



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.08

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А.В. Землянов^{1,2}, Е.П. Евтушенко¹, Р.Р. Балохонов¹

¹Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 ноября 2020 г.
Принята: 25 ноября 2020 г.
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

Ключевые слова:

механика структурно-неоднородных сред, физическая мезомеханика, многоуровневое численное моделирование, металлокерамические композиты, остаточные напряжения, локализация пластической деформации, разрушение.

АННОТАЦИЯ

Исследовано термомеханическое поведение металлокерамических композиционных материалов. В качестве матрицы используется высокопрочный алюминиевый сплав 6061-T6, а в качестве упрочняющих частиц – карбид бора B₄C. Структура металлокерамических композитов учитывает сложную форму частиц в явном виде. Для моделирования механической реакции алюминиевой матрицы использовалась изотропная упругопластическая модель, а керамических частиц – упруго-хрупкая модель. Чтобы исследовать процессы зарождения и распространения трещин в керамических частицах, выбран критерий разрушения типа Губера, учитывающий локальное напряженное состояние керамического материала: объемное растяжение либо сжатие. Рассмотрен композиционный материал с единичным включением как реально наблюдаемой в эксперименте, так и идеальной (круглой) формы. Численно исследовано влияние остаточных термических напряжений, возникающих при охлаждении композиционного материала от температуры, близкой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной температуры, на характер локализации пластической деформации в алюминиевой матрице и разрушения карбидных частиц, а также на макроскопическую прочность композита при внешней нагрузке: растяжении и сжатии. Двумерные динамические краевые задачи в плоско-напряженной и плоско-деформированной постановках решались численно методом конечных элементов с помощью модуля Explicit программного комплекса Abaqus. Для задания определяющих соотношений материалов были разработаны процедуры подпрограмм VUMAT, которые подключаются к программному комплексу Abaqus. На основе полученных результатов численного моделирования были сделаны выводы о том, что остаточные термические напряжения, возникающие после охлаждения, приводят к смене механизма растрескивания частиц от раскалывания к разрушению вдоль границы раздела «матрица – включение» и повышают прочность композита при его последующем растяжении.

© ПНИПУ

© Землянов Александр Викторович – студент, e-mail: zem.aleks99@ispms.tsc.ru, [iD: 0000-0001-9763-5712](https://orcid.org/0000-0001-9763-5712).

Евтушенко Евгений Павлович – гл. спец., e-mail: eugene@ispms.ru, [iD: 0000-0002-1475-2321](https://orcid.org/0000-0002-1475-2321).

Балохонов Руслан Ревович – д.ф.-м.н., зав. лаб., e-mail: rusy@ispms.ru, [iD: 0000-0001-9994-5685](https://orcid.org/0000-0001-9994-5685).

Aleksandr V. Zemlianov – Student, e-mail: zem.aleks99@ispms.tsc.ru, [iD: 0000-0001-9763-5712](https://orcid.org/0000-0001-9763-5712).

Evgenii P. Evtushenko – Chief Specialist, e-mail: eugene@ispms.ru, [iD: 0000-0002-1475-2321](https://orcid.org/0000-0002-1475-2321).

Ruslan R. Balokhonov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory,

e-mail: rusy@ispms.ru, [iD: 0000-0001-9994-5685](https://orcid.org/0000-0001-9994-5685).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATION AND FRACTURE OF METAL-MATRIX COMPOSITES WITH CONSIDERING RESIDUAL STRESSES

A.V. Zemlianov^{1,2}, E.P. Evtushenko¹, R.R. Balokhonov¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 November 2020
Accepted: 25 November 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

mechanics of non-homogeneous materials, physical mesomechanics, multiscale numerical simulation, metal-matrix composites, residual stresses, plastic strain localization, fracture.

ABSTRACT

Thermomechanical behavior of metal-matrix composite materials is investigated. Boron carbide B_4C and high-strength aluminum alloy 6061-T6 are used as strengthening particle and matrix materials, respectively. Microstructure of the metal-matrix composite takes into account the complex shape of particles explicitly. Isotropic elastoplastic and elastic-brittle models were used to simulate the mechanical response of the aluminum matrix and ceramic particles, respectively. To investigate the crack initiation and propagation in ceramic particles, a Huber type fracture criterion was chosen that takes into account the type of the local stress state in ceramic materials: bulk tension or compression. The composite material with a single particle of both the really observed in the experiment and ideally round shapes is considered. The influence of the residual thermal stresses arising during cooling of the composite material from the temperature of aluminum recrystallization to the room temperature on the character of plastic strain localization in the aluminum matrix and fracture of carbide particles and on the macroscopic strength of the composite under external tension or compression is studied numerically. Two-dimensional dynamic boundary value problems in the plane-stress and plane-strain formulations were solved numerically by the finite element method using the Explicit module of the Abaqus software package. VUMAT subroutine procedures incorporating the constitutive models were developed and integrated into the Abaqus solver. Based on the results of the numerical simulation, it was concluded that the residual thermal stresses arising during cooling lead to the change in the mechanism of the particle fracture from in-particle cracking to debonding and increase the strength of the composite subjected to tension after the cooling.

© PNRPU

В настоящее время композиционные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности: авиакосмической, строительной, энергетической, машиностроительной [1–7]. Композиты с металлической матрицей используются в промышленности из-за их высокой удельной прочности, долговечности, износостойкости и микротвердости. В качестве матрицы используются сплавы металлов, а в качестве упрочняющих частиц – карбиды, оксиды. Композиционные покрытия на основе алюминиевой матрицы в настоящее время находят широкое применение в технике [8]. Алюминий, карбиды бора и кремния, а также оксид алюминия – наиболее часто используемые материалы для изготовления композитов, которые широко используются в аэрокосмической промышленности для защиты космических аппаратов от орбитального мусора [9].

Существуют разные способы получения композиционных материалов: твердофазные способы при спекании в условиях горячего прессования, метод холодного газодинамического напыления [10]. Одним из перспективных методов получения металлокерамических композиционных покрытий (рис. 1) является метод лазерного напыления [11, 12]. Во время технологического процесса как металл, так и упрочняющие частицы нагреваются, а затем охлаждаются. Из-за различия между коэффициентами теплового расширения матрицы и керамических частиц в результате нанесения композици-

онного слоя на материал возникают остаточные напряжения, которые могут оказать негативное влияние на прочность покрытия. Проблемы, связанные с оценкой остаточных напряжений, возникающих в металлокерамических композитах, и их влиянием на прочность материала, до сих пор остаются дискуссионными.

