

## Влияние объемной доли керамических частиц на локализацию пластической деформации и разрушение металлокерамических композитов. Численный анализ\*

А.В. Землянов<sup>1,2</sup>, Д.Д. Гатиятуллина<sup>1,2</sup>, Р.Р. Балохонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

## The Influence of the Volume Fraction of Ceramic Particles on the Plastic Strain Localization and Fracture of Metal Matrix Composites. Computational Analysis

A.V. Zemlianov<sup>1,2</sup>, D.D. Gatiyatullina<sup>1,2</sup>, R.R. Balokhonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Tomsk, Russia)

Исследовано механическое поведение металлокерамического композита при действии различных термомеханических нагрузок. Неоднородная структура композитов учитывается в расчетах в явном виде. Для описания механической реакции алюминиевой матрицы использовалась изотропная упругопластическая модель, а для керамических частиц — упруго-хрупкая модель. Рассмотрен представительный объем композиционного материала, содержащий несколько частиц карбида бора, находящихся в микрообъеме алюминиевого сплава 6061Т6. Созданы две структуры с различным содержанием керамических частиц. Установлено, что прочность структуры с меньшей объемной долей частиц выше, чем прочность структуры с большей объемной долей. Решаются два типа задач: 1) растяжение с учетом остаточных напряжений и 2) растяжение без учета остаточных напряжений. Для учета остаточных напряжений в расчетах используются соотношения Дюамеля-Неймана. Исследовано влияние остаточных напряжений на разрушение частиц в мезообъемах. Динамические краевые задачи решаются 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)4-03

### Введение

Металлокерамические композиты и покрытия, обладающие высокими удельной прочностью, износостойкостью и долговечностью, широко использу-

In this paper, the mechanical behavior of the metal matrix composite under the action of different thermomechanical loading is investigated. The inhomogeneous structure of composites is explicitly considered 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. A representative volume of the composite material containing several boron carbide particles located in the microvolume of aluminum alloy 6061T6 is considered. Two structures are created with different volume fractions of ceramic particles. It is found that the strength of the structure with lower volume fraction of particles is higher than the strength of the structure with larger volume fraction. Two types of problems are solved: 1) tension with considering residual stresses, and 2) tension without considering residual stresses. The Duhamel-Neumann relations are used to take into account residual stresses in the calculations. The influence of residual stresses on the fracture of particles in mesovolumes is investigated. Dynamic boundary value problems are solved by the finite element method in the ABAQUS / Explicit software package.

**Key words:** numerical simulation, metal matrix composites, mechanics of non-homogeneous materials, residual thermal stresses, fracture.

ются в различных отраслях промышленности [1–3]. Алюминиевые сплавы — самый распространенный материал, применяемый в качестве матрицы для композитов [4]. Наиболее используемыми керамически-

\*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 18-19-00273, <https://rscf.ru/project/18-19-00273/>).

ми материалами для упрочнения композитных покрытий на металлической основе являются карбиды бора ( $B_4C$ ), кремния ( $SiC$ ), оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) [5]. Существуют различные методы получения композитов: твердофазное спекание [6], холодное газодинамическое напыление [7], литье с перемешиванием [8], литье под давлением [9], лазерная наплавка [10–12]. Лазерная наплавка позволяет контролировать физико-механические свойства покрытия за счет подбора таких параметров, как мощность и скорость движения лазерного луча. В процессе лазерной наплавки покрытия расплавленный слой быстро отвердевает, и вследствие различия термомеханических свойств материалов матрицы и частиц возникают остаточные термические напряжения [13–15]. Вопросы, связанные с оценкой остаточных напряжений и их влияни-

ем на механическое поведение композитов, являются спорными и требуют дополнительных исследований [16–18].

Результаты численного моделирования процессов локализации пластической деформации и эволюции остаточных напряжений при охлаждении композитов с различной объемной долей частиц карбида бора представлены в работе [19]. Цель настоящей работы — исследовать влияние остаточных термических напряжений на разрушение композитов с различной объемной долей частиц карбида бора.

#### Постановка задачи

На рисунке 1а представлена микрофотография композиционного покрытия, изготовленного методом лазерной наплавки.

