

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-99-110

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Б.Ю. Кузнецов¹, И.И. Власов¹, Д.В. Гриневич¹, О.Ю. Сорокин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Определены механизмы разрушения и физико-механические свойства многослойного керамического композиционного материала системы Mo–Si–B. Созданы качественные модели, позволяющие прогнозировать наиболее критические зоны разрушения композиционного материала. Исследовано влияние микроструктуры на механизмы разрушения. Проведены натурные испытания металлокерамического композиционного материала с многослойной структурой, в результате которых установлена высокая сходимость с рассчитанными моделями.

Ключевые слова: керамика, композиционный материал, многослойная структура, трещиностойкость, механические свойства, метод конечных элементов, модель упругости, модель пластичности

Для цитирования: Кузнецов Б.Ю., Власов И.И., Гриневич Д.В., Сорокин О.Ю. Моделирование разрушения металлокерамического композиционного материала с многослойной структурой методом конечных элементов // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-99-110.

Scientific article

MODELING THE DESTRUCTION OF A METAL-CERAMIC COMPOSITE MATERIAL WITH A MULTILAYER STRUCTURE BY THE FINITE ELEMENT METHOD

B.Yu. Kuznetsov¹, I.I. Vlasov¹, D.V. Grinevich¹, O.Yu. Sorokin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The purpose of this work is to determine the effect of the transitional diffusion zone at the interfacial boundary of the layers of the ceramic composite material of the Mo–Si–B system on the nature of destruction and physical and mechanical properties. Qualitative models have been created that make it possible to predict the most critical fracture zones of a composite material, and the effect of microstructure on the fracture mechanisms has been studied. Field tests of a ceramic-metal composite material with a multilayer structure were carried out, as a result of which a high convergence with the calculated models was established.

Keywords: ceramics, composite material, multilayer structure, crack resistance, mechanical properties, finite element method, elasticity model, plasticity model

For citation: Kuznetsov B.Yu., Vlasov I.I., Grinevich D.V., Sorokin O.Yu. Modeling the destruction of a metal-ceramic composite material with a multilayer structure by the finite element method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-99-110.

Введение

Применение керамических материалов в качестве конструкционных сопряжено с риском быстрого разрушения при возникновении дефекта критического размера. Внедрение деталей, изготовленных из керамических материалов, в конструкции наземных газотурбинных установок, газотурбинных двигателей, различных типов реакторов и других устройств высокотемпературной техники сдерживается их высокой хрупкостью. Актуальным остается вопрос создания научных основ для производства керамических трещиностойких материалов с сохранением присущих им функциональных свойств – жаропрочности, жаростойкости и др. [1]. Керамические материалы с повышенной трещиностойкостью имеют сложную, как правило, разнородную микроструктуру, за счет чего реализуются различные механизмы, замедляющие распространение трещины, такие как отклонение и затухание, вследствие диссипации энергии на межфазных границах раздела [2]. Разработка композиционных материалов, состоящих из чередующихся керамических и металлических слоев, представляет интерес, поскольку они сочетают требуемые физико-механические свойства. Вследствие наличия керамических фаз многослойный композиционный материал обладает более низкой плотностью, чем жаропрочные сплавы. Включение металлических слоев увеличивает трещиностойкость по сравнению с монолитными керамическими композиционными материалами из-за более сложного механизма разрушения [3].

Подобные многослойные композиционные материалы могут быть перспективными для изготовления деталей, эксплуатируемых при воздействии высоких температур, динамических нагрузок и агрессивных сред. Они отличаются балансом свойств – жаропрочности, трещиностойкости, сопротивления ползучести в сочетании с низкой плотностью [4, 5].

Важно отметить, что в научно-технической литературе практически не приводятся расчетные модели напряженно-деформируемого состояния металлокерамических композиционных материалов с многослойной структурой, позволяющих прогнозировать комплекс физико-механических свойств материала в зависимости от свойств и толщины отдельных слоев.

Материалы и методы

Образцы многослойного керамического материала синтезировали на промышленном горячем прессе. Шлифы полученного материала подготавливали с помощью шлифовально-полировальной машины и отрезного прецизионного станка.

