

Вичужанин Д.И., Ёлшина Л.А., Смирнов А.С., Мурадымов Р.В. Диаграмма предельной пластичности алюминий-графенового металлматричного композита с содержанием графена 2 мас. % при температуре 300 °С // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 17–26. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.02

Vichuzhanin D.I., Yolshina L.A., Smirnov A.S., Muradymov R.V. A fracture locus for a 2 wt% aluminum-graphene metal matrix composite at 300 °C. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 3, pp. 17-26. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.02



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.02

УДК 621.7.011+620.163.2

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЙ-ГРАФЕНОВОГО МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С СОДЕРЖАНИЕМ ГРАФЕНА 2 МАС. % ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 300 °С

Д.И. Вичужанин¹, Л.А. Ёлшина², А.С. Смирнов¹, Р.В. Мурадымов²

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 03 июля 2018 г.
Принята: 13 сентября 2018 г.
Опубликована: 08 октября 2018 г.

Ключевые слова:

алюминий-графеновый металлматричный композит, диаграмма предельной пластичности, коэффициент напряженного состояния, коэффициент Лодде-Надаи.

АННОТАЦИЯ

Исследовано деформационное поведение алюминий-графенового металлматричного композита (ММК) с содержанием графена 2 мас.% при температуре 300 °С. Исследуемый ММК синтезирован в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН. Получены экспериментальные данные по предельной пластичности ММК. В качестве характеристики предельной пластичности использовали величину степени деформации сдвига в момент разрушения, которая является функцией коэффициента напряженного состояния, а также коэффициента Лодде-Надаи. Для исследования предельной пластичности использовали следующие виды испытаний: испытания на растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с кольцевой выточкой на боковой поверхности; испытания на растяжение и сжатие образцов типа «колокольчик»; испытания образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка. По результатам исследований выполнена идентификация диаграммы предельной пластичности композита при температуре 300 °С. Установлено, что графен вызывает увеличение пластических свойств алюминия даже в условиях преобладающих растягивающих напряжений. Однако его влияние существенно зависит от вида напряженного состояния, в котором находится металл в процессе деформации. Так, в испытаниях на растяжение гладких цилиндрических образцов композит обладает практически неограниченной пластичностью. Образцы пластически деформировались до момента, пока не происходило физическое разделение частей образца в месте разрушения, а площадь сечения образца в шейке стремилась к нулю. Однако при испытаниях образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка в условиях растягивающих напряжений влияние графена на пластические свойства ММК нивелируется. При этом в условиях преобладающих сжимающих напряжений пластичность исследованного ММК значительно увеличивается для всех видов испытаний. Выполнено сравнение полученной диаграммы предельной пластичности с диаграммами предельной пластичности технически чистого алюминия и ММК с содержанием графена 1 мас.%. Установлено, что с увеличением содержания графена пластические свойства материала увеличиваются.

© ПНИПУ

© Вичужанин Дмитрий Иванович – к.т.н., с.н.с., e-mail: mmm@imach.uran.ru, ORCID: 0000-0002-6508-6859.
Ёлшина Людмила Августовна – д.х.н., e-mail: yolshina@ihte.uran.ru, ORCID: 0000-0002-7001-6396.
Смирнов Александр Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: smirnov@imach.uran.ru, ORCID: 0000-0002-5826-491X.
Мурадымов Роман Викторович – асп., e-mail: roman_muradymov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7629-0732.

Dmitrii I. Vichuzhanin – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: mmm@imach.uran.ru, ORCID: 0000-0002-6508-6859.

Liudmila A. Yolshina – Doctor of Chemical Sciences, e-mail: yolshina@ihte.uran.ru, ORCID: 0000-0002-7001-6396.

Aleksandr S. Smirnov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: smirnov@imach.uran.ru, ORCID: 0000-0002-5826-491X.

Roman V. Muradymov – PhD Student, e-mail: roman_muradymov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7629-0732.



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)

A FRACTURE LOCUS FOR A 2 WT% ALUMINUM-GRAPHENE METAL MATRIX COMPOSITE AT 300 °C

D.I. Vichuzhanin¹, L.A. Yolshina², A.S. Smirnov¹, R.V. Muradymov²

¹Institute of Engineering Science Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

²Institute of High-Temperature Electrochemistry Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 03 July 2018
Accepted: 13 September 2018
Published: 08 October 2018

Keywords:

aluminum-graphene metal matrix composite, fracture locus, stress triaxiality coefficient, Lode-Nadai coefficient.

