

УДК 621.763:[629.7+629.33]
DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.59.8

КЕРАМІЧНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ В АВІА- І АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ

БЕЛІКОВ С. Б.¹ *д.т.н., проф.*,
ВОЛЧОК І. П.² *д.т.н., проф.*,
МІТЯЄВ О. А.³ *д.т.н., проф.*

¹ кафедра фізичного матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Запорізький національний технічний університет», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 764-25-06, e-mail: rector@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9510-8190

² кафедра композиційних матеріалів, хімії та технологій, Державний вищий навчальний заклад «Запорізький національний технічний університет», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 764-13-51, e-mail: volchok@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

³ кафедра композиційних матеріалів, хімії та технологій, Державний вищий навчальний заклад «Запорізький національний технічний університет», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: mityaev@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

Анотація. Вступ. Кераміка в останні роки стала третім промисловим матеріалом після металів і полімерів завдяки своїм фізичним і хімічним властивостям: малій питомій вазі, високими жароміцності і хімічній інертності та корозійної стійкості. Створення надлегких СМС-композитів (Ceramic Matrix Composites) на базі кераміки надало можливість суттєво підвищити експлуатаційні характеристики двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних. До недоліків кераміки відносяться: висока крихкість, низькі оброблювальність різанням та стабільність механічних і службових властивостей. **Підвищення властивостей кераміки.** Можливі два підходи до усунення головного недоліку кераміки – крихкості та до підвищення в'язкості руйнування керамічних виробів: 1) подрібнення порошоків до нанорозміру і удосконалення процесів компактування і спікання при виробництві СМС-композитів; 2) гальмування зростання крихких тріщин під навантаженням виробів за рахунок відповідного складу порошкової шихти та за рахунок армування керамічної матриці різними волокнами. Ці та інші підходи надають можливість підвищити коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} з 1-2 до 15-20 МПа · м^{1/2}. **Використання керамічних виробів.** За даними Національного бюро стандартів США використання кераміки для виготовлення деталей авіаційних і автомобільних двигунів, різального інструменту, оптоприладів для передачі інформації і інше дозволяє знизити витрати дорогих і дефіцитних металів (титан, тантал, вольфрам, кобальт, нікель) та одержати значну економію ресурсів.

Використання кераміки для виготовлення авіаційних підшипників надало можливість підвищити швидкість роторів, знизити вимоги до змащення та охолодження. Низька фірм, зокрема «ESR» (ФРН), серійно випускає суцільно керамічні підшипники. В рамках Європейської програми створено Joint Strike Fighter (Єдиний Ударний Винишувач) з використанням у конструкції головних підшипників гібридного типу, в яких роликіві елементи виготовлені керамічними.

Поширюється використання керамічних виробів в автобудуванні. Так японська компанія «Nissan» однією з перших повідомила про серійне застосування турбокомпресорів з роторами з Si₃N₄. Фірма «Isuzu» (Японія) повідомила про успішну розробку керамічного двигуна, що працює на бензині та дизельному паливі та розвиває швидкість до 150 км/год.

Як висновок можна стверджувати, що зараз підвищення тактико-технічних характеристик авіаційних, автомобільних та інших двигунів стало неможливим без застосування керамічних матеріалів.

Ключові слова: кераміка; композити; структура; властивості; використання

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В АВИА- И АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

БЕЛИКОВ С. Б.¹ *д.т.н., проф.*,
ВОЛЧОК И. П.² *д.т.н., проф.*,
МИТЯЕВ А. А.³ *д.т.н., проф.*

¹ кафедра физического материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Запорожский национальный технический университет», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 764-25-06, e-mail: rector@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9510-8190

² кафедра композиционных материалов, химии и технологий, Государственное высшее учебное заведение «Запорожский национальный технический университет», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 764-13-51, e-mail: volchok@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

³ кафедра композиционных материалов, химии и технологий, Государственное высшее учебное заведение «Запорожский национальный технический университет», ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: mityaev@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