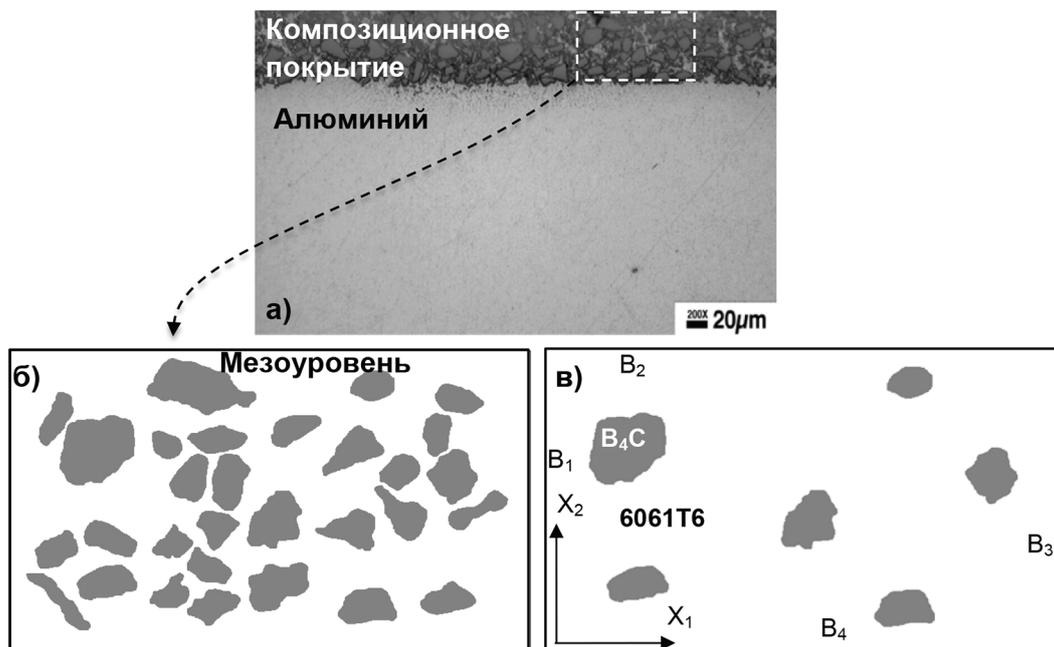


Рис. 1. Экспериментальная (а) и модельные структуры композита (б-в)

Для учета нерегулярной формы частиц в численных расчетах экспериментальное изображение было упрощено, и был выбран представительный объем композиционного покрытия (рис. 1б). Для исследования влияния объемной доли керамических частиц на локализацию деформации и разрушение в композитах была создана дополнительная структура (рис. 1в), которая получена из базовой путем удаления частиц. Объемная доля частиц в базовой структуре составляет 27 %, в дополнительной — 8 %. На мезоскопическом масштабном уровне, когда рассматривается представительный мезообъем материала композитного покрытия, существенную роль играет взаимное расположение частиц — объемная доля карбида бора в покрытии. Каждая частица вносит свой вклад в общее напряженно-деформированное состояние в мезо-

объеме композита. Ранее было показано, что на уровне дисперсно-упрочненного металлокерамического композиционного материала происходит разрушение нескольких частиц, а процессы локализации деформации в алюминиевой матрице и разрушения керамических частиц происходят взаимосвязанно и согласованно [20]. Общая система уравнений механики сплошной среды, включающая законы сохранения массы, количества движения, энергии, соотношения для деформаций, решается в двумерной постановке методом конечных элементов.

Для алюминиевой матрицы и частиц карбида бора используются изотропные упруго-пластическая и упруго-хрупкая модели соответственно. Для описания кривой пластического течения алюминия используется ассоциированный закон течения с функ-

цией 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. Моделирование остаточных напряжений (ОН) предполагает введение шага с охлаждением структуры от температуры, близ-

кой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной температуры. 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.

Механические свойства Al6061T6 и B<sub>4</sub>C

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	K, ГПа	$\mu$ , ГПа	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\epsilon_r^p$ , %	$C_{ten}$ , МПа	$C_{com}$ , ГПа	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Al6061T6	2.7	66	26	332	234	9.5	-	-	22
B <sub>4</sub> C	2.6	235	197	-	-	-	500	5	4.5

Во время охлаждения границы V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> и V<sub>4</sub> свободны от закреплений и нагрузок. При одноосном нагружении — сжатии или растяжении — кинематические граничные условия прикладываются к границам V<sub>1</sub> и V<sub>3</sub>, в то время как V<sub>2</sub> и V<sub>4</sub> являются свободными. При проведении расчета с учетом остаточных напряжений (ОН) на первом шаге расчета структура охлаждается, на следующем — к ней прикладывается нагрузка.