ABSTRACT

Deformation behavior of a 2 wt% aluminum-graphene metal matrix composite (MMC) at 300 °C is studied. The MMC under study is synthesized at the Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS. Data on ultimate ductility of the MMC is obtained. The value of shear strain to fracture is used as the characteristic of ultimate ductility. The shear strain to fracture is the function of the stress triaxiality coefficient and the Lode-Nadai coefficient. Tensile tests of smooth cylindrical specimens, notched cylindrical specimens, tensile and compressive tests of bell-shaped specimens, and tests of thick-walled cups with thinned bottoms are used to study ultimate ductility. The fracture locus of the composite at 300 °C is identified by the results of the study. It has been determined that graphene increases the ductility of aluminum, even under conditions of prevailing tensile stresses. However, the influence of graphene is significantly dependent on the form of the stress state of the metal under deformation. The composite under conditions of tension of smooth cylindrical specimens manifests practically unlimited ductility. The specimens underwent plastic deformation till the moment of the physical separation of specimen parts in the fracture region, while the cross section of the specimen in the neck tended to zero. However, when thick-walled cups with thinned bottoms are tested, the influence of graphene on ductile properties of the MMC can be neglected. Under conditions of prevailing compressive stresses, the ductility of the MMC significantly increases for all the test types. The obtained fracture locus is compared with the fracture loci of commercially pure aluminum and the 1 wt% aluminum-graphene MMC. It has been determined that the ductility of the material increases with graphene content.

© PNRPU

Введение

В настоящее время металломатричные композиты (ММК) достаточно широко используются в различных отраслях промышленности, таких как авиационно-космическая, автомобильная, производство электроники, спортивных товаров [1–4] и т.д. В качестве материала матрицы для ММК часто используют технически чистый алюминий или сплавы на его основе. В качестве наполнителя обычно применяют карбид кремния [1, 3–5], оксид алюминия [6, 7], алмазы [8, 9], карбид бора [2, 10], карбид титана [11, 12], а также нано- и микро-частицы углерода, такие как графит [2], углеродные нанотрубки [13, 14] и графен [15–17]. Существуют также ММК с гибридным наполнителем [18–20]. Получение ММК осуществляют различными видами спекания порошков [1–2, 10, 13–14, 16, 18–20], инфильтрацией (squeeze casting) [3, 9, 17], литьем с предварительным перемешиванием (stir casting) [5, 6, 11, 12], а также печатью на 3D-принтере [15]. В большинстве приведенных работ рассматриваются методы получения ММК и их стандартные механические свойства, такие как предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и т.д. Однако в процессе изготовления деталей или полуфабрикатов из ММК методами пластической деформации напряженно-деформированное состояние, скорее всего, будет значительно отличаться от

того, которое возникает в условиях стандартных механических испытаний. При этом будут отличаться и пластические свойства материала, полученные в стандартных испытаниях. Для оценки пластических свойств материалов в широком диапазоне изменения параметров напряженно-деформированного состояния строят диаграммы предельной пластичности материалов [21–26]. В большинстве приведенных источников диаграмма предельной пластичности представляет собой зависимость эквивалентной пластической деформации до разрушения ϵ_f (либо степени деформации сдвига до разрушения $\Lambda_f = \sqrt{3} \cdot \epsilon_f$) от параметров напряженного состояния: коэффициента напряженного состояния k и коэффициента Лодэ-Надаи μ_σ либо нормализованного угла Лодэ $\bar{\theta}$ [23], которые определяют по формулам

$$k = \frac{\sigma}{T}; \mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1, \bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi}, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – среднее нормальное напряжение; $T = \sqrt{0,5 S_{ij} S_{ij}}$ – интенсивность касательных напряжений; S_{ij} – компоненты девиатора напряжений; $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ – главные напряжения; θ – угол Лодэ, который определяют по формуле [23]

$$\cos(3\theta) = \frac{\frac{27}{2} I_3(\mathbf{D}_\sigma)}{[3I_2(\mathbf{D}_\sigma)]^{3/2}}, \quad (2)$$

где $I_2(\mathbf{D}_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений; $I_3(\mathbf{D}_\sigma)$ – третий инвариант девиатора напряжений. Величина $\bar{\theta}$ может быть выражена через μ_σ соотношением

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2 \arccos(\sqrt{3}\mu_\sigma(\mu_\sigma^2/9 - 1))}{\pi}. \quad (3)$$

Коэффициент напряженного состояния k характеризует относительный уровень среднего нормального напряжения. При положительном k преобладают растягивающие напряжения, при отрицательном – сжимающие. Коэффициент Лоде-Надаи характеризует вид напряженного состояния, он изменяется в пределах от -1 до $+1$. Значения $\mu_\sigma = -1/+1$ соответствуют схемам одноосного растяжения/сжатия. При чистом сдвиге ($\sigma_{11} = -\sigma_{33}$; $\sigma_{22} = 0$) $\mu_\sigma = 0$. Параметры k и μ_σ однозначно характеризуют напряженное состояние при пластической деформации. Все параметры, входящие в функцию $\Lambda_f = \Lambda_f(k, \mu_\sigma)$, описывающую диаграмму предельной пластичности, являются безразмерными. Поэтому можно сравнивать пластические свойства материалов путем сравнения их диаграмм пластичности.

