

Численное исследование влияния остаточных термических напряжений на разрушение металлокерамических композитов*

А.В. Землянов^{1,2}, Д.Д. Гатиятуллина^{1,2}, Р.Р. Балохонов²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Numerical Study of the Influence of Residual Thermal Stresses on the Fracture of Metal Matrix Composites

A.V. Zemlianov^{1,2}, D.D. Gatiyatullina^{1,2}, R.R. Balokhonov²

¹National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Tomsk, Russia)

Проведено численное исследование механического поведения композиционного материала «алюминий-карбид бора» при действии различных термомеханических нагрузок. Неоднородная структура композитов учитывается в расчетах в явном виде. Для описания механической реакции алюминиевой матрицы использовалась упругопластическая модель, а для керамических частиц — упругохрупкая модель. Для исследования процессов зарождения и распространения трещин в керамических частицах выбран критерий разрушения типа Губера с учетом локального напряженного состояния: объемное растяжение или объемное сжатие. Рассмотрен композиционный материал с единичной частицей карбида бора, находящейся в микрообъеме алюминиевой матрицы. Исследовано влияние остаточных термических напряжений, возникающих при охлаждении композиционного материала, от температуры, близкой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной на разрушение керамической частицы. Динамические краевые задачи решались численно методом конечных элементов в программном пакете ABAQUS/Explicit.

Ключевые слова: численное моделирование, металлокерамические композиты, механика сред со структурой, остаточные термические напряжения, разрушение.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-04

Введение

В настоящее время композиционные материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая авиакосмическую, энергетическую, автомобилестроительную [1–3].

A numerical study of the mechanical behavior of the «aluminum-boron carbide» composite material under different thermomechanical loading is performed. The complex structure of the composites is explicitly taken into account in the calculations. Isotropic elastoplastic and elastic-brittle constitutive models are used to describe the mechanical response of the aluminum matrix and ceramic particles, respectively. Huber type fracture criterion taking into account the local stress state: bulk tension, or compression, is chosen to study the origination and propagation of cracks in ceramic particles. The composite material microvolume with a single boron carbide particle embedded into the aluminum matrix is considered. The influence of the residual thermal stresses arising during cooling of the composite material from temperature close to the temperature of recrystallization of aluminum to the room temperature on the ceramic particle fracture is investigated. Dynamic boundary value problems are solved numerically by the finite element method in the ABAQUS / Explicit software package.

Keywords: numerical simulation, metal matrix composites, mechanics of non-homogeneous media, residual thermal stresses, fracture.

Композиты обладают существенной структурной неоднородностью, которая обусловлена наличием криволинейных границ раздела («покрытие — подложка», «матрица — частицы»), а также разницей механических и термических свойств компонентов

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 18-19-00273, <https://rscf.ru/project/18-19-00273/>). Модель разрушения, описываемая уравнением (1), разработана в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002.

(упругие модули, пределы прочности, коэффициенты теплового расширения и др.). На границе раздела двух сред с различными механическими характеристиками при внешнем нагружении могут возникать значительные концентрации напряжений. Вблизи геометрических неоднородностей зарождаются трещины и локализованные пластические сдвиги в матрице. Природу деформации структурно-неоднородных сред изучает физическая мезомеханика, которая рассматривает такие материалы как иерархически-организованные системы [4–6].

Свойства композиционных металлокерамических материалов и покрытий исследуют с помощью экспериментальных и численных методов. Компьютерное моделирование дисперсно-упрочненных композитов позволяет создавать конечно-элементные модели и учитывать микроструктуру композитов в явном виде [7, 8]. Численный эксперимент позволяет отделить составляющие напряженно-деформированного состояния друг от друга, исследовать влияние одного фактора при неизменных остальных. Учет микроструктурного фактора позволяет наиболее точно описать макроскопический отклик композита на нагружение. Во время технологического процесса изготовления композитов возникают остаточные напряжения [9]. Появление остаточных напряжений

связано с разницей между коэффициентами теплового расширения матрицы и частиц во время охлаждения материала. В работе [10] представлен микромеханический подход для изучения локальных свойств композиционного материала Al-SiC и влияния остаточных напряжений на разрушение упрочняющих частиц.

Ранее проведены численные исследования деформации и разрушения композиционных материалов и покрытий без учета остаточных напряжений [11], а также эволюции остаточных напряжений при охлаждении трехмерной структуры композиционного материала с единичной частицей карбида титана сложной экспериментально наблюдаемой формы [12]. В настоящей работе исследуется влияние остаточных напряжений на разрушение отдельной частицы карбида бора.