Микроструктуру образцов исследовали согласно ГОСТ Р ИСО 22309–2015 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроанализ электронно-зондовый. Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше» на растровом электронном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром.

Испытание на трехточечный изгиб проводили на универсальной электродинамической испытательной машине. Испытанию подвергали образцы шириной и высотой 5 мм и длиной 55 мм с нанесенным концентратором напряжений в виде надреза. Испытания проводили согласно ГОСТ Р 57749–2017 (ИСО 17138:2014) «Композиты керамические. Метод испытания на изгиб при нормальной температуре».

Механические испытания на растяжение проведены на универсальной электро-механической испытательной машине согласно стандартам ASTM C1273–18 «Standard Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperatures» и ASTM C1366–04 «Standard Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Elevated Temperatures» при комнатной и повышенной температурах соответственно.

В качестве основного расчетного метода для моделирования механизмов разрушения многослойного керамического материала использовали метод конечных элементов, предусматривающий разбивку поверхности материала на единичные элементы и присвоение каждому из них тензора напряжений в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

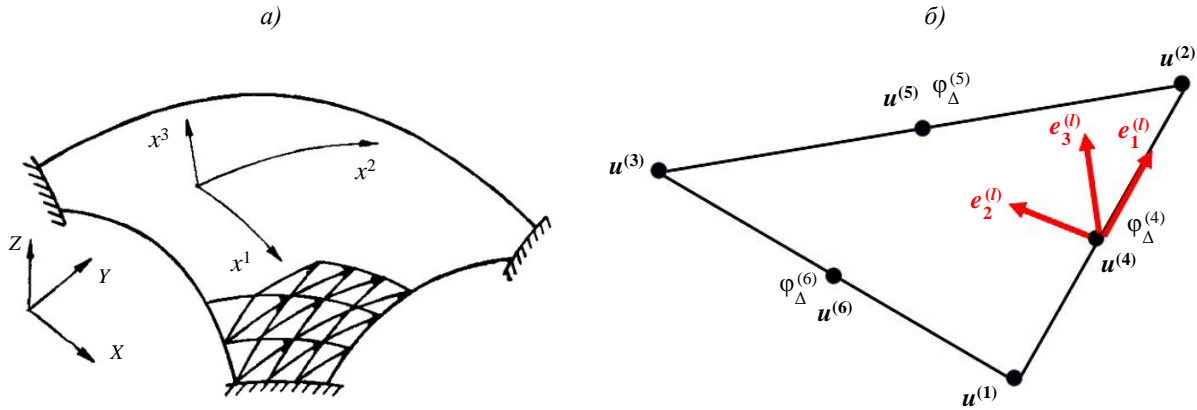


Рис. 1. Разбивка произвольной пластины на конечные элементы (а) и конечный элемент для оболочек Кирхгофа–Лява (б)

Уравнение для конечного элемента будет иметь вид:

$$K_e^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12}{h^2}G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12}{h^2}G_{23} \end{bmatrix},$$

где E_i – модули упругости; ν_{ij} – коэффициенты Пуассона; G_{ij} – модули сдвига.

Матрицы жесткости отдельных элементов $K_e^{(i)}$ объединяют в глобальную матрицу жесткости K .

Уравнение равновесия для метода конечных элементов можно записать в виде:

$$Ku = F,$$

где F – тензор первого порядка значений внешних воздействий (сил) согласно распределению по узлам граничных условий; K – глобальный тензор второго порядка жесткости элементов модели; u – тензор первого порядка перемещений узлов модели.

Данное выражение можно также представить в виде уравнений:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix},$$

где k_{mn} – жесткость по степеням свободы mn ; u_n – неизвестное перемещение по степени свободы n ; F_n – нагрузка по n -й степени свободы.

Деформации определяют по формуле:

$$\varepsilon = Du,$$

где ε – тензор деформаций; D – тензор операторов дифференцирования.

С учетом положения о совместности деформаций и небольшой толщины оболочки напряжения в каждом слое определяют исходя из предположения о линейном распределении деформаций по толщине оболочки. Согласно обобщенному закону Гука получают напряжения в слое:

$$\sigma^{(i)} = C^{(i)} \varepsilon^{(i)},$$

где $\sigma^{(i)}$ – тензор напряжений в i -м слое; $C^{(i)}$ – тензор жесткости материала в i -м слое; $\varepsilon^{(i)}$ – тензор деформаций в i -м слое.