На пластические свойства материала может также влиять скорость деформации. Однако в условиях малых скоростей деформаций ее влияние может быть незначительным. Так, в работе [27] было установлено, что предельные пластические свойства сплава 01570 в интервале скоростей деформации сдвига $\dot{\epsilon}$ 0,1–0,5 1/с практически не зависят от скорости деформации, а зависят только от коэффициентов k и μ_σ . В данной работе исследование влияния скорости деформации на пластические свойства исследованного материала не проводилось, и все испытания выполнены при одинаковых средних за процесс скоростях деформации. Скорость движения исполнительного органа испытательной машины подбирали таким образом, чтобы среднеинтегральная за процесс скорость деформации $\dot{\epsilon}$ в месте разрушения была равна 0,5 1/с.

Еще одним параметром, влияющим на пластические свойства материала, является температура испытания. В настоящей работе исследован металломатричный композит на основе алюминия. Согласно работе [28] технически чистый алюминий обладает наибольшими пластическими свойствами при температуре 500 °С. Пластичность материала незначительно снижается при температуре 300 °С. Однако в производственных условиях более низкая температура деформации является экономически предпочтительной. Поэтому в данной работе все исследования выполнены при температуре 300 °С.

Цель работы – построение диаграммы предельной пластичности алюминий-графенового металломатричного композита с содержанием графена 2 мас. % при температуре 300 °С.

1. Материал и методы исследования

Исследуемый ММК синтезирован в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН. ММК получен путем прямого химического взаимодействия ионов углерода с расплавленным алюминием в среде хлоридного расплава в температурном интервале 700–750 °С в течение 1–5 ч с последующим медленным охлаждением со скоростью не более 0,1 град/мин. Метод получения ММК защищен патентом [29]. Процесс самосборки атомов углерода в пленки графена происходит в момент застывания алюминиевой капли. Известно, что предельная растворимость углерода в алюминии составляет 0,03 мас. %. Превышение содержания углерода выше этой величины приводит к пересыщению жидкого алюминия, при медленном остывании которого атомы углерода образуют сначала углеродные кластеры, а затем и пленки графена площадью до 1000 квадратных микрометров. Содержание графена является постоянной величиной, неизменной от поверхности застывшей металлической капли до ее центральной части, при этом листы графена ориентированы параллельно горизонтальной поверхности. Данный процесс может быть осуществлен без специальной инертной атмосферы, так как алюминий перед расплавлением засыпают слоем солей, что позволяет после расплавления избежать окисления поверхности алюминия кислородом воздуха. Углеродные включения в композите проанализированы при помощи Рамановской спектроскопии. Установлено, что Рамановский спектр углеродного включения на поперечном шлифе композитного материала представляет собой типичный спектр графена [30].

Для построения диаграммы предельной пластичности ММК использовали комплекс испытаний, предложенный в [27]: испытания на растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с кольцевой выточкой на боковой поверхности; испытания на растяжение и сжатие образцов типа «колокольчик»; испытания образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка. Так как в процессе испытаний образцов типа «колокольчик», а также образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка трудно определить момент разрушения, то образцы деформировали на разную степень деформации, после чего осматривали на предмет разрушения. Всего было выполнено три серии испытаний каждого вида образцов. Среднее арифметическое трех испытаний принималось за деформацию разрушения. Испытания выполнены на сервогидравлической испытательной машине INSTRON 8801, снабженной нагревательной печью. Температура образцов контролировалась хромель-копелевой термопарой. Исследование изломов гладких цилиндрических образцов

и образцов с кольцевой выточкой выполнено на растровом электронном микроскопе VEGA II TESCAN. Реологическое поведение композита исследовали в испытаниях на осадку цилиндрических образцов в зависимости от скорости деформации, степени деформации и температуры. Исследования проведены на пластометрической установке конструкции ИМАШ УрО РАН. По результатам пластометрических испытаний построены кривые упрочнения, которые в дальнейшем использовали при моделировании методом конечных элементов.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в процессе испытаний образцов типа «колокольчик» и образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка выполнено конечно-элементное моделирование деформации с использованием пакета конечно-элементного анализа DEFORM. Моделирование осуществляли в осесимметричной постановке. Сетка конечных элементов строилась автоматически и перестраивалась в процессе расчета. Сетка сгущалась в местах геометрической нелинейности, локализации деформаций, а также в местах интенсификации скорости деформации. Сетка конечных элементов для образца типа «колокольчик» имела 1062 элемента и 1138 узлов, для образца в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка – 1026 элементов и 1103 узла. Для материала ММК принималась изотропная упругопластическая модель. Деформирующий инструмент рассматривали как жесткое тело. Так как образцы являются осесимметричными, то моделировалась только половина их сечения. Трение между ММК и инструментом рассчитывалось с использованием закона трения Зибеля. Для определения коэффициента трения воспользовались методикой [31]. По результатам испытаний коэффициент трения установлен равным 0,3. Для проверки адекватности моделей выполнено сравнение экспериментального усилия деформирования с усилием, полученным в результате моделирования. Для всех моделей отклонение расчетного усилия от реального не превысило 5 %.