Аннотация. Введение. Керамика в последние годы стала третьим промышленным материалом после металлов и полимеров благодаря своим физическим и химическим свойствам: малому удельному весу, высоким жаропрочности, химической инертности и коррозионной стойкости. Создание сверхлегких СМС-композитов (Ceramic Matrix Composites) на базе керамики позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных. К недостаткам керамики относятся: высокая хрупкость, низкая обрабатываемость резанием и нестабильность механических и служебных свойств. **Повышение свойств керамики.** Возможны два подхода к устранению главного недостатка керамики – хрупкости и к повышению вязкости разрушения керамических изделий: 1) измельчение порошков до наноразмера и усовершенствование процессов компактирования и спекания при производстве СМС-композитов; 2) торможение роста хрупких трещин под нагрузкой изделий за счет соответствующего состава порошковой шихты и за счет армирования керамической матрицы различными волокнами. Эти и другие подходы дают возможность повысить коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} с 1-2 до 15-20 МПа · м^{1/2}. **Использование керамических изделий.** По данным Национального бюро стандартов США использование керамики для изготовления деталей авиационных и автомобильных двигателей, режущего инструмента, оптических приборов для передачи информации и другое позволяет снизить расходы дорогих и дефицитных металлов (титан, тантал, вольфрам, кобальт, никель) и получить значительную экономию ресурсов.

Использование керамики для изготовления авиационных подшипников позволило повысить быстроходность роторов, снизить требования к смазке и охлаждению. Ряд фирм, в частности «ESR» (ФРГ), серийно выпускает сплошь керамические подшипники. В рамках Европейской программы создан Joint Strike Fighter (Единый Ударный Истребитель) в конструкции которого применены главные подшипники гибридного типа с роликовыми элементами из керамики.

Расширяется использование керамических изделий в автостроении. Так японская компания «Nissan» одной из первых сообщила о серийном применении турбокомпрессоров с роторами с Si₃N₄. Фирма «Isuzu» (Япония) сообщила об успешной разработке керамического двигателя, работающего на бензине и дизельном топливе и развивающего скорость до 150 км/ч.

Как вывод можно утверждать, что сейчас повышение тактико-технических характеристик авиационных, автомобильных и других двигателей стало невозможным без применения керамических материалов.

Ключевые слова: керамика; композиты; структура; свойства; применение

CERAMIC COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT AND AUTOMOBILE BUILDING

BELIKOV S. B.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
VOLCHOK I. P.² *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
MITYAEV A. A.³ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Physical Materials Science, State Higher Educational Institution "Zaporizhzhia National Technical University", Zhukovskiy st., 64, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 764-25-06, e-mail: rector@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9510-8190

² Department of Composite Materials, Chemistry and Technology, State Higher Educational Institution "Zaporozhye National Technical University", Zhukovskiy st., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061) 764-13-51, e-mail: volchok@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

³ Department of Composite Materials, Chemistry and Technology, State Higher Educational Institution "Zaporozhye National Technical University", Zhukovskiy st., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-71, e-mail: mityaev@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

Annotation. Introduction. The ceramics by its physical and chemical properties, small specific gravity, high heat-resistance, corrosion-resistance and chemical inertness groves at last year's third industrial material after metals and polymers. The production of super-light CMC-composites (Ceramics Matrix Composites) on the base of ceramics gives a chance to a marked degree increase service properties of engines of internal combustion and aircraft turbines. High brittleness, low machinability and stability of mechanical and service properties are main drawbacks of ceramics. **Improvement of ceramics' properties.** There are two methods of removal of ceramics brittleness – its main drawback – and increasing of fracture toughness of ceramics products: 1) powder grinding up to nanosize and improvement compacting and sintering processes during production of CMC-composites; 2) the preventing of brittle cracks formation in loading process of parts by regulation of mixture powders composition and untorcing by filters and so on. These methods give a chance to raise a stress intensity factor K_{Ic} of composite material from 1-2 to 15-20 МПа · м^{1/2}. **Using of ceramics products.** In accordance with United States of America Standard Bureau data the using of ceramics parts and materials in aircraft, automobile building, productions of cutting tools and optical devices for broadcasting of information and so on give ability to decrease an expenses of titanium, tantalum, tungsten, cobalt, nickel and get essential economy of resources. The using of ceramics for production of aviation bearings gives an ability of increasing of rotors rotations speed, decrease requirements to lubricating and cooling. The compans "ESK" (FRD) produces ceramics bearings. According to European program of Joint Strike Fighter creation the ceramics bearing will be used.