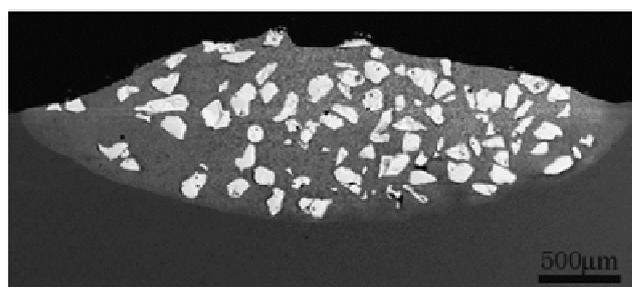


Рис. 1. Фотография металлокерамического композиционного покрытия, упрочненного частицами карбида вольфрама

Fig. 1. A picture of the metal-matrix composite coating with the tungsten carbide reinforcing particles

Существуют как экспериментальные, так и численные методы исследования композиционных материалов [13–20]. Проведение эксперимента не позволяет отделить составляющие напряженно-деформированного состояния друг от друга, а также является трудоемким и затратным процессом. Возможности современного

вычислительного оборудования позволяют проводить научно-исследовательские расчеты в области механики с высокой точностью описания геометрии и микроструктуры исследуемых материалов [21–24]. Из-за сложной иерархически организованной структуры композиционных материалов их деформационное поведение не всегда возможно предсказать в рамках традиционных одноуровневых подходов. Структурная неоднородность обусловлена наличием криволинейных границ раздела между матрицей и частицами, а также разницей механических и термических свойств (упругие модули, характеристики пластичности и прочности, коэффициент теплового расширения).

Теоретические исследования деформирования композиционных материалов направлены в основном на разработку численно-аналитических моделей для случаев однородных однослойных и многослойных покрытий различной толщины с ровными прямолинейными границами раздела, например [25, 26]. При явном учете структуры моделируются двухфазные и трехфазные композиты с включениями идеальной округлой [27, 28], прямоугольной [28] и гексагональной формы [29]. Учет сложной нерегулярной и экспериментально наблюдаемой формы [16, 19, 30] упрочняющих частиц при проведении численных расчетов важен для достоверного описания механического поведения исследуемых материалов.

1. Физическая и математическая модели материалов

Металлокерамический композит моделируется как матрица с керамическими частицами идеально круглой и реально наблюдаемой в эксперименте нерегулярной формами. Двухфазная структура учитывается в расчетах явно в качестве начальных данных краевой динамической задачи, которая решается численно методом конечных элементов с помощью пакета Abaqus. Используются изотропные упругопластическая и упруго-хрупкая модели для алюминиевой матрицы и керамических частиц соответственно. Проводятся расчеты, как без учета, так и с учетом разрушения керамической частицы. Моделирование остаточных напряжений заключается в этапе охлаждения структуры от температуры, близкой к температуре рекристаллизации алюминия, до комнатной температуры.

Процессы охлаждения, сжатия и растяжения моделировались в постановках плоского напряженного и деформированного состояний с помощью модуля Explicit программного комплекса Abaqus.

В общем трехмерном случае система уравнений в динамической постановке состоит из 16 уравнений: 3 уравнения движения, 6 соотношений для скоростей деформации, 6 определяющих соотношений и уравнение неразрывности (1).

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u}_i &= \sigma_{ij,j}, \\ \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}), \\ \dot{\sigma}_{ij} &= K(\dot{\epsilon}_{kk} + \alpha \Delta T) \delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p), \\ \frac{\dot{V}}{V} - \dot{u}_{i,i} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ – текущая плотность материала; u_i – компоненты вектора перемещений; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ϵ_{ij} – компоненты тензора деформаций; ϵ_{ij}^p – компоненты тензора пластических деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера; K – модуль объемного сжатия; α – коэффициент теплового расширения; ΔT – разность температуры рекристаллизации алюминия и комнатной температуры, $V = \frac{\rho}{\rho_0}$; ρ_0 – начальная плотность материала, точка означает материальную производную, по повторяющимся индексам подразумевается суммирование.

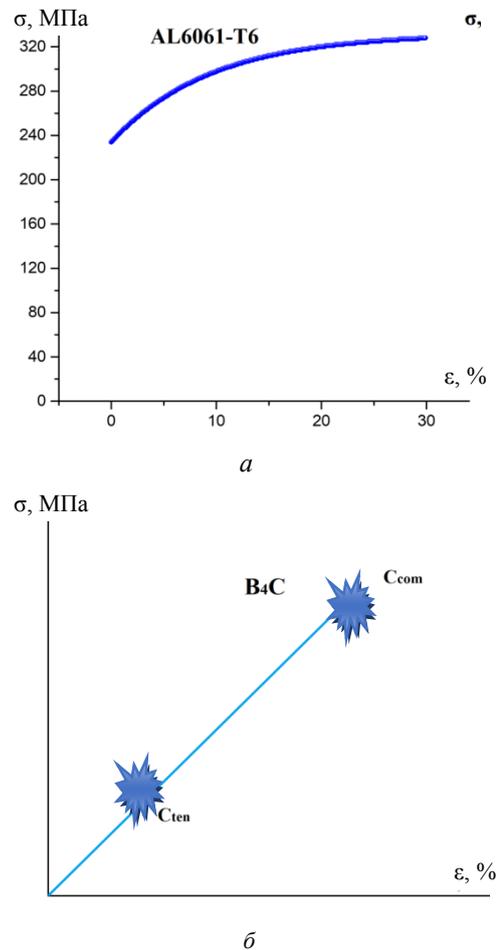


Рис. 2. Экспериментальная кривая деформирования алюминия 6061-T6 (а) и кривая, показывающая упруго-хрупкое поведение керамического материала карбида бора (б)

Fig. 2. Experimental flow curve of the aluminum 6061-T6 (a) and the curve showing the elastic-brittle behaviour of the boron carbide ceramic material (b)

Для описания тензора пластической деформации в алюминиевой матрице используется ассоциированный закон течения с функцией изотропного упрочнения (2), соответствующей экспериментальной кривой течения (рис. 2, а),

$$f(\epsilon_{eq}^p) = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_{0,2}) \cdot \exp\left(-\frac{\epsilon_{eq}^p}{\epsilon_r^p}\right). \quad (2)$$

Здесь ϵ_{eq}^p – накопленная пластическая деформация,

$$\epsilon_{eq}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \int_0^t \sqrt{(\epsilon_{11}^p - \epsilon_{22}^p)^2 + (\epsilon_{22}^p - \epsilon_{33}^p)^2 + (\epsilon_{33}^p - \epsilon_{11}^p)^2 + 6(\epsilon_{12}^p + \epsilon_{23}^p + \epsilon_{31}^p)^2} dt;$$

σ_s – предел прочности матрицы; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести матрицы; ϵ_r^p – константа деформационного упрочнения.