Постановка задачи

На рисунке 1а представлено изображение поперечного сечения композиционного покрытия, изготовленного методом лазерного наплавления. В масштабе одной частицы, когда рассматривается структура с единичной частицей (рис. 1в), можно выделить иерархию более тонких структурных неоднородностей, вблизи которых возникает концентрация напряжений (рис. 1г, д).

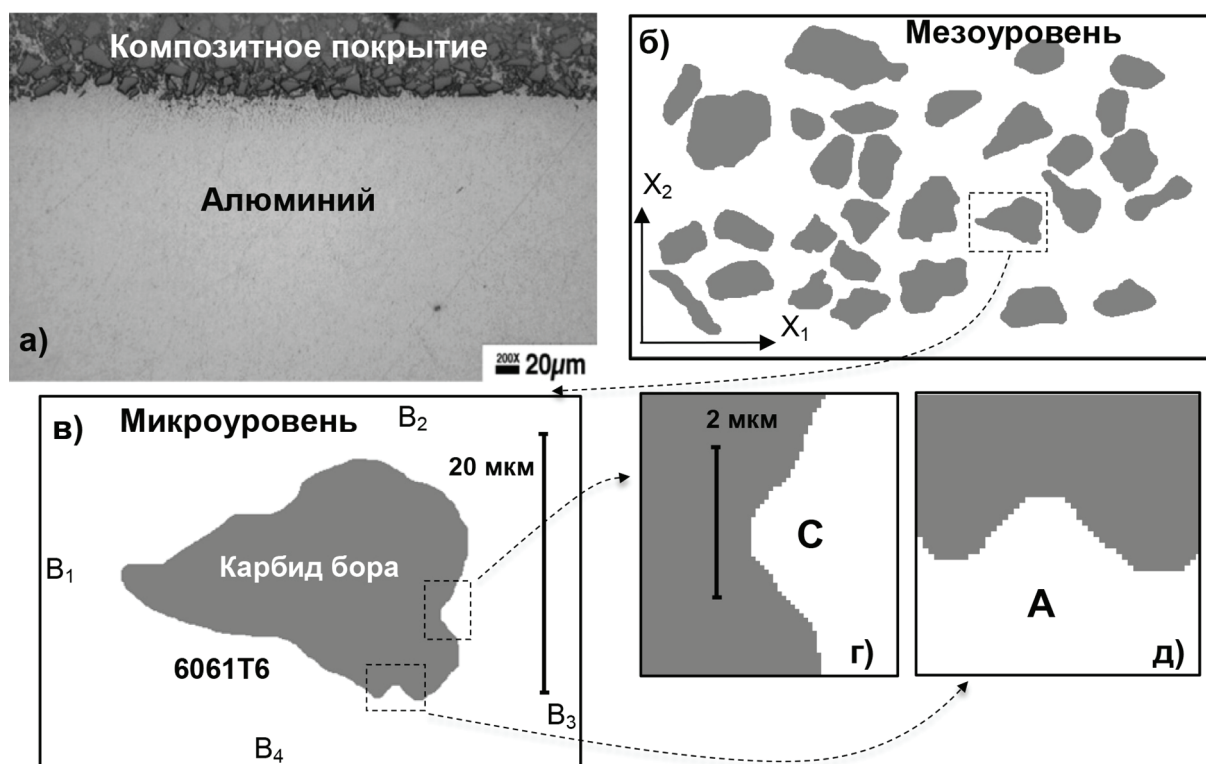


Рис. 1. Экспериментальная (а) и модельная структура алюминия с покрытием (б–д)

Можно выделить два типа неоднородностей С и А, которые направлены вдоль и перпендикулярно на-

правлению приложения нагрузки вдоль оси X_1 соответственно.

Общая система уравнений механики сплошной среды, включающая законы сохранения массы, количества движения, энергии, соотношения для деформаций, решается в двумерной постановке методом конечных элементов. Были созданы модельные структуры покрытия на микромасштабном уровне и построены конечно-элементные сетки, которые были импортированы в программный пакет ABAQUS/Explicit. Динамическая краевая задача решается в плоско-напряженной постановке.