В данной работе рассмотрены математические модели элементарных образцов на растяжение, изгиб и изгиб с V-образным концентратором материала, состоящего из чередующихся слоев молибдена и карбида кремния [6].

Математические модели компонентов получены из базы данных Granta. Для исследования нагруженного состояния молибдена применяли модель Стейнберга–Гуинана, которая учитывает изменение модуля сдвига и предела текучести. Такая модель позволяет изучить, как ведет себя материал в пластической зоне в зависимости от скорости деформации и температуры.

Изменение модуля сдвига рассчитывают по формуле:

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{dG/dP}{G_0} \right) \frac{P}{\left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/3}} + \left(\frac{dG/dT}{G_0} \right) (T - 300) \right\},$$

где G – модуль сдвига; G_0 – модуль сдвига в отсчетном состоянии (при температуре $T = 300$ К, нормализованном напряжении $p = 0$, эффективной деформации $\varepsilon_e = 0$); P – давление; $\frac{V_0}{V}$ – изменение объема тела.

Изменение предела текучести определяют по формуле:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left\{ 1 + \left(\frac{d\sigma_y}{dP} \right) \frac{P}{\left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/3}} + \left(\frac{d\sigma_y/dT}{\sigma_{y0}} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon_e^{pl}),$$

где σ_y – предел текучести; $\sigma_{y,0}$ – предел текучести в отсчетном состоянии (при температуре $T = 300$ К, нормализованном напряжении $p = 0$, эффективной деформации $\varepsilon_e = 0$); ε_e^{pl} – эффективная пластическая деформация; β – константа упрочнения.

Расчет напряженно-деформированного состояния карбида описывали по модели Джонсона–Холмквиста. Модель полезна для моделирования хрупких материалов, которые подвергаются высоким уровням давления, сдвиговой деформации или скоростям деформации. Данная модель также позволяет оценить повреждаемость материала. Предполагается, что предел прочности неповрежденного материала при одноосном разрушении определяется уравнением вида:

$$\sigma_{\text{intact}} = A(p + P_n)^n \left[1 + C \ln \left(\frac{de_p}{dt} \right) \right],$$

где A , C , n – материальные константы; t – время; e_p – неупругая деформация (для устранения зависимости от времени скорость неупругой деформации обычно нормируется эталонной скоростью деформации); p – нормализованное напряжение; P_n – нормализованное гидростатическое давление при растяжении.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Моделирование растягивающих напряжений

Растягивающие напряжения рассчитывали на образце, форма которого соответствует стандарту ASTM C1275. Модель включает два металлических и два керамических слоя. Механические свойства структурных составляющих получены из базы программного комплекса. Пластичный металлический слой представлен молибденовой фольгой, а в качестве жесткой и хрупкой керамики выбран карбид кремния (SiC). Слои закреплены относительно друг друга и способны к сдвиговым деформациям. Кроме того, эта модель не учитывает присутствия диффузионной границы, которая существует в структуре реального материала. Это может вносить значительные погрешности в прочностной расчет, поскольку диффузионная граница является концентратором напряжений и отличается определенной дефектностью. Перечисленные факторы в совокупности будут приводить к снижению прочностных характеристик по сравнению с расчетными [7]. Однако основной задачей данной работы было определение механизмов разрушения многослойного композиционного материала, а не прочностной расчет конкретной конструкции.