Модель разрушения керамической частицы использует критерий типа Губера. Принцип его действия состоит в следующем: проверяется тип напряженно-деформированного состояния в локальной области материала, если эта область является областью объемного растяжения и интенсивность напряжений в ней превышает $C_{тен}$ – предел прочности при растяжении, то тензор напряжений в этой области становится равным нулю. Если область является областью объемного сжатия и интенсивность напряжений в ней превышает $C_{ком}$, то в ноль обращается только девиаторная часть тензора напряжений: материал сохраняет способность сопротивляться объемному сжатию.

Таким образом, критерий разрушения можно записать в виде

$$\sigma_{eq} = \begin{cases} C_{тен}, & \text{если } p < 0, \\ C_{ком}, & \text{если } p > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(S_{11} - S_{22})^2 + (S_{22} - S_{33})^2 + (S_{33} - S_{11})^2 + 6(S_{11} + S_{22} + S_{33})^2},$$

p – давление.

Предел прочности на сжатие больше предела прочности на растяжение в 10 раз, и, как показали дальнейшие расчеты, материал частицы разрушается только в областях локального растяжения. Значения сжимающих напряжений не достигают величины предела прочности на сжатие (5000 МПа).

Механические свойства материалов

Mechanical properties of materials

Материал	ρ , г/см ³	ν	E , ГПа	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	α , 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	$C_{тен}$, ГПа	$C_{ком}$, ГПа	ϵ_r^p , %
Al6061-T6	2,7	0,32	70	332	234	22	–	–	9,5
B ₄ C	2,6	0,18	440	–	–	4,5	0,5	5	–

В таблице представлены механические свойства для материалов матрицы и частиц, взятые из эксперимента.

2. Методика численного эксперимента

Для оценки концентраций напряжений и локализации деформаций, возникающих в локальных областях материала металлокерамического композита и связан-

ных с разницей упругих, пластических свойств и температурных коэффициентов расширения матрицы и частиц нерегулярной формы, создана геометрическая модель малой области с единичной частицей.

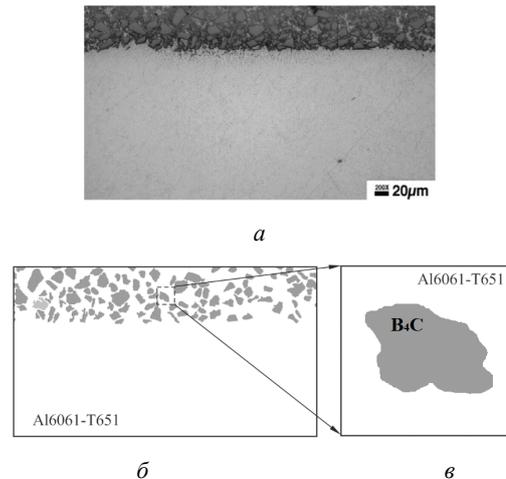


Рис. 3. Экспериментальная (а), модельная структура алюминия с покрытием (б) и локальный объем композиционного покрытия, содержащего единичную частицу карбида бора (в)

Fig. 3. Experimental (a), model structure of the coated aluminum (b) and local volume of the composite coating containing the single boron carbide particle (c)

На рис. 3 изображена прямоугольная расчетная область, взятая из участка экспериментальной микрофотографии металлокерамического композиционного покрытия, содержащая одну из частиц карбида бора, окруженную алюминиевой матрицей. Такая структура материала образуется в результате охлаждения расплавленного алюминия с добавленными в расплавленный слой упрочняющими частицами карбида бора. Это микромасштабный уровень – уровень отдельной частицы, на котором можно варьировать размер частиц, сложную нерегулярную геометрию границы раздела матрица – частица, термомеханические свойства материалов матрицы и частиц.

Численный эксперимент состоит в том, чтобы смоделировать два разных воздействия на композиционный материал: одноосное нагружение, которое не учитывает наличие термических остаточных напряжений и нагружение с этапом предварительного охлаждения. Остаточные термические напряжения возникают в результате охлаждения структуры от температуры 350 °C до комнатной температуры 23 °C. Решается стационарная задача. Температура одинакова по всей расчетной области и уменьшается линейно.

Таким образом, численно исследовано напряженно-деформированное состояние металлокерамического композита при следующих внешних нагрузках: 1) охлаждение, 2) сжатие из начального ненагруженного состояния, 3) растяжение из начального ненагруженного состояния, 4) охлаждение с последующим растяжением, 5) охлаждение с последующим сжатием.

Растяжение либо сжатие моделирует граничные условия на левой и правой сторонах, верхняя сторона свободна от нагрузок, нижняя сторона – ось симметрии (рис. 4).

При охлаждении левая, правая и верхняя стороны свободны от нагрузок. Размеры расчетной области составляют 200×140 мкм, сетка содержит 113 тысяч конечных элементов.

При учете разрушения в керамической частице проводятся расчеты для сжатия до 6 % общей деформации, растяжения – до 0,5 %.

Численные решения были выполнены как для случая плоского напряжения, так и для случая плоской деформации. Для получения решения в плоско-напряженной и плоско-деформированной постановках использованы двумерные четырехугольные конечные элементы сплошной среды CPS4R и CPE4R из библиотеки конечных элементов Abaqus соответственно.