Для алюминиевой матрицы и частиц карбида бора используются изотропные упругопластическая и упруго-хрупкая модели соответственно. Для описания кривой пластического течения алюминия используется ассоциированный закон течения с функцией изотропного упрочнения. Чтобы моделировать процессы трещинообразования в частицах, был выбран критерий разрушения типа Губера, который учитывает вид локального напряженного состояния в материале: объемное растяжение или сжатие (1).

$$\sigma_{eq} = \begin{cases} C_{ten}, & \text{если } p < 0 \\ C_{com}, & \text{если } p > 0 \end{cases} \quad (1)$$

где, C_{ten} и C_{com} — константы, характеризующие пределы прочности частиц на растяжение и сжатие, p — давление. Моделирование остаточных напряжений (ОН) предполагает введение шага с охлаждением структуры от температуры, близкой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной. При моделировании остаточных напряжений решаются соотношения Дюамеля-Неймана с учетом пластичности матрицы (2):

$$\dot{\sigma}_{ij} = -\dot{p}\delta_{ij} + \dot{\sigma}_{ij} = K(\dot{\epsilon}_{kk} - 3\alpha\dot{T})\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{kk}\delta_{ij}/3 - \dot{\epsilon}_{ij}^p) \quad (2)$$

где ϵ_{ij} и ϵ_{ij}^p — тензоры полных и пластических деформаций, ϵ_{kk} — объемная деформация, δ_{ij} — символ Кронекера, K и μ — модули объемного сжатия и сдвига, α — коэффициент термического расширения, T — температура, точка и запятая означают производную по времени и координате соответственно.

Механические свойства Al6061T6 и B₄C

Материал	ρ , г/см ³	K , ГПа	μ , ГПа	σ_s , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\mathcal{E}_r^p$, %	C_{ten} , МПа	C_{com} , ГПа	α , 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Al6061T6	2.7	66	26	332	234	9.5	—	—	22
B ₄ C	2.6	235	197	—	—	—	500	5	4.5

Для задания определяющих соотношений материалов в программный пакет ABAQUS/Explicit были разработаны пользовательские подпрограммы. Физико-механические свойства алюминиевой матрицы и карбида бора и экспериментальные константы, используемые в расчетах, представлены в таблице. Во время охлаждения границы B₁, B₂, B₃ и B₄ свободны от закреплений и нагрузок. При одноосном нагружении-сжатии или растяжении кинематические граничные условия прикладываются к границам B₁ и B₃, в то время как B₂ и B₄ являются свободными. При проведении расчета с учетом остаточных напряжений на первом шаге расчета структура охлаждается, на следующем шаге к ней прикладывается нагрузка.

В результате проведены расчеты для четырех типов задач термомеханического нагружения композитов:

- 1) сжатие структуры из начального недеформированного состояния (сжатие без учета ОН);
- 2) охлаждение структуры с последующим сжатием (сжатие с учетом ОН);
- 3) растяжение структуры из начального недеформированного состояния (растяжение без учета ОН);
- 4) охлаждение структуры с последующим растяжением (растяжение с учетом ОН).

Результаты численного моделирования

На рисунке 2 представлены результаты моделирования зарождения и распространения трещин в частице карбида бора при различных термомеханических нагрузках. Для представления результатов выбрана шкала давления, в которой серому цвету соответствуют максимальные значения положительного давления, красному цвету — минимальные отрицательные давления, белому — нулевое значение давления. На рисунке 3 изображены кривые деформирования композитов. Напряжение на кривых (σ) было вычислено как усредненное по расчетной области значение интенсивности напряжений, а деформация ϵ — относительное удлинение структуры в направлении прикладываемой нагрузки. Для удобства сравнения кривые деформирования при растяжении и сжатии композита из начального недеформированного состояния смещены на величину остаточной деформации после охлаждения $\epsilon = -0.7$. Сравним результаты расчетов для 1) и 2) типов задач. В обоих случаях при сжатии вблизи структурной неоднородности типа С образуется область растягивающих напряжений (рис. 2а, г).