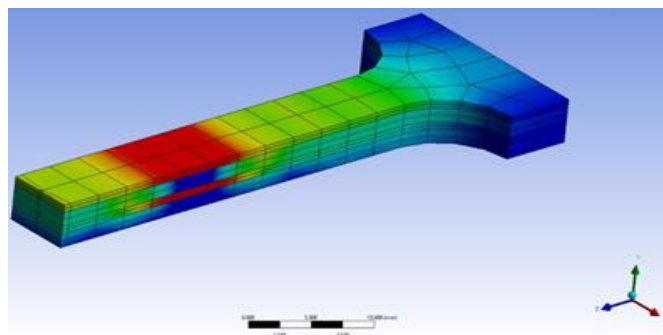


Рис. 2. Компьютерное моделирование при воздействии на образец растягивающих напряжений

На начальном этапе воздействия растягивающих напряжений многослойный металлокерамический композиционный материал равномерно нагружен по всем слоям. Затем разрушение происходит в керамических слоях (на рис. 2 область красного цвета в середине рабочей части образца). Дальнейшее нагружение приводит к кратному увеличению возникающих напряжений в металлических слоях. В результате в них практически сразу возникает пластическая деформация, из-за которой происходят их вытягивание относительно керамических слоев и последующее разрушение вследствие достижения металлом предела прочности [8]. При этом в образце присутствуют области, в которых напряжения равны нулю (на рис. 2 обозначены синим цветом). В рабочей части образца зафиксирована область с максимальным уровнем напряжений (1760 МПа).

Моделирование изгибающих напряжений

Моделирование напряжений, а также вероятности возникновения трещин выполняли на образце, форма которого соответствует ГОСТ 24409–80. Модель включает три металлических и четыре керамических слоя. Механические свойства структурных составляющих получены из базы программного комплекса. Пластичный металлический слой представлен молибденовой фольгой, а в качестве жесткой и хрупкой керамики выбран карбид кремния (SiC). Имеющиеся в структуре слои жестко закреплены относительно друг друга и не могут проскальзывать [9]. Архитектура рассматриваемой модели не содержит дополнительных структурных элементов (диффузионной границы), которые присутствуют в структуре реального материала, что обуславливает значительные погрешности в количественном расчете прочности. Это связано с тем, что диффузионная граница является концентратором напряжений и отличается определенной дефектностью, вследствие чего прочностные характеристики реального материала ниже расчетных [10].

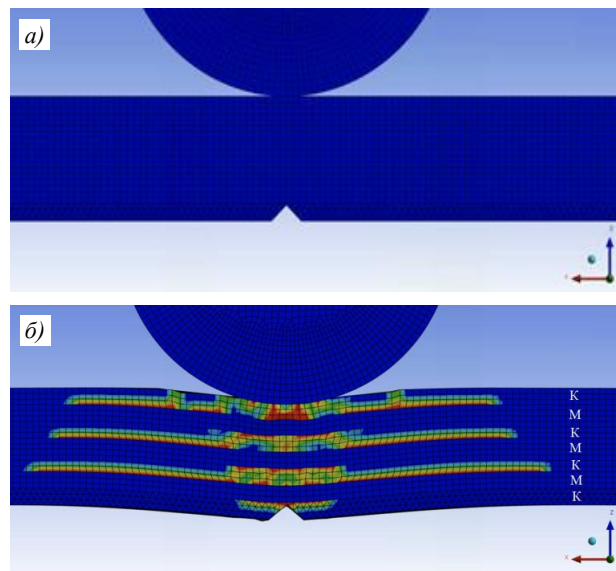


Рис. 3. Компьютерное моделирование при воздействии на образец изгибающих напряжений: *a* – исходное состояние; *б* – упруго-деформированное состояние (синим цветом обозначена нулевая вероятность разрушения материала, красным – 100%-ная)

Расчет модели по критерию разрушения показал, что при подобном типе нагрузки крупные магистральные трещины возникают практически в каждом керамическом слое, но появляются они последовательно от верхнего слоя к нижнему (рис. 3). Вместе

с тем энергии возникших трещин недостаточно для продолжения роста в металлических слоях. В связи с этим они изменяют свое направление, отклоняются и начинают распространяться вдоль нижней границы структурных составляющих [11]. Подобный механизм может приводить к расслаиванию реального материала, но скорости распространения трещины и разрушения будут существенно ниже по сравнению с монолитной керамикой.

Получение металлокерамического композиционного материала с многослойной структурой

В роли армирующего компонента – тугоплавкого металла, снижающего модуль упругости композиционного материала, выбран молибден благодаря высокой удельной прочности, невысокой стоимости, проработанности методик защиты от длительной высокотемпературной газовой коррозии [12].