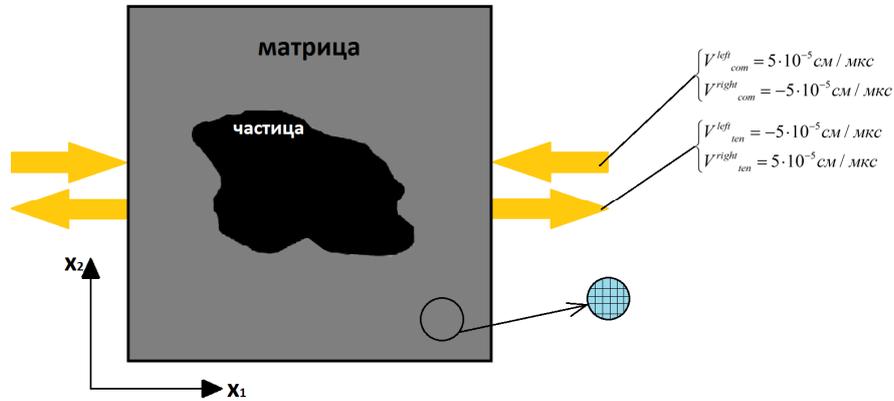


Рис. 4. Схема нагружения композита с единичным включением

Fig. 4. Loading pattern of the composite with a single inclusion

3. Результаты моделирования и выводы

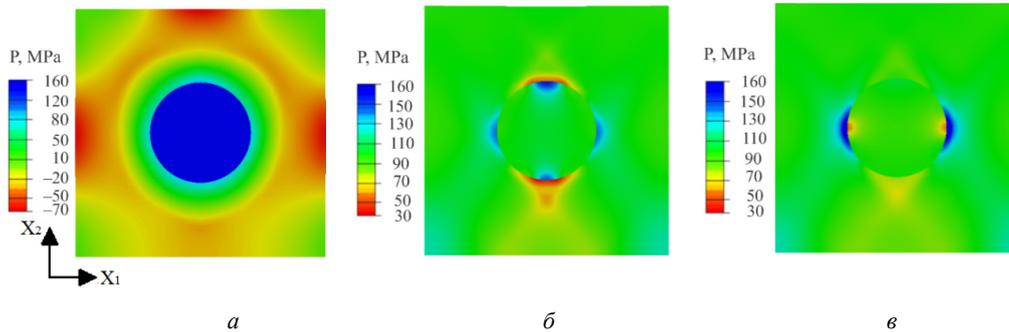


Рис. 5. Распределение давления для случая круглой частицы: охлаждение (а), сжатие (б) и сжатие после охлаждения композита (в)

Fig. 5. Pressure patterns for the case of round particle: cooling (a), compression (b) and compression after cooling of the composite (c)

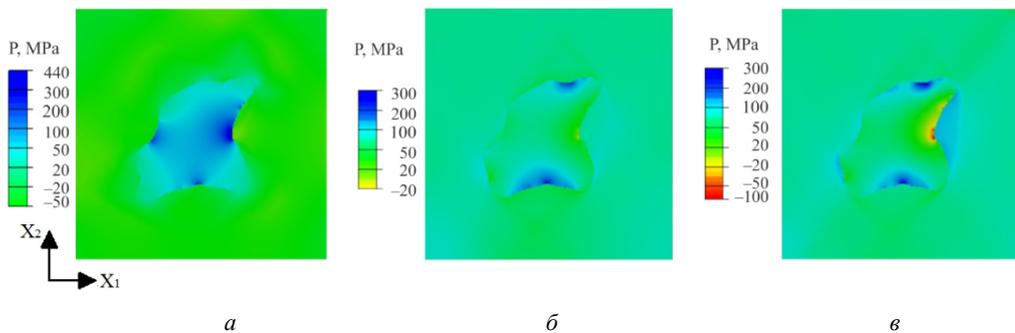


Рис. 6. Распределение давления для случая частицы нерегулярной формы: охлаждение (а), сжатие (б) и сжатие после охлаждения композита (в)

Fig. 6. Pressure patterns for the case of the irregular shape particle: cooling (a), compression (b) and compression after cooling of the composite (c)

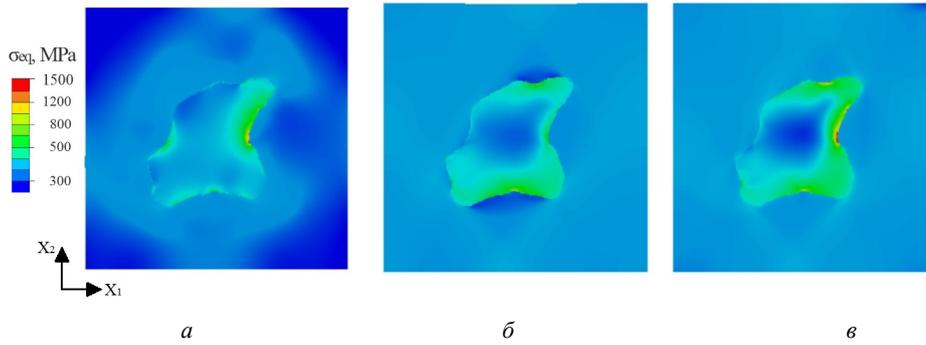


Рис. 7. Интенсивность напряжений для случая частицы нерегулярной формы: охлаждения (а), сжатия (б) и сжатия после охлаждения композита (в)

Fig. 7. Stress intensity for the case of the irregular shape particle: (a), compression (b) and compression after cooling of the composite (c)

Результаты численного моделирования без учета разрушения керамической частицы для случая плоско-напряженной постановки задачи представлены на рис. 5–7. При охлаждении композит в целом объемно сжимается. Однако области матрицы, расположенные вокруг керамической частицы на определенном от частицы расстоянии, испытывают объемные растягивающие нагрузки, а области, непосредственно прилегающие к частице, слабодеформированы (рис. 5, а). При этом частица подвергается объемному сжатию (см. рис 5, а, рис 6, а). При одноосном сжатии композита до общей деформации 1,6 % происходит сжатие как матрицы, так и частицы (рис. 5, б, рис. 6, б). Одноосное сжатие из напряженно-деформированного состояния, полученного путем предварительного охлаждения композита, моделирует механическое поведение материала с остаточными термическими напряжениями (рис. 5, в, рис. 6, в). Видно, что концентрация напряжений увеличивается в локальных областях кривизны границы раздела, как в матрице, так и в частице. Значения интенсивности напряжений при охлаждении с последующим сжатием выше, чем при сжатии без учета остаточных напряжений (рис. 7).

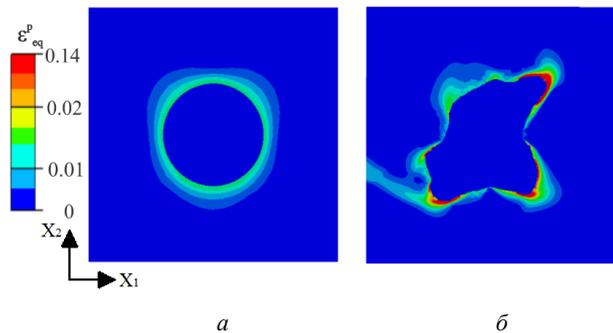


Рис. 8. Интенсивность пластических деформаций после охлаждения микроструктуры с круглой (а) и криволинейной частицами (б)

Fig. 8. Intensity of plastic strain after cooling the microstructure with round (a) and curvilinear particles (b)

На рис. 8 представлена сравнительная картина композитов с учетом и без учета реальной формы включе-

ния. Вокруг частиц происходит интенсивное пластическое течение материала матрицы. В процессе охлаждения матрица сдавливает со всех сторон жесткую керамическую частицу и пластически деформируется. В случае частицы криволинейной формы пластическая деформация локализуется вблизи границы раздела в областях вогнутостей материала наибольшей кривизны. Максимальное значение пластической деформации в случае частицы криволинейной формы в 10 раз превышает соответствующее значение в случае частицы круглой формы.