2. Исследование реологического поведения композита

Для построения диаграммы пластичности исследованного ММК потребовалось выполнить конечно-элементное моделирование процессов пластической деформации композита. При этом для конечно-элементной модели требуется задание реологических свойств ММК.

Реологическое поведение металлических материалов, а также металломатричных композитов в условиях высоких температур является сложным, что вызвано взаимодействием неравновесных процессов упрочнения и разупрочнения. Взаимодействие этих процессов зависит от исходного состояния микроструктуры (размера зерен, субзерен, распределения упрочняющих частиц и т.д.), а также от изменения термомеханических параметров деформирования во времени. Поэтому авторами

использована структурно-иерархическая модель сопротивления деформации [32]. Внутренние параметры модели записаны в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Модель сопротивления деформации построена с точностью до коэффициентов, значения которых идентифицированы по опытным данным. Для идентификации модели выполнены эксперименты на сжатие цилиндрических образцов. По результатам испытаний и идентификации построены зависимости сопротивления деформации от степени деформации и скорости деформации при температуре 300 °С (рис. 1).

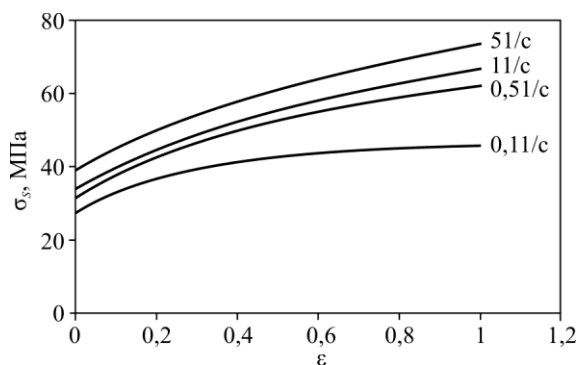


Рис. 1. Зависимости сопротивления деформации σ_s от степени деформации ϵ , для ММК Al/2% Gr при температуре 300 °С при скоростях деформаций $\dot{\epsilon}$, 1/с: 0,1; 0,5; 1 и 5
Fig. 1. The dependences of strain resistance σ_s on strain degree ϵ , for the Al/2% Gr MMC at 300°C under constant strain rates $\dot{\epsilon}$, 1/s: 0.1; 0.5; 1 and 5

3. Испытания на растяжение цилиндрических образцов

В испытаниях на растяжение гладких цилиндрических образцов и образцов с кольцевой выточкой разрушение образца начинается в центре, на оси симметрии. Причем на оси симметрии коэффициент Лоде-Надаи $\mu_\sigma = -1$ на протяжении всего процесса деформации.

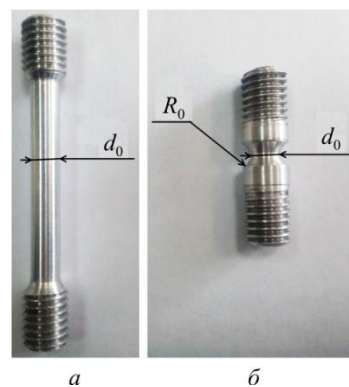


Рис. 2. Образцы для испытаний на растяжение:
а – гладкий цилиндрический образец;
б – образец с кольцевой выточкой
Fig. 2. Tensile test specimens: a – is a smooth cylindrical specimen; b – is a notched cylindrical specimen

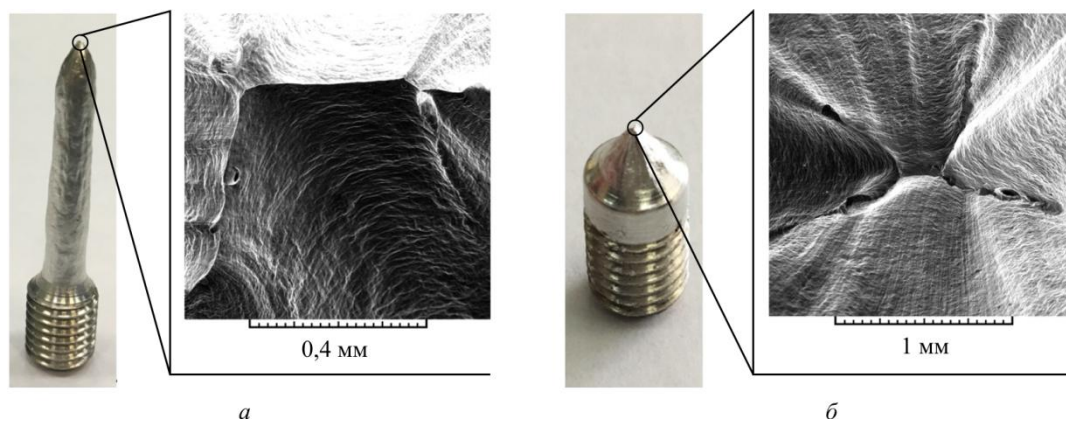


Рис. 3. Поверхности изломов гладкого цилиндрического образца (а) и образца с выточкой (б) после испытания на растяжение при температуре 300 °С
 Fig. 3. Fracture surfaces of the smooth cylindrical specimen (a) and the notched cylindrical specimen (b) after tensile tests at the temperature of 300 °С