В качестве исходных компонентов использованы молибденовая фольга толщиной 100 мкм и смесь порошков с массовой долей: Mo – от 60 до 75 %, Si – от 10 до 15 %, В – от 8 до 15 %. Из порошковой смеси, изготовленной совместным помолотом в планетарной мельнице для более эффективной гомогенизации, готовили суспензию с помощью ультразвукового диспергатора. Полученную суспензию наносили на поверхность молибденовой фольги, которую затем укладывали в графитовую пресс-форму для последующей диффузионной сварки под давлением на горячем прессе. Приложенное в процессе прессования давление составляло не менее 30 МПа, температура прессования – от 1400 до 1600 °С [13, 14].

Кажущуюся плотность и открытую пористость определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 473.4–81. Плотность полученного композиционного материала составляет 7,3 г/см³, открытая пористость: 0,3 %.

Испытание на изгиб многослойного композиционного материала

Диаграмма деформации, полученная в процессе испытания на трехточечный изгиб, представлена на рис. 4.

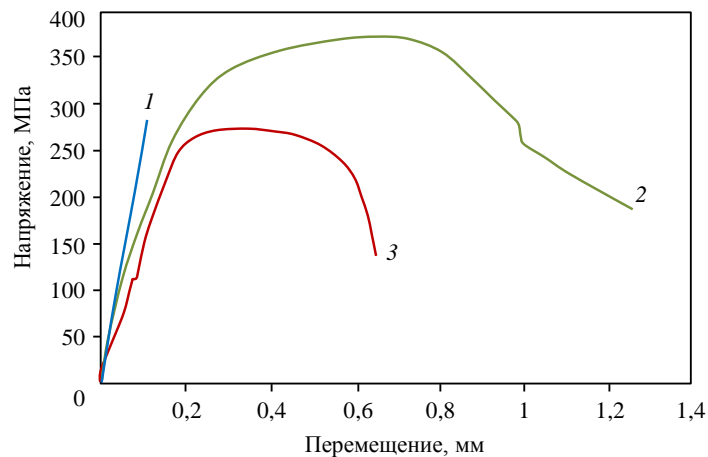


Рис. 4. Диаграмма «напряжение–прогиб» для образцов из монолитной керамики (1) и композиционного материала в исходном состоянии (2), с усталостной трещиной (3)

Образец из монолитной керамики с составом, аналогичным составу керамического слоя в композиционном материале, разрушается хрупко, без пластической деформации. Об этом свидетельствует линейный характер зависимости напряжения от величины прогиба.

Образец из многослойного композиционного материала в исходном состоянии имеет хорошее сопротивление разрушению. Согласно диаграмме изгиба, появлению трещины предшествует значительная пластическая деформация. Рост трещины сопровождается пластической деформацией слоев в ее вершине. Оба образца (сплошной и с V-образным концентратором напряжений) не разрушались окончательно, что свидетельствует о высокой энергоемкости разрушения. Фотографии образцов из монолитной керамики, а также из композиционного материала в исходном состоянии и с усталостной трещиной после испытания приведены на рис. 5.

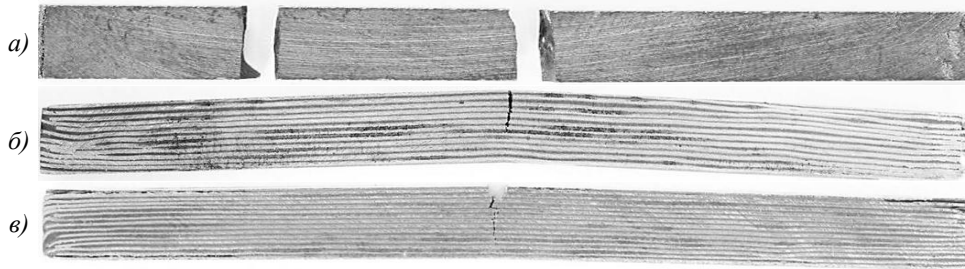


Рис. 5. Образцы из монолитной керамики (а) и композиционного материала в исходном состоянии (б), с усталостной трещиной (в) после испытания на статический изгиб

Микрофотография зоны разрушения образца из многослойного металлокерамического композиционного материала приведена на рис. 6. Направление развития трещины изменилось при ее входе в керамический слой. Трещина отклонилась и начала развиваться параллельно слоям фольги. Характер излома хрупко-вязкий.