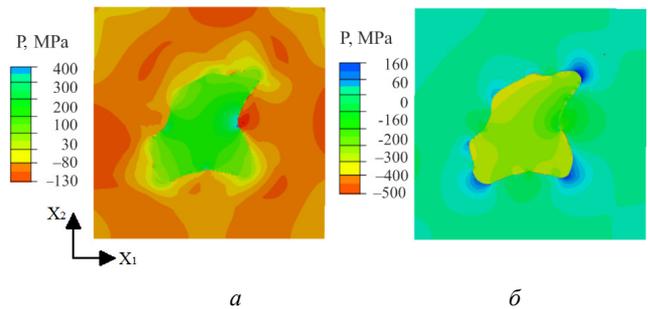


Рис. 9. Распределение давления при охлаждении композита для плоско-напряженной (а) и плоско-деформированной формулировок (б)

Fig. 9. Pressure distribution during cooling of the composite for the plane stress (a) and plane strain formulation (b)

На рис. 9 представлены результаты расчетов для решения задачи об охлаждении микрообъема композита в плоско-напряженной и плоско-деформированной постановках. В плоско-деформированном состоянии частица карбида бора находится под действием объемных растягивающих напряжений (отрицательное давление в частице). Расчеты для плоско-напряженного состояния показывают сжатие частицы (положительное давление в частице).

Результаты численного моделирования растяжения и сжатия микрообъема композита с учетом разрушения керамической частицы, без учета остаточных напряжений представлены на рис. 10.

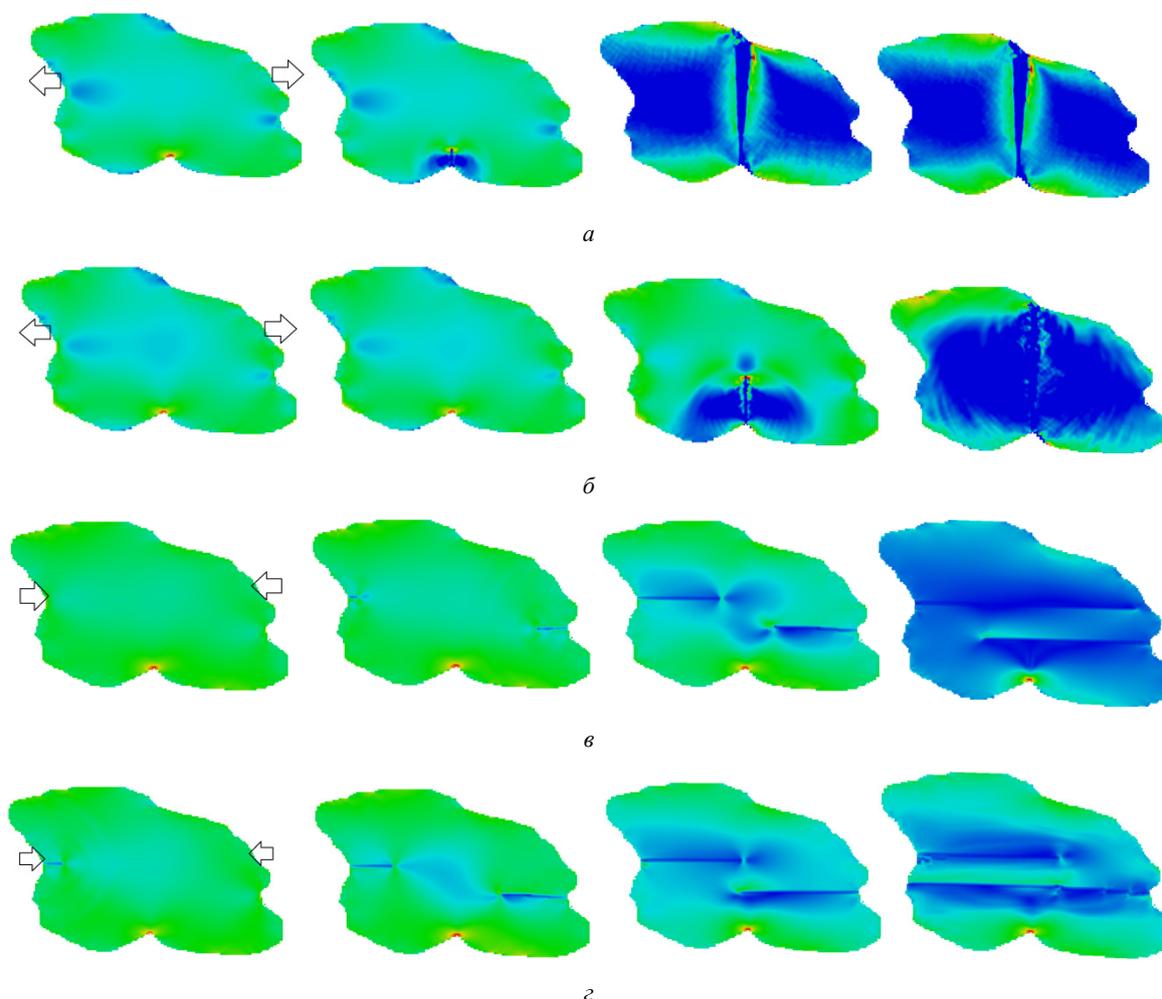


Рис. 10. Растрескивание керамической частицы при растяжении (*a, б*) и сжатии композита (*в, г*). Плоское напряженное (*a, в*) и плоское деформированное состояния (*б, г*)

Fig. 10. Cracking of the ceramic particle under tension (*a, b*) and compression of the composite (*c, d*). Plane-stress (*a, c*) and plane-strain cases (*b, d*)

Все расчеты проводились до степени деформации, при которой трещина проходит через всю частицу. При растяжении трещина распространяется перпендикулярно направлению прилагаемой нагрузки и появляется раньше в плоско-напряженном, чем в плоско-деформированном состоянии. При сжатии в областях наибольшей кривизны границы формируются две трещины, распространяющиеся навстречу друг другу параллельно оси сжатия. Такой характер разрушения при сжатии наблюдается как с учетом, так и без учета остаточных напряжений.

При сжатии на левой и правой сторонах частицы возникают две локальные области растяжения (рис. 11, *a*) – области красного цвета, в которых давление (среднее напряжение) отрицательно. В данных областях при дальнейшем нагружении выполнится критерий разрушения. При растяжении трещина зародится в локальных областях концентрации растягивающих нагрузок, расположенных на нижней стороне частицы. В областях объемного сжатия (синие области) зарождения трещин не происходит, поскольку в этих областях прочность C_{com} высокая (см. таблицу) и критерий разрушения не выполняется.