The Japan company “Nissan” produces turbo-compressors with rotors, made from ceramics Si₃N₄. Company “Isuzu” gave the information about producing of ceramics engine which is working on a benzine and diesel fuel and has speed up to 150 km/h.

As conclusion, it may be said the now the increasing of tactic-technical characteristics of avia- and automobile engines stands impossible without the using of ceramics materials.

Keywords: ceramics; composites; structure; properties; employment

Вступ

Кераміка відноситься до основних матеріалів, які справляють визначальний вплив на рівень і конкурентоспроможність промислової продукції. Кераміка зробила дійсну революцію в матеріалознавстві, за короткий час ставши, за загальною думкою, третім промисловим матеріалом після металів і полімерів. Вона була першим конкурентоспроможним у порівнянні з металами класом матеріалів для використання при високих температурах.

За призначенням розрізняють електро-, магніто-, опто-, хемо-, ядерну, напівпровідну, термо- та механокераміку. В табл. 1 наведено основні види кераміки, яку використовують у двигунобудуванні та при виготовленні інструменту.

Головними позитивними рисами кераміки в порівнянні з металами є: більш високі жароміцність, зносостійкість, корозійна стійкість, хімічна інертність та теплоізоляційна здібність. До основних недоліків кераміки відносяться: висока крихкість, низькі оброблювальність різанням та стабільність механічних і службових властивостей. Останнє

Таблиця 1

Характеристика основних видів кераміки / Characteristics of the main types of ceramics

Тип кераміки	Використовувані властивості	Застосування	Використовувані сполуки
Термокераміка	Жароміцність, жаростійкість, вогнетривкість, теплопровідність, коефіцієнт термічного розширення (КТР), теплоємність	Вогнетриви, теплові труби, ротори і лопаті газових турбін, деталі камер згоряння двигунів, теплообмінники, теплозахист	SiC, TiC, B ₄ C, TiB ₂ , ZrB ₂ , Si ₃ N ₄ , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , композити
Механокераміка	Твердість, міцність, модуль пружності, в'язкість руйнування, зносостійкість, триботехнічні властивості, КТР, термостійкість	Кераміка для теплових двигунів, ущільнювальна, антифрикційна і фрикційна кераміки, різальний інструмент, прес-інструмент, напрямні та інші зносостійкі деталі	Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , SiC, TiB ₂ , ZnB ₂ , TiC, TiN, WC, B ₄ C, Al ₂ O ₃ , BN, композити

створює значні проблеми при виготовленні деталей з кераміки. В даній статті з урахуванням результатів власних досліджень [4] і літературних даних [1-3,5,6] наведено аналіз технологій виробництва керамічних деталей в основному для авіа- і автовиробництва.

Аналіз проблеми

Основними напрямками в покращенні експлуатаційних характеристик авіаційних двигунів є підвищення температури робочого циклу та зниження маси конструкції. В цьому напрямі на сьогодні у світі проводиться активний пошук нових високотемпературних композитних матеріалів і технологій виготовлення з них деталей. Питома вага надлегких СМС-композитів (Ceramics Matrix Composites) складає лише третину питомої ваги металевих сплавів, що дозволяє при їх використанні суттєво підвищити експлуатаційні характеристики двигунів: довговічність і паливну економічність. СМС-композити, окрім високих міцності, тріщиностійкості, хімічної інертності та корозійної стійкості, характеризуються набагато більш значною теплостійкістю, ніж металеві сплави, тому потребують подання меншої кількості повітря для охолодження гарячої частини двигуна. За рахунок використання зменшеної кількості повітря у

газоповітряному тракті при робочому циклі підвищується ККД двигуна. Прогнозується, що потреба в СМС-композитах протягом наступного десятиріччя збільшиться мінімум у 10 разів [1].