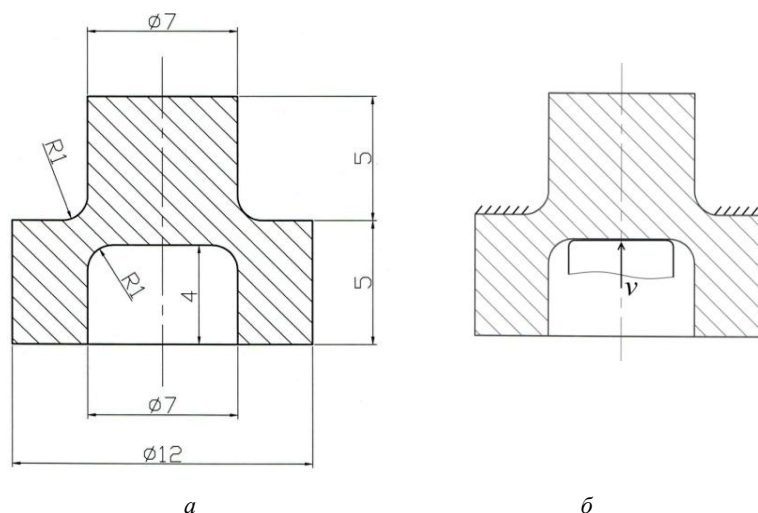


Рис. 4. Эскиз образца «колокольчик» для испытаний на растяжение (а) и схема приложения нагрузок (б)
 Fig. 4. A draft of the longitudinal section of the bell-shaped specimen for tensile tests (a) and the load scheme (b)

Начальный диаметр рабочей части гладких цилиндрических образцов d_0 был равен $(5 \pm 0,05)$ мм, начальная длина рабочей части l_0 равна $(25 \pm 0,05)$ мм (рис. 2, а). Образцы с выточкой имели начальный диаметр $d_0 = (5 \pm 0,05)$ мм и начальный радиус выточки $R_0 = (2,5 \pm 0,05)$ мм (рис. 2, б).

По результатам испытаний установлено, что в условиях одноосного растяжения исследованный ММК обладает значительной (можно сказать, неограниченной) пластичностью даже в условиях растягивающих напряжений. Образцы пластически деформировались до момента, пока не происходило физическое разделение частей образца в месте разрушения, а поверхность излома при этом сузилась в линию (рис. 3). При этом определить степень деформации до разрушения в данных экспериментах представляется затруднительным, так как она вычисляется в зависимости от площади поперечного сечения образца в месте разрушения.

4. Испытания образцов типа «колокольчик»

Для исследования ММК в условиях, близких к чистому сдвигу ($\mu_\sigma \approx 0$), выполнены испытания образцов «колокольчик». Данный вид образцов может быть испытан на растяжение или сжатие, при этом в процессе испытания будут преобладать растягивающие ($k > 0$) или сжимающие напряжения ($k < 0$). На рис. 4, а приведено продольное сечение образца «колокольчик» для испытаний на растяжение, а на рис. 4, б схема приложения нагрузок. Подробное описание образца «колокольчик» для испытаний на сжатие и методика испытаний приведены в [25].

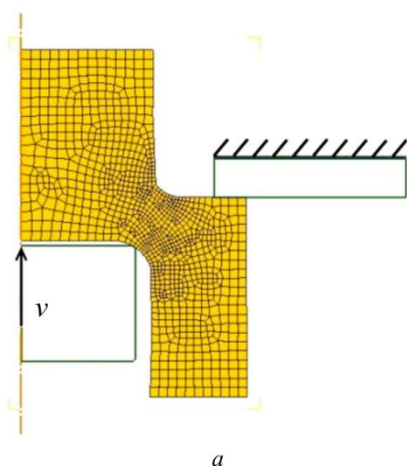
По результатам испытаний на сжатие установлено, что материал ММК в условиях сжатия имеет высокие пластические свойства и образцы деформируются без разрушения (рис. 5). Поэтому определить величину Λ_f не представляется возможным.

В результате испытаний на растяжение установлено, что деформация локализуется в минимальном сечении образца, в этом же месте происходит разрушение, аналогично рис. 2, а в [33]. Для оценки напряженно-деформированного состояния в процессе испытаний выполнено конечно-элементное моделирование испытания образца «колокольчик» на растяжение с использованием пакета конечно-элементного анализа DEFORM. Моделирование осуществлялось до деформации, соответствующей моменту разрушения образца. На рис. 6 приведены конечно-элементная модель и распределение эквивалентных пластических деформаций ϵ по сечению образца в момент, соответствующий разрушению. Величина ϵ рассчитывается по формуле

$$\epsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2}, \quad (4)$$

где ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} – главные деформации.