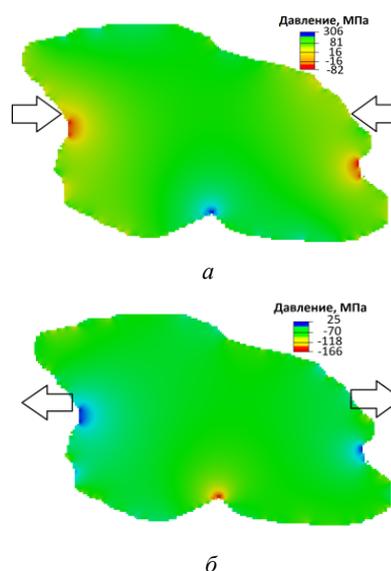


Рис. 11. Распределение давления в керамической частице перед возникновением трещин при сжатии (*a*) и растяжении (*б*)

Fig. 11. Pressure distribution in the ceramic particle before cracking in case of compression (*a*) and tension (*b*)

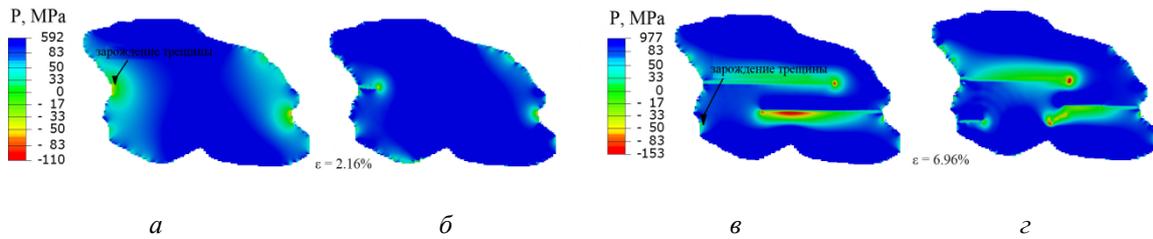


Рис. 12. Растрескивание в керамической частице в случае плоско-напряженного состояния при сжатии без учета остаточных напряжений (а, в) и с учетом остаточных напряжений (б, д)

Fig. 12. Cracking in the ceramic particle for the case of plane stress during compression without (a, c) and with taking into account the residual stresses (b, d)

Сравнение характера растрескивания частицы в случаях, когда остаточные напряжения учитываются и не учитываются, приведено на рис. 12. В случае учета остаточных напряжений трещина зарождается раньше, при меньшем значении общей деформации композита. Однако скорость роста трещины в этом случае оказывается меньшей, чем для случая, когда остаточные напряжения не учитываются.

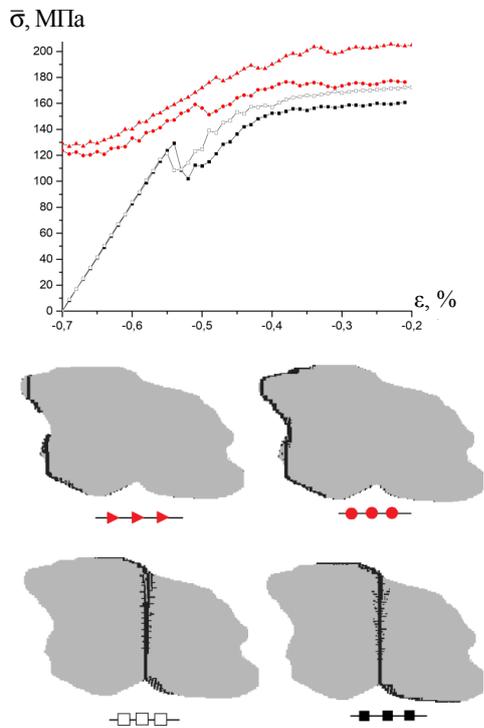


Рис. 13. Кривые деформирования и характер разрушения керамической частицы с учетом остаточных напряжений (красные фигуры) и без учета остаточных напряжений (квадраты) в плоско-напряженной (треугольники и не закрашенные квадраты) и плоско-деформированной (круги и закрашенные квадраты) постановках задачи при растяжении

Fig. 13. Flow curves and fracture patterns for the ceramic particle considering the residual stresses (red geometric figures) and without considering residual stresses (squares) and the plane-stress (triangles and not filled squares) and plane-strain (circles and filled squares) formulations of the problem under tension

Напряжение на кривых течения $\bar{\sigma}$, представленных на графике (рис. 13), было вычислено как усредненное по расчетной области значение интенсивности напря-

жений (5), а деформация – относительное удлинение данной области в направлении растяжения.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_K (\sigma_{eq})_i \cdot S_i}{\sum_K S_i}. \quad (5)$$

Здесь K – количество элементов в расчетной сетке, $i = 1, 2 \dots K$, S_i – площадь i -го элемента. Относительная деформация начинается со значения $\varepsilon = -0,7\%$, что соответствует остаточной деформации после охлаждения. Характер распространения трещины принципиально меняется при изменении условий постановки задачи. Расчеты без учета остаточных напряжений показывают разрушение внутри самой частицы. Без учета остаточных напряжений трещины распространяются по межфазной границе. Связано это с тем, что благодаря предварительной пластической деформации матрицы, возникающей при охлаждении, при дальнейшем растяжении предел прочности раньше достигается на границе, чем внутри области частицы. Кривые течения для случая учета остаточных напряжений идут выше. Таким образом, остаточные напряжения повышают предел прочности композита как для плоско-напряженной, так и для плоско-деформированной постановок.

Проведено численное моделирование деформирования и разрушения композиционного материала на микроуровне. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При охлаждении композиционного материала в матрице на некотором расстоянии от частицы возникают области объемных растягивающих напряжений, при этом частица испытывает объемное сжатие; локализация пластической деформации в матрице и концентрация напряжений в частице нерегулярной формы в 3 раза выше в случае круглой частицы.

2. При сжатии композиционного материала с частицей нерегулярной формы в частице возникают локальные области объемного растяжения.

3. При внешнем растяжении и сжатии трещины в частице распространяются в разных направлениях – перпендикулярно и вдоль направления нагружения соответственно.

4. Остаточные термические напряжения повышают прочность композита при растяжении и приводят к смене механизма разрушения: вместо раскалывания частицы наблюдается разрушение вдоль границы раздела матрица – частица.

Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом (Проект No. 18-19-00273). Модель разрушения, описываемая уравнением (2), разработана в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002.