Проведены расчеты для двух типов задач термомеханического нагружения для каждой из двух модельных структур с объемными долями частиц 8 % и 27 %:

- 1) растяжение из начального недеформированного состояния (растяжение без учета ОН),
- 2) охлаждение структуры с последующим растяжением (растяжение с учетом ОН).

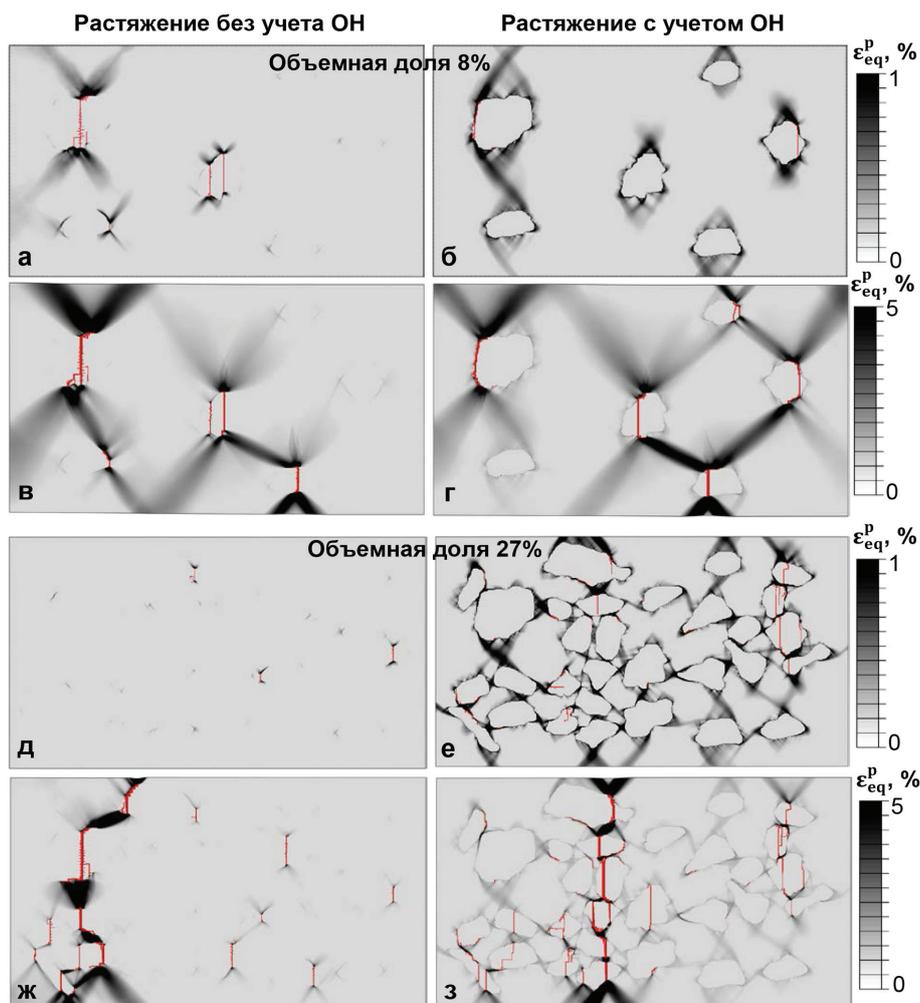


Рис. 2. Картины распределения интенсивности пластических деформаций. Красным цветом обозначены области разрушения в частицах

**Результаты численного моделирования**

На рисунке 2 представлены результаты 8 расчетов для различной объемной доли керамических частиц как с учетом, так и без учета ОН. В результате охлаждения структур за счет разницы в коэффициентах теплового расширения между алюминием и карбидом бора вокруг частиц локализуется пластическая деформация (рис. 2б, е).