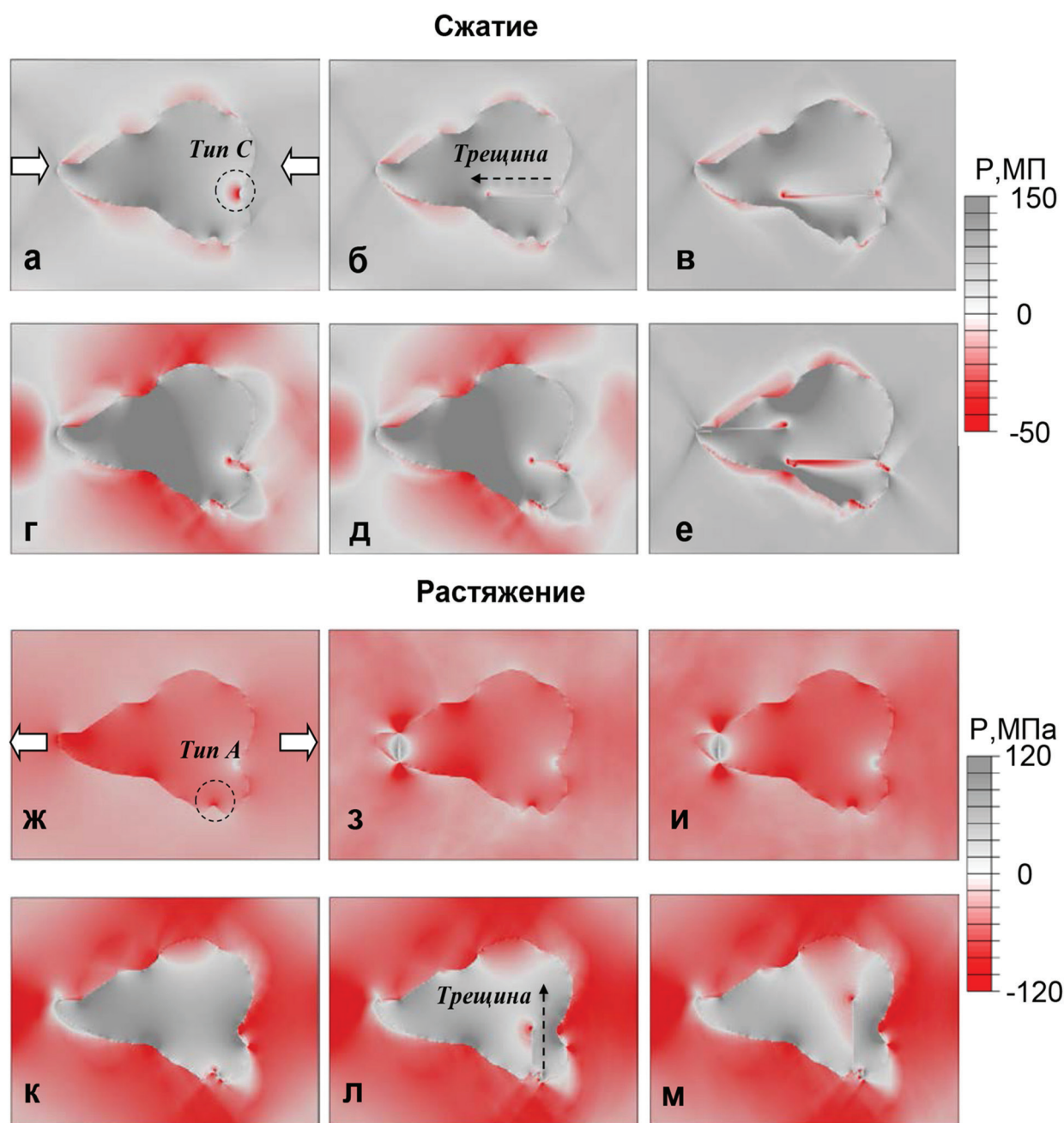


Рис. 2. Распределение давления для состояний а–м, представленных на рисунке 3 в виде графика

В случае 2) после охлаждения в этой области уже зародилась и начала распространяться трещина (рис. 2г), а в случае 1) трещина возникает при сжатии (рис. 2б). Направление распространения трещин параллельно направлению приложения нагрузки (рис. 2б, в). По сравнению со случаем 1) в случае 2) трещина распространяется медленнее (сравните последовательные моменты а, б и г, д). На более поздней стадии нагружения зарождается вторая трещина (рис. 2е). Проанализируем макроскопический отклик

структуры в рассматриваемых типах нагружения (рис. 3). Осредненный уровень напряжений в композите в случае учета ОН оказывается выше, чем в случае без учета ОН, и наблюдается на небольшом участке двух графиков (пунктирный круг на рис. 3). Это связано с более ранним возникновением трещины в случае 2). При дальнейшем нагружении макроскопическая прочность композита в случае 2) оказывается выше (270 МПа в точке е против 257 МПа в точке в соответственно).