Библиографический список

1. A review on emerging composite materials for cesium adsorption and environmental remediation on the latest decade / Shangqing Chen, Jiayin Hu, Senjian Han, Yafei Guo, Nelson Belzile, Tianlong Deng // *Separation and Purification Technology*. – 2020. – Vol. 251. – P. 117340. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117340
2. Natalie Zimmermann, Peng Hao Wang. A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – Vol. 115. – P. 104692. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104692
3. Ramanathan Arunachalam, Pradeep Kumar Krishnan, Rajaraman Muraliraja. A review on the production of metal matrix composites through stir casting–Furnace design, properties, challenges, and research opportunities // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 191. – P. 33–45. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017
4. Avik Samanta, Qinghua Wang, Hongtao Ding. A novel selective laser melting process for glass fiber-reinforced metal matrix composites // *Manufacturing Letters*. – 2018. – Vol. 18. – P. 27–30. DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.09.006
5. Malaya Prasad Behera, Troy Dougherty, Sarat Singamneni. Conventional and Additive Manufacturing with Metal Matrix Composites: A Perspective // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – P. 159–66. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.023
6. Gopinath Muvvala, Debapriya Patra Karmakar, Ashish Kumar Nath. 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. – P. 514–521. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.04.254
7. Pramanik A., Basak A.K. Fracture and fatigue life of Al-based MMCs machined at different conditions // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2018. – Vol. 191. – P. 33–45. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.01.013
8. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications / Pulkit Garg, Anbesh Jamwal, Devendra Kumar, Kishor Kumar Sadasivuni, Chaudhery Mustansar Hussain, Pallav Gupta // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, Iss. 5. – P. 4924–4939. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028
9. Hypervelocity impact damage behavior of B4C/Al composite for MMOD shielding application / Xuegang Huang, Chun Yin, Hongqiang Ru, Shumao Zhao, Yongjun Deng, Yunjia Guo, Sen Liu // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 186. – P. 108323 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108323>
10. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing / Tom Peat [et al.]. // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 396. – P. 1635–1648. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.10.156
11. Gopinath Muvvala, Debapriya Patra Karmakar, Ashish Kumar Nath. Online assessment of TiC decomposition in laser cladding of metal matrix composite coating // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 121. – P. 310–320. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.061
12. Dejian Liu, Hu. Peipei, Guoqing Min. Interfacial reaction in cast WC particulate reinforced titanium metal matrix composites coating

Acknowledgment

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 18-19-00273). Fracture model described by Eq. (2) was developed according to the Government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0002.

produced by laser processing // *Optics & Laser Technology*. – 2015. – Vol. 69. – P. 180–186. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.01.003

13. Shot peening-induced plastic deformation of individual phases within a coated WC-Co hard metal composite material including stress-strain curves for WC as a function of temperature / Lukáš Faksa, Werner Daves, Thomas Klünsner, Kathrin Maier, Thomas Antretter, Christoph Czettel, Werner Ecker // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 380. – P. 125026. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125026

14. Effect of cell form on residual stress of SiC-reinforced GH4738 composites / Yanju Wang [et al.]. // *Composites Part C: Open Access*. – 2020. – Vol. 2. – P. 100030. DOI: 10.1016/j.jcomc.2020.100030

15. Modeling on temperature-dependent first matrix cracking stress for fiber reinforced ceramics considering fiber debonding and residual thermal stress / Yong Deng [et al.]. // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – P. 21666–21674. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.08.254

16. A numerical study of plastic strain localization and fracture across multiple spatial scales in materials with metal-matrix composite coatings / R. Balokhonov, V. Romanova, S. Schmauder, E. Emelianova // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 101. – P. 342–355. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.03.013

17. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и В₄C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления / В.М. Фомин [и др.]. // *Физ. мезомех.* – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 5–15.

18. Закономерности формирования областей объемного растяжения при одноосном и всестороннем сжатии металло-керамических композитов и покрытий / Р.Р. Балохонов [и др.]. // *Физ. мезомех.* – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 69–80.

19. Balokhonov R., Romanova V., Kulkov A. Microstructure-based analysis of deformation and fracture in metal-matrix composite materials // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – Vol. 110. – P. 104412. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104412

20. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites / Zhirong Liao [et al.]. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2019. – Vol. 143. – P. 63–91. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2019.05.006

21. Chen S., Osovski S. Damage evolution around shear loaded intervoid ligaments in plane strain and plane stress // *European Journal of Mechanics / A Solids*. – 2020. – Vol. 80, № 10390. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103909

22. On structural topology optimization considering material nonlinearity: Plane strain versus plane stress solutions / Heng Chi [et al.]. // *Advances in Engineering Software*. – 2019. – Vol. 131. – P. 217–231. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.08.017

23. Cervera M., Chiumenti M., Di Capua D. Benchmarking on bifurcation and localization in J2 plasticity for plane stress and plane strain conditions // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2012. – Vol. 241–244. – P. 206–224. DOI: 10.1016/j.cma.2012.06.002

24. Pushpendra Kumar Jain, Prashant Baredar, S.C.Soni. Development Of Silicon Carbide Particle Reinforced Aluminium 6101 Metal Matrix Composite Using Two-Step Stir Casting// *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 18. – P. 3521–3525. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.281

25. Sliding frictional contact analysis of a monoclinic coating/isotropic substrate system / K.B. Yilmaz, İ. Çömez, M.A. Güler, B. Yildirim // *Mechanics of Materials*. – 2019. – Vol. 137. – 103132. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103132

26. Modeling method of coating thickness random mistuning and its effect on the forced response of coated blisks / Xianfei Yan, Junnan Gao, Yue Zhang, Kunpeng Xu, Wei Sun // *Aerospace Science and Technology*. – 2019. – Vol. 92. – P. 478–488. DOI: 10.1016/j.ast.2019.06.020

27. Pandi Pitchai, Harald Berger, P.J. Guruprasad. Investigating the influence of interface in a three phase composite using variational asymptotic method based homogenization

technique// *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 233. – 111562. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111562

28. Effects of thermal residual stresses and thermal-induced geometrically necessary dislocations on size-dependent strengthening of particle reinforced MMCs / Dongfeng Cao, Qingfeng Duan, Shuxin Li, Yucheng Zhong, Haixiao Hu // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 200. – P. 290–297. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.129

29. Yash Pachaury, Yung C. Shin. Assessment of sub-surface damage during machining of additively manufactured Fe-TiC metal matrix composites // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 266. – P. 173–183. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.001

30. Laser surface polishing of NiCrSiBC – 60WC ceramic-metal matrix composite deposited by laser directed energy deposition process / Amit Choudhary, Abhijit Sadhu, Sagar Sarkar, Ashish Kumar Nath, Gopinath Muvvala // *Surface & Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 404. – 126480. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126480

References

1. Shangqing Chen, Jiayin Hu, Senjian Han, Yafei Guo, Nelson Belzile, Tianlong Deng. A review on emerging composite materials for cesium adsorption and environmental remediation on the latest decade, 2020, *Separation and Purification Technology*, 251, 117340. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117340

2. Natalie Zimmermann, Peng Hao Wang. A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials, 2020, *Engineering Failure Analysis*, 115, 104692. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104692