Из рис. 6, б видно, что материал даже в условиях растягивающих напряжений обладает значительной



пластичностью. На рис. 7 приведены зависимости k и μ_σ от степени деформации сдвига Λ в месте разрушения образца.

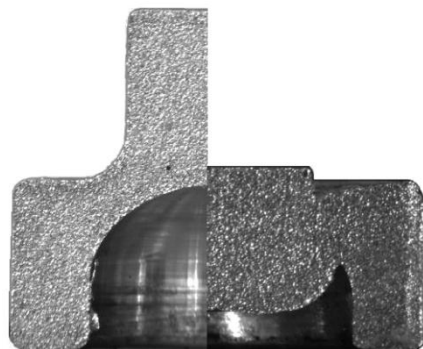


Рис. 5. Образец «колокольчик» до (левая часть фотографии) и после (правая часть фотографии) испытания.

Для наглядности образец разрезан

Fig. 5. The bell-shaped specimen before testing (the left part of the photograph) and after testing (the right part of the photograph). For clarity, the specimen is cut

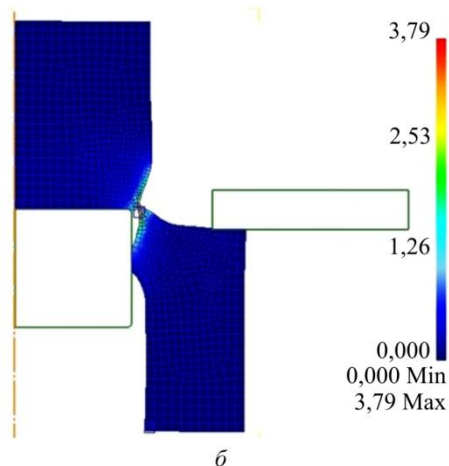


Рис. 6. Конечно-элементная модель растяжения образца «колокольчик» (а) и распределение эквивалентных пластических деформаций ϵ в момент, соответствующий разрушению (б)

Fig. 6. A finite element model of the tension test of the bell-shaped specimen (a) and distribution of equivalent plastic strains ϵ at the fracture onset (b)

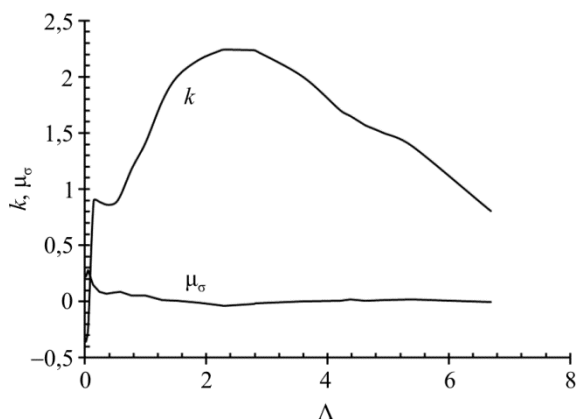


Рис. 7. Зависимости k и μ_σ от степени деформации сдвига Λ в месте разрушения образца «колокольчик»

Fig. 7. The $k - \Lambda$ and $\mu_\sigma - \Lambda$ curves at the point of fracture of a bell-shaped specimen

5. Испытания образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доньшка

Данный вид испытаний позволяет оценивать пластичность металла в условиях, когда коэффициент Лодде-Надаи $\mu_\sigma \approx +1$. В процессе испытания осуществляется выдавливание доньшка при помощи подшипникового шарика. Разрушение при этом происходит в центре доньшка, аналогично рис. 2, б в [33]. Подробное описание данного вида испытаний приведено в [27].

Для оценки напряженно-деформированного состояния в месте разрушения выполнено конечно-элементное моделирование процесса (рис. 8).

На рис. 9 приведены зависимости k и μ_σ от степени деформации сдвига Λ в месте разрушения образца.

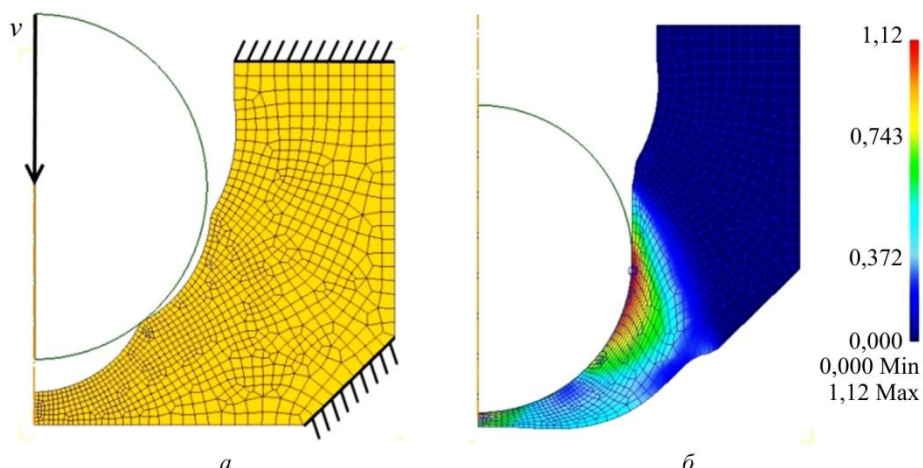


Рис. 8. Конечно-элементная модель выдавливания доньшка толстостенного стаканчика (а) и распределение эквивалентных пластических деформаций ϵ в момент, соответствующий разрушению (б)
 Fig. 8. A finite element model of extrusion of the bottom of a thick-walled cup (a) and equivalent plastic strains ϵ at the moment of fracture (b)