Диаграмма изгиба и внешний вид образца после испытания свидетельствуют о существенно более высокой энергии, необходимой для разрушения многослойного композиционного материала, по сравнению с монолитной керамикой аналогичного состава [15].

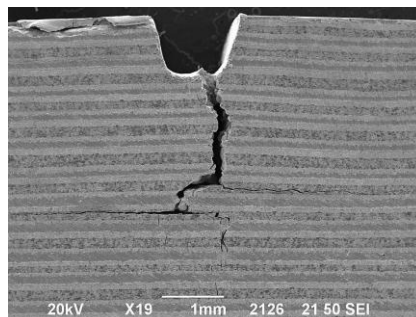


Рис. 6. Зона разрушения образца с усталостной трещиной после испытания на изгиб

Испытания на растяжение многослойного композиционного материала

Испытания на растяжение являются основным и наиболее распространенным методом лабораторного исследования и контроля механических свойств материалов. Наряду с пределом прочности при этих испытаниях определяют предел текучести и характеристики пластичности материала – относительное удлинение и сужение [16].

Важно помнить, что прочностные характеристики керамического материала зависят не только от его характеристик, но и от наличия дефектов. Процесс изготовления образца, в свою очередь, влияет на результат измерений и должен быть описан и учтен. Образец может разрушиться вне рабочей длины вследствие напряжений вблизи геометрических переходов и напряжений, вызванных захватами или градиентом температуры [17]. Такое испытание считается недействительным. Рекомендуется избегать химического взаимодействия материала с экстензометром, учитывать влияние поверхности образца, флуктуации температуры.

Приемлема любая форма образца, если форма захватов, рабочая длина, температурный градиент и требования к изгибу соответствуют стандарту ASTM C1275. Стандарты на испытания монокристаллической керамики предлагают плоский образец с квадратным или прямоугольным поперечным сечением рабочей длины с отверстием.

Испытаны семь образцов из исходного многослойного композиционного материала при комнатной температуре (20 °С). Образцы для испытаний на растяжение изготавливали на электроэрозионном вырезном станке. Отверстия вырезали с помощью гидроабразивного станка. Средние значения прочностных характеристик материала представлены в таблице.

Прочностные характеристики многослойного композиционного материала

Условный номер образца	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение после разрыва δ_5 , %
1	181	131	0,15
2	169	119	0,15
3	178	105	0,1
4	171	94	0,2
5	174	145	0,9
6	187	112	0,8
7	163	152	0,1
Среднее значение	174,7	122,6	0,34

На диаграмме деформации (рис. 7) имеется линейный участок области упругой деформации. После достижения условного предела текучести кривая носит волновой характер в области пластической деформации, что свидетельствует о послойном разрушении композиционного материала.

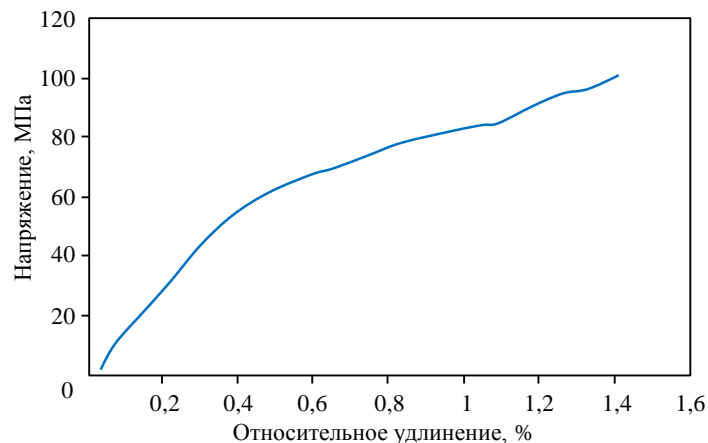


Рис. 7. Диаграмма деформации при температуре 1250 °С

При анализе торцевой поверхности образца, разрушенного после растяжения, можно заметить различный характер изломов керамической и металлической составляющей композиционного материала (рис. 8). Для металлической части характерно незначительное вытягивание металла над поверхностью керамики. Кроме того, отчетливо виден сложный профиль, образованный в результате зарождения множества трещин в процессе испытания, как вторичных, так и магистральных. Металлические составляющие отличаются гладкой поверхностью излома, что свидетельствует о протекании пластической деформации с достижением зоны текучести в процессе испытания [18].