3. Ramanathan Arunachalam, Pradeep Kumar Krishnan, Rajaraman Muraliraja. A review on the production of metal matrix composites through stir casting–Furnace design, properties, challenges, and research opportunities, 2018, *Journal of Manufacturing Processes*, 191, pp. 33–45. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017

4. Avik Samanta, Qinghua Wang, Hongtao Ding. A novel selective laser melting process for glass fiber-reinforced metal matrix composites, 2018, *Manufacturing Letters*, 18, pp. 27–30. doi: 10.1016/j.mfglet.2018.09.006

5. Malaya Prasad Behera, Troy Dougherty, and Sarat Singamneni. Conventional and Additive Manufacturing with Metal Matrix Composites: A Perspective, 2019, *Procedia Manufacturing*, 30, pp. 159–166. doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.023

6. Gopinath Muvvala, Debapriya Patra Karmakar, Ashish Kumar Nath. Monitoring and assessment of tungsten carbide wettability in laser clad metal matrix composite coating using an IR pyrometer, 2017, *Journal of Alloys and Compounds*, 714, pp. 514–521. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.04.254

7. Pramanik, A., Basak, A.K. Fracture and fatigue life of Al-based MMCs machined at different conditions, 2018, *Engineering Fracture Mechanics*, 191, pp. 33–45. doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.01.013

8. Pulkit Garg, Anbesh Jamwal, Devendra Kumar, Kishor Kumar Sadasivuni, Chaudhery Mustansar Hussain, Pallav Gupta. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications, 2019, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (5), pp. 4924–4939. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028

9. Xuegang Huang, Chun Yin, Hongqiang Ru, Shumao Zhao, Yongjun Deng, Yunjia Guo, Sen Liu. Hypervelocity impact damage behavior of B4C/Al composite for MMOD shielding application, 2020, *Materials & Design*, 186, 108323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108323>

10. Tom Peat [et al.]. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing, 2017, *Applied Surface Science*, 396, pp. 1635–1648. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.10.156

11. Gopinath Muvvala, Debapriya Patra Karmakar, Ashish Kumar Nath. Online assessment of TiC decomposition in laser cladding of metal matrix composite coating, 2017, *Materials & Design*, 121, pp. 310–320. doi: 10.1016/j.matdes.2017.02.061

12. Dejian Liu, Hu. Peipei, Guoqing Min. Interfacial reaction in cast WC particulate reinforced titanium metal matrix composites coating produced by laser processing, 2015, *Optics & Laser Technology*, 69, pp. 180–186. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.01.003

13. Lukáš Faksa, Werner Daves, Thomas Klünsner, Kathrin Maier, Thomas Antretter, Christoph Czettel, Werner Ecker. Shot peening-induced plastic deformation of individual phases within a coated WC-Co hard metal composite material including stress-strain curves for WC as a function of temperature, 2019, *Surface & Coatings Technology*, 380, 125026. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.125026

14. Yanju Wang [et al.]. Effect of cell form on residual stress of SiC-reinforced GH4738 composites, 2020, *Composites Part C: Open Access*, 2, 100030. doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100030

15. Yong Deng [et al.]. Modeling on temperature-dependent first matrix cracking stress for fiber reinforced ceramics considering fiber debonding and residual thermal stress, 2018, *Ceramics International*, 44, pp. 21666–21674. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.254

16. Balokhonov, R., Romanova, V., Schmauder, S., Emelianova, E. A numerical study of plastic strain localization and fracture across multiple spatial scales in materials with metal-matrix composite coatings, 2019, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 101, pp. 342–355. doi: 10.1016/j.tafmec.2019.03.013

17. Fomin V.M. [et al.]. 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, pp. 291–300. DOI: 10.1134/S1029959920040025

18. Balokhonov R.R. [et al.]. Formation of Bulk Tensile Regions in Metal Matrix Composites and Coatings under Uniaxial and Multiaxial Compression. *Physical Mesomechanics*, 2020, 23, pp. 135–146. DOI: 10.1134/S1029959920020058

19. Balokhonov, R., Romanova, V., Kulkov, A. Microstructure-based analysis of deformation and fracture in metal-matrix composite materials, 2020, *Engineering Failure Analysis*, 110, 104412. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104412
20. Zhirong Liao [et al.]. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites, 2019, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 143, pp. 63-91. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.05.006
21. Chen, S., Osovski, S. Damage evolution around shear loaded intervoid ligaments in plane strain and plane stress, 2020, *European Journal of Mechanics / A Solids*, 80, 10390. doi: 10.1016/j.euromechsol.2019.103909
22. Heng Chi [et al.]. On structural topology optimization considering material nonlinearity: Plane strain versus plane stress solutions, 2019, *Advances in Engineering Software*, 131, pp. 217–231. doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.08.017
23. Cervera, M., Chiumenti, M., Di Capua, D. Benchmarking on bifurcation and localization in J2 plasticity for plane stress and plane strain conditions, 2012, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 241-244, pp. 206–224. doi: 10.1016/j.cma.2012.06.002
24. Pushpendra Kumar Jain, Prashant Baredar, S.C.Soni. Development Of Silicon Carbide Particle Reinforced Aluminium 6101 Metal Matrix Composite Using Two-Step Stir Casting, 2019, *Materials Today: Proceedings*, 18, pp. 3521-3525. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.281
25. K.B. Yilmaz, İ. Çömez, M.A. Güler, B. Yildirim. Sliding frictional contact analysis of a monoclinic coating/isotropic substrate system, 2019, *Mechanics of Materials*, 137, 103132. doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103132
26. Xianfei Yan, Junnan Gao, Yue Zhang, Kunpeng Xu, Wei Sun. Modeling method of coating thickness random mistuning and its effect on the forced response of coated blisks, 2019, *Aerospace Science and Technology*, 92, pp. 478–488. doi: 10.1016/j.ast.2019.06.020
27. Pandi Pitchai, Harald Berger, P.J. Guruprasad. Investigating the influence of interface in a three phase composite using variational asymptotic method based homogenization technique, 2020, *Composite Structures*, 233, 111562. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111562
28. 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, 2018, *Composite Structures*, 200, pp. 290–297. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.129
29. Yash Pachaury, Yung C. Shin. Assessment of sub-surface damage during machining of additively manufactured Fe-TiC metal matrix composites, 2019, *Journal of Materials Processing Technology*, 266, pp. 173–183. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.001
30. Amit Choudhary, Abhijit Sadhu, Sagar Sarkar, Ashish Kumar Nath, Gopinath Muvvala. Laser surface polishing of NiCrSiBC – 60WC ceramic-metal matrix composite deposited by laser directed energy deposition process, 2020, *Surface & Coatings Technology*, 404, 126480. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126480