На рисунке 3 изображены осредненные кривые течения для соответствующих типов решаемых задач

для структур с объемными долями частиц 8 % (меньшая объемная доля) и 27 % (большая объемная доля). Напряжения на кривых  $\langle \sigma \rangle$  было вычислено как усредненное по расчетной области значение интенсивности напряжений, а деформация  $\epsilon$  — относительное удлинение структуры в направлении прикладываемой нагрузки. Для удобства сравнения кривые деформирования при растяжении композита из начального недеформированного состояния смещены на величину остаточной деформации после охлаждения  $\epsilon = -0.7$ .

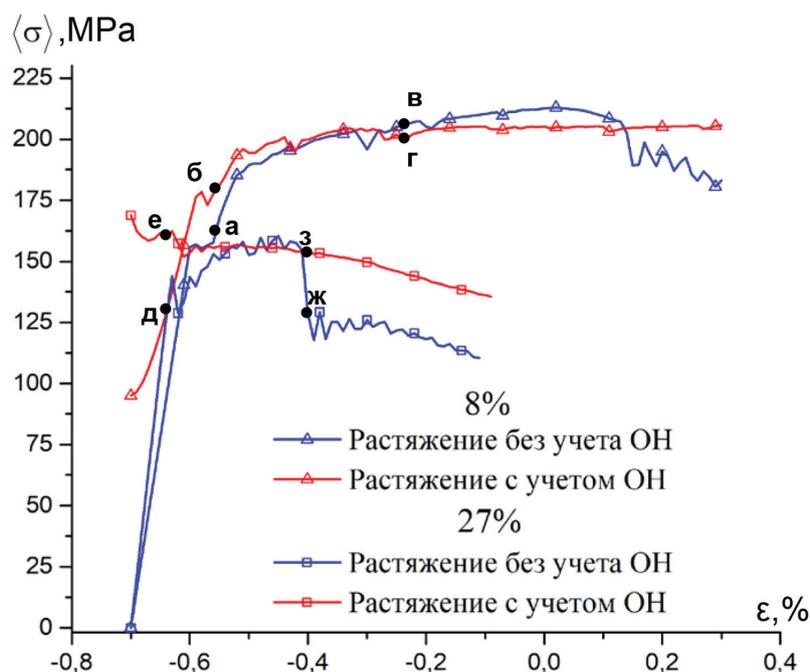


Рис. 3. Кривые деформирования с различной объемной долей частиц (8 % и 27 %) при растяжении композита

Благодаря накоплению пластической деформации в процессе охлаждения макроскопическая прочность композитов на начальной стадии нагружения выше в случае 1) типа задачи (рис. 3 точки а, б и д, е). Для меньшей объемной доли трещины преимущественно распространяются по границе раздела «матрица — частица» (рис. 2г). Макроскопическая прочность при небольших деформациях растяжения выше в случае учета ОН, затем в случае без учета ОН.

Процессы локализации пластической деформации в матрице и разрушения частиц для большей объемной доли протекают более интенсивно. Частицы разрушаются одновременно, что связано с более высокой концентрацией напряжений, обусловленной взаимодействием частиц друг на друга. Для 1) типа задачи на кривой деформирования наблюдается резкое падение напряжений в точке з, связанное с развитием трещины в левой части объема, которая проходит через все частицы, расположенные друг над другом (рис. 2ж). В случае 2) типа задачи, несмотря на развитие похожей трещины, оставшаяся

часть объема не теряет прочность, и кривая плавно снижается (рис. 2з).

**Заключение**

Проведено численное исследование влияния остаточных термических напряжений на разрушение представительных объемов композитов с различной объемной долей частиц карбида бора. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

При высокой объемной доле частиц карбида бора (27 %) разрушаются одновременно несколько частиц, тогда как при низкой объемной доле (8 %) частицы разрушаются последовательно одна за другой. Макроскопическая прочность структуры в случае 8 % значительно выше, чем прочность структуры в случае 27 %.

Остаточные напряжения в случае низкой объемной доли повышают прочность композита на ранней стадии нагружения. На более поздней стадии остаточные напряжения понижают прочность.

В случае высокой объемной доли остаточные напряжения играют положительную роль, поскольку

повышают прочность структуры как на ранней стадии нагружения, так и на более поздней стадии.