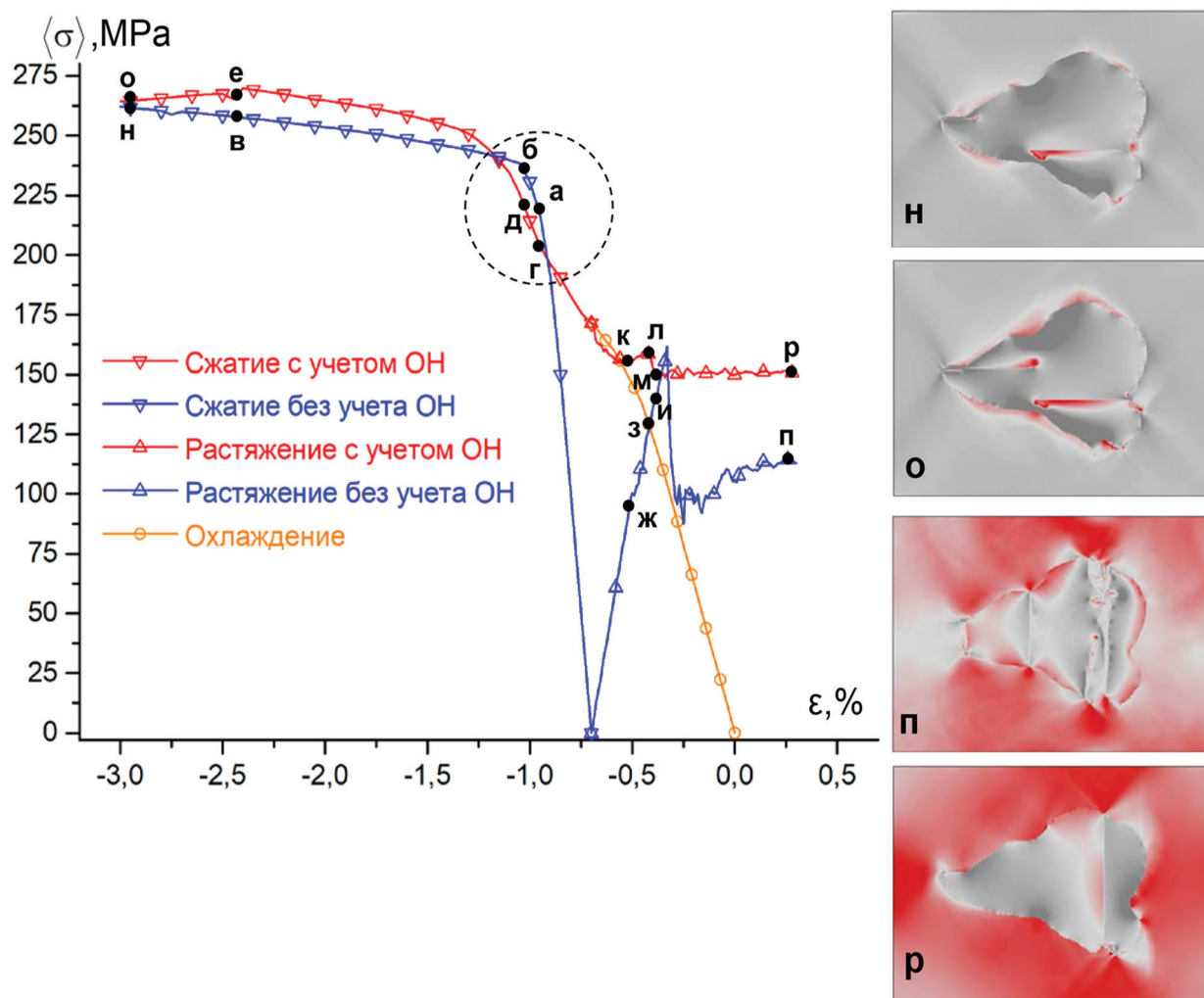


Рис. 3. Кривые деформирования композитов при различных термомеханических нагрузках и характер разрушения частицы в конце нагружения н–р

Рассмотрим результаты для 3) и 4) типов задач. При внешней растягивающей нагрузке область растягивающих напряжений возникает вблизи неоднородности типа А (рис. 2ж, к). В случае 3) на ранней стадии растяжения возникает небольшая трещина в области высокой концентрации напряжений, в которой достигается предел прочности на растяжение карбида бора $C_{\text{тен}} = 500$ МПа. При учете ОН (случай 4) трещина зарождается на этапе охлаждения структуры и изначально распространяется по границе раздела «матрица — частица». Появление небольшой трещины в случае 3) не вызывает резких падений напряжений на графике (точки ж, з). При дальнейшем растяжении структуры возникают средняя и большая трещины (рис. 3п), которые вызывают резкое падение напряжений и существенно снижают макроскопическую прочность композита. В случае 4) такого резкого снижения прочности не происходит, так как единственная трещина распространяется с невысокой скоростью (точки к–м на графике). Картины

разрушений частицы в конце 4 типов нагружения представлены на рисунке 3 и соответствуют состояниям н–р на кривых деформирования.

