остаток на сите не более $0,5\%$ (по массе); укрывистость – не более $100 \text{ г}/\text{м}^2$; пигменты устойчивы к воздействию переменных температур по режиму: $20 \rightleftharpoons 150^\circ\text{C}$, 20 циклов (продолжительность одного цикла – 1 ч); коэффициент отражения находится в пределах допусков согласованных спектральных коэффициентов отражения. Применение синтетических неорганических пигментов позволит повысить ресурс фторполиуретановых эмалей и сократит расход на ремонт; появилась возможность организации серийного производства синтетических неорганических пигментов на базе отечественного сырья со стабильными оптическими характеристиками, температуроустойчивыми до 150°C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримбаев Т.Д., Афанасьев Д.В., Даньшин К.А., Николаев М.П., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Исследования квазипластичных высокотемпературных углерод-керамических нанокомпозитов для «горячих» деталей / В сб. трудов: Междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века». М. 2010. С. 371–390.
2. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные покрытия $\text{SiC-Si}_3\text{Ni}_4\text{-SiO}_2$ для волокнистых металлических уплотнительных материалов // Стекло и керамика. 2011. № 6. С. 27–30.
3. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Бесфриттовые покрытия для термической обработки высокопрочной стали // Стекло и керамика. 2011. № 8. С. 33–38.
4. Солнцев С.С., Розененкова В.А. Современные полифункциональные защитные технологические покрытия / В сб. науч. трудов: «Кузнечно-штамповое производство: перспективы и развития». Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2005. С. 301–307.
5. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Касьяков В.С. Комплексная система защиты бериллия от окисления // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 1. С. 12–16.

Д.В. ГРАЩЕНКОВ, С.См. СОЛНЦЕВ,
Н.Е. ЩЕГОЛЕВА, А.С. НАУМОВА, Б.Н. ГАПОНОВ

СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

Современное материаловедение занимает ключевое место в области развития авиационной и космической техники. Особая роль уделяется разработке высокотемпературных композиционных материалов, представляющих собой объемное сочетание матрицы и армирующего наполнителя. При этом перспективным классом являются композиты на основе стеклокристаллических, стеклокерамических и керамических матриц.

Композиционные материалы обладают низкой плотностью, относительно высокой температурой эксплуатации, высокими прочностными характеристиками, жаропрочностью, химической инертностью, коррозионной стойкостью, а также возможностью формирования из них изде-