З другого закону термодинаміки випливає, що для підвищення ККД будь-якого термодинамічного процесу необхідно підвищувати температуру на вході в енергетичний перетворювальний пристрій: $\text{ККД} = 1 - T_2/T_1$, де T_1, T_2 – температури відповідно на вході та виході енергетичного перетворювального пристрою. Чим вище температура T_1 , тим більше ККД. Однак максимально припустимі температури визначаються теплостійкістю матеріалу. Конструкційна кераміка допускає застосування вищих температур у порівнянні з металом і тому є перспективним матеріалом для двигунів внутрішнього згоряння і газотурбінних двигунів. Крім вищого ККД двигунів за рахунок підвищення робочої температури перевагами кераміки є низькі густина і теплопровідність, підвищена термо- і зносостійкість. Крім того, при її використанні знижуються або відпадають витрати на систему охолодження.

Разом з тим слід зазначити, що в технології виготовлення керамічних двигунів залишається низка невирішених проблем. До них, насамперед, відносяться проблеми забезпечення надійності,

стійкості до термічних ударів, розроблення методів з'єднання керамічних деталей з металевими та пластмасовими.

Керамічна технологія передбачає такі основні етапи: одержання вихідних порошків, консолідація порошків, тобто виготовлення компактних матеріалів, їх оброблення та контроль виробів. При виробництві високоякісної кераміки з високою однорідністю структури використовують порошки вихідних матеріалів з розміром часток до 1 мкм. Процес одержання настільки високого ступеня дисперсності вимагає великих енерговитрат і є одним з основних етапів керамічної технології.

Подрібнювання здійснюється механічним шляхом за допомогою молотильних тіл, а також шляхом розпилення подрібнюваного матеріалу у рідкому стані, осадженням на холодних поверхнях з парогазової фази, віброкавітаційною дією на частки, що перебувають у рідині, за допомогою високотемпературного синтезу, що самопоширюється, та іншими методами. Для надтонкого розмолу (частки менше 1 мкм) найбільш перспективними є вібраційні млини або атритори.

Консолідація керамічних матеріалів складається з процесів формування і спікання. Розрізняють три основні групи методів формування [2,6]:

1. Пресування під дією стискального зусилля, під час якої відбувається ущільнення порошку за рахунок зменшення пористості.

2. Пластичне формування витисненням прутків і труб через мундштук (екструзія) формувальних мас з пластифікаторами, які збільшують їх текучість.

3. Шлікерне лиття для виготовлення тонкостінних виробів будь-якої складної форми, у якому для формування використовують рідкі суспензії порошків.

При переході від пресування до пластичного формування та шлікерного лиття збільшуються можливості виготовлення виробів складної форми, однак ускладнюється процес сушіння виробів і видалення пластифікаторів з керамічного матеріалу. Тому для виготовлення виробів порівняно простої форми перевага віддається пресуванню, а більше складної – екструзії та шлікерному литтю.

При спіканні окремі частки порошків перетворюються в моноліт і формуються остаточні властивості кераміки. Процес спікання супроводжується зменшенням пористості й усадкою.

Застосовують печі для спікання при атмосферному тиску, установки гарячого ізостатичного пресування (газостати), преси гарячого пресування із зусиллям пресування до 1500 кН. Температура спікання залежно від складу становить 2000-2200 °С.

Часто застосовують складні методи консолідації, які поєднують формування зі спіканням, а в деяких випадках – синтез сполуки, що утворюється, з одночасним формуванням і спіканням.

Оброблення кераміки і контроль є основними складниками в балансі вартості керамічних виробів.

За деякими даними, вартість вихідних матеріалів і консолідації становить усього лише 11 % (для металів 43 %), у той час як на оброблення припадає 38 % (для металів 43 %), а на контроль 51 % (для металів 14%). До основних методів оброблення кераміки відносяться термооброблення і розмірне оброблення поверхні. Термооброблення кераміки проводиться з метою кристалізування межзеренної склофази. При цьому на 20-30 % підвищуються твердість і в'язкість руйнування матеріалу.