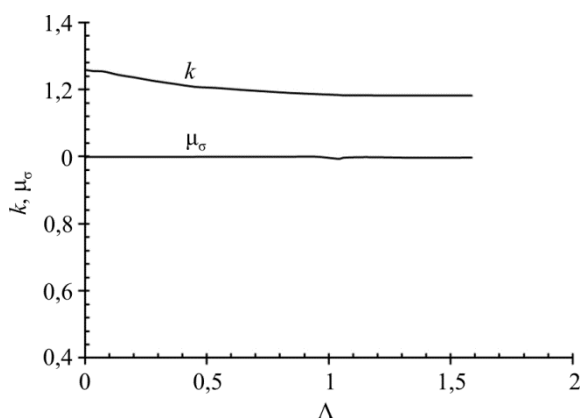


Рис. 9. Зависимости k и μ_σ от степени деформации сдвига Λ в месте разрушения образца в виде толстостенного стаканчика
 Fig. 9. The $k - \Lambda$ and $\mu_\sigma - \Lambda$ curves at the point of fracture of a thick-walled cup

6. Построение диаграммы предельной пластичности

По результатам приведенных выше исследований установлено, что ММК не разрушается в условиях сжимающих напряжений, а также в условиях растягивающих напряжений при $\mu_\sigma = -1$. Поэтому принято решение построить диаграмму предельной пластичности ММК в интервале значений $0 < \mu_\sigma < +1$ в условиях растягивающих напряжений ($k > 0$).

Для построения диаграммы предельной пластичности воспользуемся формулой

$$\Lambda_f = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot \mu_\sigma), \quad (5)$$

где α и β – эмпирические коэффициенты. Зная степень деформации сдвига до разрушения в испытаниях на растяжение образца «колокольчик» ($\Lambda_f = 6,69$)

и в испытаниях на выдавливание доньшка толстостенного стаканчика ($\Lambda_f = 1,58$), запишем уравнение (5) в виде системы уравнений

$$\begin{cases} 6,69 = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot 0), \\ 1,58 = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot 1). \end{cases}$$

Решив данную систему уравнений, получим значения неизвестных коэффициентов

$$\Lambda_f = 6,9 \exp(-1,47 \cdot \mu_\sigma). \quad (6)$$

Среднеинтегральное значение коэффициента напряженного состояния в процессе растяжения образца «колокольчик» (по данным рис. 7) $\bar{k} = 1,55$, в процессе выдавливания толстостенного стаканчика (по данным рис. 9) $\bar{k} = 1,2$. Так как с уменьшением коэффициента k степень деформации до разрушения возрастает, то пластичность исследованного ММК по диаграмме (6) можно оценивать снизу при $k \leq 1,2$.

Выполним сравнение полученной диаграммы с диаграммой технически чистого алюминия [34] и диаграммой ММК с содержанием графена 1 мас.% [33]. Для этого построим зависимости (3) в [34] и (2) в [33] при постоянном $k = 1,2$ (рис. 10).

Выводы

Получена диаграмма предельной пластичности алюминий-графенового металлматричного композита с содержанием графена 2 мас. % при температуре 300 °С. Выполнено сравнение полученной диаграммы предельной пластичности с диаграммами предельной пластичности технически чистого алюминия и ММК с содержанием графена 1 мас. %. Установлено, что увеличение содержания графена вызывает увеличение пластических