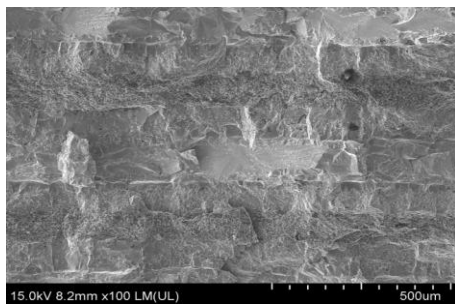


Рис. 8. Торец образца после испытаний многослойного композиционного материала

Заключения

Выполнено компьютерное моделирование механизмов разрушения металлокерамического композиционного материала с многослойной структурой в сравнении с реальными экспериментами. Создана качественная математическая модель металлокерамического композиционного материала, которая позволяет прогнозировать его разрушение для расчета деталей сложной формы. Определен механизм возникновения и распространения трещин в структуре материала. Получены данные о распределении напряжений в отдельных структурных элементах композита. Установлено, что наличие в структуре пластической фазы обеспечивает армирование керамики, изменяя характер разрушения с хрупкого на хрупко-вязкий. Показана высокая сходимость модели с реальными процессами, происходящими при испытаниях материала данного класса.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D. et al. Development and investigation of ceramic parts for gas-turbine engines // International Gas Turbine and aeroengine congress and exhibition. Orlando, 1997. P. 1–8.
2. Carollo V., Reinoso J., Paggi M. Modeling complex crack paths in ceramic laminates: A novel variational framework combining the phase field method of fracture and the cohesive zone model // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38. No. 7. P 4565–4567.
3. Коржов В.П., Кийко В.М. Структура слоистых Mo–Si–B и Nb–Si–B композитов // В сб. 9-ой Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов». Черноголовка, 2016. С. 155.
4. Jain M.K., Subrahmanyam J., Ray S. Development of Mo and Ta foil reinforced (MoSi₂ + 20 vol% SiC_p) matrix laminated composites // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 585. P. 306–310.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Wang H., Wang C. Preparation and mechanical properties of laminated zirconium diboride/molybdenum composites sintered by spark plasma sintering // Frontiers Material Science in China. 2009. Vol. 3. P. 273–280.
7. Cheng L., Sun M., Ye F. Structure design, fabrication, properties of laminated ceramics: A review // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2018. Vol. 1. P. 126–141.
8. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.

9. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 46–52.
10. Севальнев Г.С., Дульнев К.В., Банных И.О., Красуля А.А., Цих С.Г., Лукин Е.И. Исследование структуры и свойств диффузионных слоев после борирования сталей со сверхравновесным содержанием азота // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-17-29.
11. Shuwei Z., Rabczuk T., Zhuang X. Phase field modeling of quasi-static and dynamic crack propagation: COMSOL implementation and case studies // Advances in Engineering Software. 2018. No. 122. P. 31–49.
12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
13. Воронов В.А., Чайникова А.С., Лебедева Ю.Е., Житнюк С.В. Получение, физико-механические и триботехнические свойства горячепрессованного углерод-керамического композиционного материала на основе карбида кремния // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
14. Kiiko V., Prokhorov D., Stroganova T. Investigation of heat resistance and structure of layered refractory composites reinforced by chemical compound with silicon, carbon, and boron // Scientific proceedings XIV international congress «Machines. Technologies. Materials». Sofia, 2017. P. 421–424.
15. Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н., Плескань А.Ю., Самохвалов Н.Ю., Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Солнцев Ст.С., Евдокимов С.А. Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
16. Кийко В.М., Коржов В.П. Структура слоистых композитов Mo–Si–B и Nb–Si–B // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 11. С. 1513–1521.
17. Biamino S., Antonini A., Pavese M. MoSi₂ laminate processed by tape casting: Microstructure and mechanical properties' investigation // Intermetallics. 2008. Vol. 16. P.758–768.
18. Коржов В.П., Кийко В.М. Фазовая структура многослойных Nb/(Si–B) и Mo/(Si–B) композитов после термической обработки под давлением // VI Всероссийская конференция по наноматериалам. М., 2016. С. 386–387.