Більшість керамічних матеріалів важко піддається механічному обробленню. Тому основною умовою керамічної технології є одержання при консолідації практично готових виробів. Для доведення поверхонь керамічних виробів застосовують абразивне оброблення алмазними кругами, електрохімічне, ультразвукове і лазерне оброблення. Ефективним є застосування захисних покриттів, що дозволяє залікувати найдрібніші поверхневі дефекти – нерівності, риси тощо.

Для контролю керамічних деталей найчастіше використовують рентгенівську і ультразвукову дефектоскопію.

Враховуючи, що більшість керамічних матеріалів має низьку в'язкість і пластичність і відповідно низьку тріщиностійкість, для атестації виробів застосовують методи механіки руйнування з визначенням коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} . Одночасно будують діаграму, що показує кінетику зростання дефекту. Кількісно в'язкість руйнування кристалічної кераміки та скла становить близько $1-2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, у той час як для металів значення K_{IC} значно вище (більше $40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Міцність хімічних міжатомних зв'язків, завдяки якій керамічні матеріали мають високу твердість, хімічну і термічну стійкість, одночасно обумовлює їх низьку здатність до пластичного деформування і схильність до крихкого руйнування.

Можливі два підходи до підвищення в'язкості руйнування керамічних матеріалів. Один з них – найбільш ефективний, пов'язаний з удосконаленням способів подрібнювання до нанорозміру порошків, їх ущільнення і спікання. Другий підхід полягає в гальмуванні зростання тріщин під навантаженням. Існує кілька способів рішення цієї проблеми [4].

Один з них заснований на тому, що в деяких керамічних матеріалах, наприклад, у діоксиді цирконію ZrO_2 , під тиском відбувається перебудова кристалічної структури. Вихідна тетрагональна структура ZrO_2 переходить у моноклінну, що має на 3-5 % більший об'єм. Розширюючись, зерна ZrO_2 стискають тріщину, і вона втрачає здатність до поширення (рис. 1, а). При цьому опір крихкому руйнуванню зростає до $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

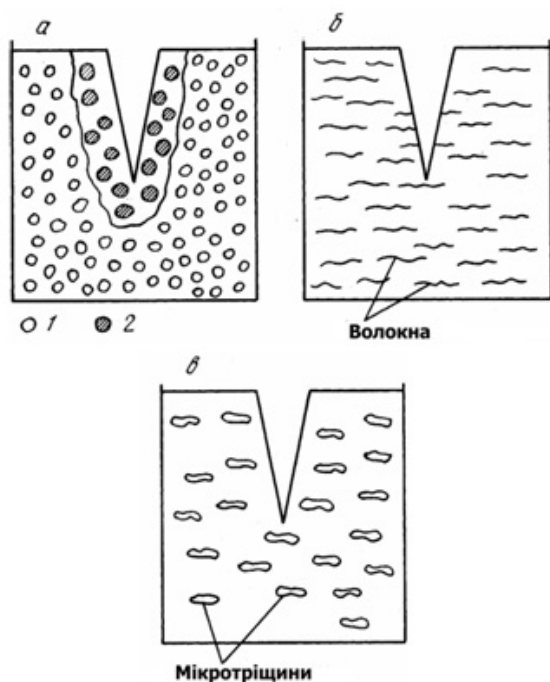


Рис. 1. Схема зміцнення конструкційної кераміки включеннями ZrO_2 (а), волокнами (б) і дрібними тріщинами (в):

1 - тетрагональний ZrO_2 ; 2 - моноклінний ZrO_2 . /
 Scheme of reinforcement of structural ceramics by
 ZrO_2 (а), fibers (б) and small cracks (в):
 1 - tetragonal ZrO_2 ; 2 - monoclinic ZrO_2 .

Другий спосіб (рис. 1, б) полягає у створенні композиційного матеріалу за рахунок введення в кераміку волокон з більш міцного керамічного матеріалу, наприклад, карбіду кремнію SiC. Тріщина, що розвивається, на своєму шляху зустрічає волокно і далі не поширюється. Опір руйнуванню склокераміки з волокнами SiC зростає до 18-20 МПа · м^{1/2}, істотно наближаючись до відповідних значень для металів.