### Библиографический список

1. Ravi Chandran K.S., Panda K.B., 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. Singh H., Brar G. S., Kumar H., Aggarwal V. A review on metal matrix composite for automobile applications // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 43. Part 1. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.670.
4. Ramanathan A., Pradeep K. K., and Rajaraman M. A review on the production of metal matrix composites through stir casting — Furnace design, properties, challenges, and research opportunities // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
5. Auradi V., Rajesh G.L., and Kori S.A. Processing of B4C Particulate Reinforced 6061Aluminum Matrix Composites by Melt Stirring Involving Two-step Addition // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.177.
6. Tang F., Anderson I.E., Biner S.B. Solid state sintering and consolidation of Al powders and Al matrix composites // *Journal of Light Metals*. 2002. Vol. 2. Iss. 4. DOI: 10.1016/S1471-5317(03)00004-X.
7. Fomin V.M., Golyshev A.A., Kosarev V.F., Malikov A.G., Orishich A.M., Filippov A.A. Deposition of Cermet Coatings on the Basis of Ti, Ni, WC, and B4C by Cold Gas Dynamic Spraying with Subsequent Laser Irradiation // *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23. DOI: 10.1134/S1029959920040025.
8. Dinesh Kumar S., Ravichandran M., Jeevika A., Stalin B., Kailasanathan C., Karthick A. Effect of ZrB2 on microstructural, mechanical and corrosion behaviour of aluminium (AA7178) alloy matrix composite prepared by the stir casting route // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 9. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.158.
9. Zhu J., Jiang W., Li G., Guan F., Yu Y., Fan Z. Microstructure and mechanical properties of SiCnp/Al6082 aluminum matrix composites prepared by squeeze casting combined with stir casting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 283. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2020.116699.
10. Muvvala G., Karmakar D.P., Nath A.K. Online assessment of TiC decomposition in laser cladding of metal matrix composite coating // *Materials and Design*. 2017. Vol. 121. № 5. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.061.
11. Choudhary A., Sadhu A., Sarkar S., Nath A.K., Muvvala G. Laser surface polishing of NiCrSiBC — 60WC ceramic-metal matrix composite deposited by laser directed energy deposition process // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 404. № 25. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126480.
12. Kadolkar P.B., Watkins T.R., De Hosson J.Th.M., Kooi B.J., Dahotre N.B. State of residual stress in laser-deposited ceramic composite coatings on aluminum alloys // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. Iss. 4. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.07.049.
13. Pachaury Y., Shin Y. C. Assessment of sub-surface damage during machining of additively manufactured Fe-TiC metal matrix composites // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 266. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.001.
14. Venkatesan K., Ramanujam R., and Kuppan P. Parametric modeling and optimization of laser scanning parameters during laser assisted machining of Inconel 718 // *Optics & Laser Technology*. 2016. Vol. 78. Part B. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.09.021.
15. Zhiron Liao, Ali Abdelhafeez, Haonan Li, Yue Yang, Oriol Gavalda Diaz, Dragos Axinte. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 143. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2019.05.006.
16. Dongfeng Cao, Qingfeng Duan, Shuxin Li, Yucheng Zhong, Haixiao Hu. Effects of thermal residual stresses and thermal-induced geometrically necessary dislocations on size-dependent strengthening of particle-reinforced MMCs // *Composite Structures*. 2018. Vol. 200. № 15. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.129.
17. Bouafia F., Serier B., and Bachir Bouiadjra B. A. Finite element analysis of the thermal residual stresses of SiC particle reinforced aluminum composite // *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 54. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.10.030.
18. Muvvala G., Karmakar D.P., Nath A.K. Monitoring and assessment of tungsten carbide wettability in laser clad metal matrix composite coating using an IR pyrometer // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 714 № 15. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.04.254.
19. Balokhonov R.R., Kulkov A.S., Zemlyanov A.V., et al. Evolution of Residual Stresses and Fracture in Thermomechanically Loaded Particle-Reinforced Metal Matrix Composites // *Physical Mesomechanics*. 2021. Vol. 24. DOI: 10.1134/S1029959921050015.
20. Balokhonov R.R., Evtushenko E.P., Romanova V.A., et al. Formation of Bulk Tensile Regions in Metal Matrix Composites and Coatings under Uniaxial and Multiaxial Compression // *Physical Mesomechanics*. 2020. Vol. 23.