References

1. Nozhnitsky Y.A., Fedina Y.A., Rekin A.D. et al. Development and investigation of ceramic parts for gas-turbine engines. *International Gas Turbine and aeroengine congress and exhibition*. Orlando, 1997, pp. 1–8.
2. Carollo V., Reinoso J., Paggi M. Modeling complex crack paths in ceramic laminates: A novel variational framework combining the phase field method of fracture and the cohesive zone model. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 7, pp. 4565–4567.
3. Korzhov V.P., Kijko V.M. Structure of layered Mo–Si–B and Nb–Si–B composites. *9th Int. Conf. «Phase transformation and crystal strength»*. Chernogolovka, 2016, p. 155.
4. Jain M.K., Subrahmanyam J., Ray S. Development of Mo and Ta foil reinforced (MoSi₂ + 20 vol% SiC_p) matrix laminated composites. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 585, pp. 306–310.
5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Wang H., Wang C. Preparation and mechanical properties of laminated zirconium diboride/molybdenum composites sintered by spark plasma sintering. *Frontiers Material Science in China*. 2009, vol. 3, pp. 273–280.
7. Cheng L., Sun M., Ye F. Structure design, fabrication, properties of laminated ceramics: A review // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, vol. 1, pp. 126–141.

8. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 13, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
9. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I. Constructed layered materials based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass in the structures of new generation aircraft. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
10. Sevalnev G.S., Dulnev K.V., Bannykh I.O., Krasulya A.A., Tsikh S.G., Lukin E.I. Investigation of the structure and properties of diffusion layers after boriding high nitrogen steels. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 27, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-17-29.
11. Shuwei Z., Rabczuk T., Zhuang X. Phase field modeling of quasi-static and dynamic crack propagation: COMSOL implementation and case studies. *Advances in Engineering Software*, 2018, no. 122, pp. 31–49.
12. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
13. Voronov V.A., Chainikova A.S., Lebedeva Yu.E., Zhitnyuk S.V. Production, physico-mechanical and tribotechnical properties of hot-pressed carbon-ceramic composite material on the basis of silicon carbide. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 14, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
14. Kiiko V., Prokhorov D., Stroganova T. Investigation of heat resistance and structure of layered refractory composites reinforced by chemical compound with silicon, carbon, and boron. *Scientific proceedings XIV International congress «Machines. Technologies. Materials»*, 2017, vol. VII, pp. 544–547.
15. Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N., Pleskan A.Yu., Samokhvalov N.Yu., Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Solntsev St.S., Evdokimov S.A. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 23, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-51-58.
16. Kiyko V.M., Korzhov V.P. Structure of layered composites Mo–Si–B and Nb–Si–B. *Izvestiya RAN, ser.: Physical*, 2017, vol. 81, no. 11, pp. 1513–1521.
17. Biamino S., Antonini A., Pavese M. MoSi₂ laminate processed by tape casting: Microstructure and mechanical properties' investigation. *Intermetallics*, 2008, vol. 16, pp. 758–768.
18. Korzhov V.P., Kiyko V.M. Phase structure of multilayer Nb/(Si–B) and Mo/(Si–B) composites after heat treatment under pressure. *VI All-Rus. Conference on Nanomaterials*. Moscow, 2016, pp. 386–387.

Информация об авторах

Кузнецов Борис Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Власов Иван Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гриневич Дмитрий Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сорокин Олег Юрьевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Boris Yu. Kuznetsov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan I. Vlasov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry V. Grinevich, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg Yu. Sorokin, Head of the Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.07.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.08.2023.
The article was submitted 06.07.2023; approved and accepted for publication after reviewing 09.08.2023.