Третій спосіб полягає в тому, що за допомогою спеціальних технологій весь керамічний матеріал пронизують мікротріщини (рис. 1, в). При зустрічі основної тріщини з мікротріщиною кут у вістрі тріщини зростає, відбувається затуплення тріщини, і вона далі не поширюється.

Найбільшого поширення набув другий спосіб завдяки технологічності та можливості використання різних волокон в керамічній матриці. По суті це є технологія створення волокнистих композиційних матеріалів.

Певний інтерес також становить фізико-хімічний спосіб підвищення надійності кераміки. Він реалізований для одного з найперспективніших керамічних матеріалів на основі нітриду кремнію Si_3N_4 . Спосіб ґрунтується на утворенні певного стехіометричного складу твердих розчинів оксидів металів у нітриді кремнію, які одержали назву сіалонів. Прикладом високоміцної кераміки, що утворюється в цій системі, є сіалони складу $Si_{3-x}Al_xN_{4-x}O_x$, де x змінюється від 0 до 2,1.

Одержують сіалони спіканням при 2020 К і вище в нейтральній атмосфері або гарячим пресуванням сумішей нітридів алюмінію і кремнію, оксиду алюмінію і діоксиду кремнію, а також магнійалюмінівої шпінелі. Важливими властивостями сіалонної кераміки є надзвичайно високі механічні властивості та стійкість до окислювання при високих температурах, значно вища, ніж у нітриду кремнію.

Використання керамічних виробів

Як визначалося вище, керамічні матеріали мають високу жароміцність, чудову корозійну стійкість і малу теплопровідність, що дозволяє з успіхом їх використовувати як елементи теплового захисту та деталі, що працюють при високих температурах в двигунах літаків та автомобілів.

Дослідження, проведене Національним бюро стандартів США, показало, що використання керамічних матеріалів дозволило до 2000 р. здійснити економію ресурсів країни в розмірі більше 3 млрд. доларів. Економія була досягнута, насамперед, за рахунок використання транспортних двигунів з деталями з кераміки, керамічних матеріалів для оброблення різанням і оптокераміки для передачі інформації. Крім прямої економії застосування кераміки дозволило знизити витрату дорогих і дефіцитних металів: титану і танталу в конденсаторах, вольфраму і кобальту в різальних інструментах, кобальту, хрому і нікелю в теплових двигунах.

Кераміка з успіхом використовується для виготовлення підшипників. Високі робочі температури та зносостійкість керамічних матеріалів дозволяють підвищити швидкохідність обертання роторів, знизити вимоги до змащення й охолодження. Важливими чинниками є також немагнітність, корозійна стійкість і електроізоляційні властивості керамічних матеріалів. Використовуються, в основному, нітридкремнієві матеріали з $K_{Ic} > 8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, твердістю за Вікерсом 12 000 Н/мм², модулем пружності $> 210 \text{ ГПа}$, густиною $< 4 \text{ г/см}^3$, границею міцності при згині $> 700 \text{ МПа}$, робочою температурою $\leq 800^\circ\text{C}$.

Гібридні підшипники з тілами кочення з такої кераміки мають у порівнянні зі сталевими в 3-10 разів вищу довговічність, в 10 разів вищу зносостійкість, та робочу температуру до 600°C. Такий підшипник, наприклад, був випробуваний на двигуні «Agroop» (VSTT) і відпрацював 50 хв при частоті обертання 39000 об/хв і відсутності змащення. Гібридний підшипник коштує дещо дорожче, ніж сталевий, однак за рахунок виключення системи змащування може бути досягнута істотна економія. Низка фірм, зокрема «ESK» (ФРН), серійно випускає суцільнокерамічні підшипники. В рамках Європейської програми Joint Strike Fighter (Єдиний Ударний Винищувач) є включення до конструкції головних підшипників гібридного підходу, за яким роликові елементи виготовляють

керамічними. Необхідність застосування таких підшипників у перспективних конструкціях авіадвигунів обумовлена вирішенням проблем опору високим температурам і навантаженням, які діють всередині газогенераторів.