Заключение

Проведено численное исследование влияния остаточных термических напряжений на разрушение частицы карбида бора при растяжении и сжатии. Выявлены следующие закономерности.

Зарождение трещин происходит вблизи структурной неоднородности типа С при сжимающей нагрузке и типа А при растягивающей нагрузке во всех рассмотренных типах задач. Трещины возникают раньше в случае учета остаточных напряжений и зарождаются на этапе охлаждения структуры. Трещины распространяются медленнее в случае нагружения с предварительным охлаждением структуры по сравнению с нагружением из начального недеформированного состояния.

Остаточные напряжения снижают макроскопическую прочность композита на ранней стадии сжатия. На более поздней стадии деформирования остаточные напряжения повышают прочность композита на 5 %.

Остаточные напряжения предотвращают множественное растрескивание частицы и потерю макроскопической прочности композита при внешней растягивающей нагрузке.

Библиографический список

1. Ravi Chandran K.S., Panda K.B., and Sahay S.S. TiBw-Reinforced Ti Composites: Processing, properties, application prospects, and research needs // JOM. 2004. Vol. 56. № 5. DOI: 10.1007/s11837-004-0127-1.
2. Garg P., Jamwal A., Kumar D., et al. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. № 5. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028.
3. Bobzin K., Kalscheuer C., Carlet M., and Tayyab M. Influence of Aluminum Content on the Impact Fatigue of HPPMS CrAlN Coatings on Tool Steel // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. № 5. DOI: 10.1134/S1029959921050143.
4. Panin V.E., Egorushkin V.E. Basic Physical Mesomechanics of Plastic Deformation and Fracture of Solids as Hierarchically Organized Nonlinear Systems // Physical Mesomechanics. 2015. Vol. 18. № 4. DOI: 10.1134/S1029959915040104.
5. Romanova V.A., Balokhonov R.R., Shakhidzhanov V.S., Vlasov I.V., Moskvichev E.N., and Nekhorosheva O. Evolution of Mesoscopic Deformation-Induced Surface Roughness and Local Strains in Tensile Polycrystalline Aluminum // Physical Mesomechanics. 2021. Vol. 24. № 5. DOI: 10.1134/S1029959921050088.
6. Makarov P.V. Microdynamic theory of plasticity and failure of structurally inhomogeneous media // Russian Physics Journal. 1992. Vol. 35.
7. Ma S., Zhang X., Chen T., Wang X. Microstructure-based numerical simulation of the mechanical properties and fracture of a Ti-Al₃Ti core-shell structured particulate reinforced A356 composite // Materials & Design. 2020. Vol. 191. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108685.
8. Ayyar A., Chawla N. Microstructure-based modeling of crack growth in particle reinforced composites // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66. № 13. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.01.007.
9. Cao D., Duan Q., Li Sh., Zhong Y., Hu H. Effects of thermal residual stresses and thermal-induced geometrically necessary dislocations on size-dependent strengthening of particle-reinforced MMCs // Composite Structures. 2018. Vol. 200, P. 290-297. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.129.
10. Schmauder S., Weber U. & Soppa E. Computational Mechanics of Heterogeneous Materials: Influence of Residual Stresses // Computational Materials Science. 2003. Vol. 26. DOI: 10.1016/S0927-0256(02)00414-7.
11. Balokhonov R.R., Romanova V.A., Schmauder S., Emelianova E.S. A numerical study of plastic strain localization and fracture across multiple spatial scales in materials with metal-matrix composite coatings // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. Vol. 101. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.03.0132019.
12. Balokhonov R.R., Romanova V.A., Schwab E., Zemlianov A.V., Evtushenko E.P. Computational microstructure-based analysis of residual stress evolution in metal-matrix composite materials during thermomechanical loading // Facta Univ. Ser. Mech. Eng. 2021. Vol. 19. № 2.