У порівнянні з металевими матеріалами тонкі технічні кераміки мають значні переваги у жароміцності, опору зношуванню та ерозії, теплоізоляційній здатності, корозійній стійкості та багатьох інших властивостях.

Використання наноструктурних карбідних, нітридних і боридних плівок (TiC, TiN, TiB₂, Ti(C, N), (Ti, Al)N та ін.) у якості зносостійких покриттів підвищує робочий ресурс інструменту в декілька разів. Наприклад, одношарове покриття із карбонітриду титану та багатшарове нітридне покриття інструменту (Ti, Al, Y)N/VN дозволяють отримати наступні характеристики (при обробленні легованої сталі твердістю 38HRC зі швидкістю різання 385 м/хв і подачі 0,2 мм/оберт.): робочий ресурс різця без покриття – 7 хв; різця з покриттям Ti(C, N) – 53 хв; різця з покриттям (Ti, Al, Y)N/VN – 141 хв.

Наноструктурний стан кераміки дозволяє здолати багато її основних недоліків. Для наноструктурної кераміки можливо використовувати ефект надпластичності, що дозволяє проводити її пластичну деформацію (прокатування, штампування та ін.). Явище надпластичності забезпечується при наявності структурних складових кераміки розміром 10 нм. Така поведінка матеріалу може бути пояснена за допомогою моделей ковзання по межах зерен. Це пов'язано з тим, що дрібні кристалічні зерна, що утворюються наночастинками до процесу консолідації, при прикладанні навантаження мають змогу зсуву відносно самих себе без руйнування зв'язків крізь межзеренні межі, оскільки дифузійне (атомне) перенесення дозволяє швидко відновлювати мікропошкодження, що виникли на цих межах. Така дифузійна акомодация у прикордонних областях, дозволяє виготовляти гарячим штампуванням із нанофазних матеріалів виробу готової форми.

Окрім розмірів структурних складових дуже важливим фактором є стабільність структури керамічного матеріалу в процесі деформування. Зростання зерен, яке ініціюється деформацією, повинно бути мінімальним. Керамічні матеріали, у яких спостерігається інтенсивне зростання зерен (наприклад, у чистому Al₂O₃), не виявляють надпластичності або ефект значно обмежений. Однак додавання малої кількості домішок, що гальмують зростання зерен (наприклад, суміші порошоків Al₂O₃ з Al), суттєво підвищує показники надпластичності.

Триботехнічні властивості кераміки можуть бути значно покращені шляхом її модифікування нанорозмірними компонентами типу фулеренів. Найкращими протизношувальними властивостями характеризується кераміка, що містить 0,1...0,6 мас. % фулеренів. В цьому випадку, інтенсивність зношування оксидокераміки, у порівнянні з

немодифікованим станом, уповільнюється приблизно у 15 разів [4,5].

В автомобілебудуванні найбільш ефективним застосування кераміки може бути для виготовлення дизельних адіабатних поршневих двигунів з керамічною ізоляцією, і високотемпературних газотурбінних двигунів.

Конструкційні матеріали адіабатних двигунів повинні бути стійкі в області робочих температур 1300-1500 К, мати міцність при згині σ_{zg} не менше 800 МПа і коефіцієнт інтенсивності напружень не менше 8 МПа · м^{1/2}. Цим вимогам найбільшою мірою задовільняють кераміки на основі діоксиду цирконію і нітриду кремнію. Найширше роботи по керамічним двигунам проводяться в Японії та США. Японська фірма «Isuzu Motors Ltd» освоїла виготовлення форкамери та клапанного механізму адіабатного двигуна, фірма «Mazda Motors Ltd» – форкамери та пальця штовхача.

Компанія «Nissan» (Японія) однією з перших повідомила про серійне застосування турбокомпресорів з роторами з Si₃N₄, що виготовляються фірмою «NGK Insulators».

Переваги керамічних роторів перед металевими в турбокомпресорах дизельних двигунів полягають у наступному:

- менша інерційність і краща приймальність при низьких швидкостях;
- менша товщина стінки корпуса турбокомпресора у зв'язку зі зниженням маси обертового ротора;
- скорочення витрат дефіцитних металів (хрому, нікелю, молібдену);
- вища температура застосування;
- потенційне скорочення вартості при масовому виробництві.

Фірма «Isuzu» (Японія) повідомила про успішну розробку керамічного двигуна, що працює на бензині та дизельному паливі. Двигун дозволяє розвивати швидкість до 150 км/год, коефіцієнт повноти згоряння палива на 30-50 % вище, ніж у звичайних двигунів, а маса на 30 % менше.

Конструкційній кераміці для газотурбінних двигунів, на відміну від кераміки для адіабатних двигунів, не потрібна низька теплопровідність. Враховуючи, що керамічні деталі газотурбінних двигунів працюють при вищих температурах, вони повинні зберігати міцність на рівні 600 МПа при температурах до 1470-1670 К (у перспективі до 1770-1920 К) при пластичній деформації не більше 1 % за 500 год роботи. Як матеріал для таких відповідальних деталей газотурбінних двигунів: камера згоряння, деталі клапанів, ротор турбокомпресора, статор – використовують нітриди і карбіди кремнію, що мають високу теплостійкість.

Висновки

1. Кераміка відноситься до структурно- та фазочуттєвих матеріалів. Навіть при однаковому хімічному складі властивості керамічних матеріалів

та виробів з них можуть сильно відрізнятися залежно від вихідних матеріалів, методів і параметрів технології, структури та фазового складу спечених матеріалів, проміжних методів оброблення та якості поверхонь, методів визначення властивостей.

2. Багаточисельність складів, структур і технологій керамічних матеріалів забезпечує

можливість отримання та досягнення широкого спектру їх властивостей та областей використання.

3. Підвищення тактико-технічних характеристик авіаційних двигунів неможливо без застосування керамічних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авиационные материалы и технологии: настоящее и будущее. – Запорожье: Изд. комплекс АО «Мотор Сич» – 2016. – №2(1).
2. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия. 1991. – 205с.
3. Витязь П.А., Свидуневич Н.А., Куис Д.В. Наноматериаловедение. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.
4. Солнцеv Ю.П., Беліков С.Б., Волчок І.П., Шейко С.П. Спеціальні конструкційні матеріали: Підручник для ВНЗ. – Запоріжжя: Валпіс-Поліграф. – 2010. – 536с.
5. Солнцеv Ю.П., Пряхин Е.И., Воложанина С.А., Петкова А.П. Нанотехнологии и специальные материалы: учеб.пособие для вузов. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 336с.
6. Хасанов О.Л., Двиліс Э.С., Бикбаева З.Г. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий: Учебник. – Томск: Издательство Томского политехнического университета. – 2008. – 196 с.

REFERENCES

1. Aviatsonnyie materialyi i tehnologi: nastoyashee i budushee [Aviation materials and technologies: the future] – Zaporozhzhye: Motor Sish. – 2016, #2(1). (in Russian).
2. Andrijevskiy P.A. Poroshkovoe materialovedenie [Powder Material Seince] – М.: Metallurgiya, 1991. – 205p. (in Russian).
3. Hasanov O.L., Dvilis E.S., Bikbaeva Z.G. Metody kompaktirovaniya i konsolidatsii nanostrukturnyih materialov i izdeliy [Methods of consolidation ans compacting of nanostructured materials and articles]. – Tomsk: Tomsk Politechnical University. – 2008. – 196p. (in Russian).
4. Solntsev Yu.P., Belikov S.B., Volchok I.P., Sheyko S.P. Spetsialni konstruktsiini materialy [Special construction materials] . – ZaporIzhzhya: Valpis-Poligraf. – 2010. – 536p. (in Ukrainian).
5. Solntsev Yu.P., Pryahin E.I., Vologzhanina S.A., Petkova A.P. Nanotehnologii i specialnye materialy [Nanotechnologies and special materials] – St. Petersburg: Himizdat, 2009. – 336p. (in Russian).
6. Vityaz P.A., Svidunovich N.A., Kuis D.V. Nanomaterialovedenie [Nanomaterials Science]. – Minsk: Vyisheyshaya shkola, 2015. – 511p. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухінім (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Г.Д. Сухомлінім (Україна)