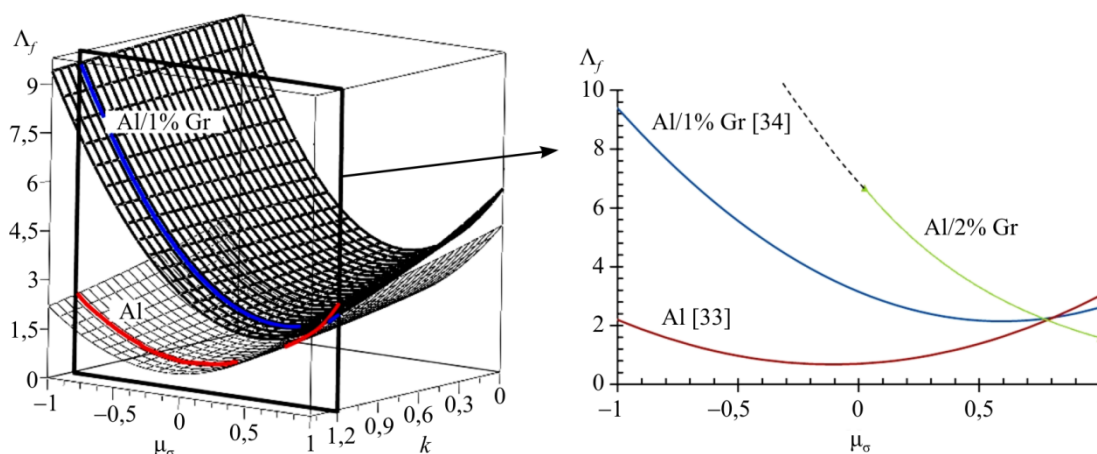


Рис. 10. Диаграммы предельной пластичности технически чистого алюминия [34] и алюмоматричных композитов с содержанием графена 1 [33] и 2 мас. % при температуре 300 °С и $k = 1,2$ (штриховая линия – это экстраполяция диаграммы (6) в область значений $\mu_\sigma < 0$)

Fig. 10. Fracture loci for the commercially pure Aluminum [34], the 1 wt% aluminum-graphene metal matrix composite [33] and 2 wt% aluminum-graphene metal matrix composite at 300 °C and $k = 1.2$ (Dashed line is an extrapolation of the fracture locus (6) to the range of values of $\mu_\sigma < 0$)

свойств алюминия. Однако его влияние существенно зависит от вида напряженного состояния, в котором находится металл в процессе деформации. При одноосном растяжении ($\mu_\sigma = -1$) увеличение содержания графена до 2 мас. % пластифицирует ММК настолько, что поверхность излома на образцах сужается в линию и площадь сечения образца в шейке стремится к нулю. Однако при испытаниях образцов в виде толстостенного стаканчика с утонением доннышка ($\mu_\sigma = +1$) в условиях растягивающих напряжений влияние графена на пластические свойства ММК нивелируется. Авторы не нашли в литературе описания подобных явлений в ММК, в основном исследуются стандартные свойства (относительное удлинение, относительное сужение) после испытаний образцов на растяжение. Очевидно, что для объяснения данных явлений необходимы дальнейшие исследования, позволяющие раскрыть механизмы разрушения ММК с графеном в зависимости от вида напряженного состояния.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-01011). Испытания проведены

Библиографический список

1. Discontinuously reinforced aluminum MMC extrusions / D. Hashiguchi, D. Tricker, A. Tarrant, J. Campbell, C. Pokross // Metal Powder Report. – 2017. – Vol. 72. – No. 4. – P. 252–258. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.01.074
2. Rawal S.P. Metal-matrix composites for space applications // JOM. – 2001. – Vol. 53. – Iss. 4. – P. 14–17. DOI: 10.1007/s11837-001-0139-z
3. Yan C., Lifeng W., Jianyue R. Multi-functional SiC/Al Composites for Aerospace Applications // Chinese Journal of Aeronautics. – 2008. – Vol. 21. – P. 578–584. DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60177-6
4. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends / S.T. Mavhungu, E.T. Akinlabi, M.A. Onitiri,

с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения УрО РАН и «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН. При проведении моделирования использовано программное обеспечение Лаборатории структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.

Acknowledgements

The work is carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nr. 16-08-01011). The tests were carried out using the facilities of the Collective Center “Plastometriya” of the Institute of Engineering Science, Ural branch of the Russian Academy of Sciences and the Collective Center “Substance Composition” of the Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural branch of the Russian Academy of Sciences. The simulations were performed with the application of the software installed at the Laboratory of Structural Methods of Analysis and Properties of Materials and Nanomaterials of the Collective Use Center affiliated to the Ural Federal University.

- F.M. Varachia // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 7. – P. 178–182. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.045
5. Effect of Modifier on Mechanical Properties of Aluminium Silicon Carbide (Al-SiC) Composites / S. Sulaiman, Z. Marjom, M.I.S. Ismail, M.K.A. Ariffin, N. Ashrafi // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 184. – P. 773–777. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.156
6. Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by Stir Casting and Evaluation of Mechanical and Wear Properties / V. Bharath, M. Nagaral, V. Auradi, S.A. Kori // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 1658–1667. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.151
7. Effect of Cutting parameters, Point angle and reinforcement percentage on surface finish, in drilling of AL6061/Al₂O_{3p} MMC / S.S. Jadhav, A.S. Kakde, N.G. Patil, J.B. Sankpal //

Procedia Manufacturing. – 2018. – Vol. 20. – P. 2–11. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.001

8. A new design of composites for thermal management: Aluminium reinforced with continuous CVD diamond coated W spiral wires / L. Ma, L. Zhang, P. Zhao, N. Hu, Z. Gong, W. Ye, Q. Wei, K. Zhou, Z. Yu, Y. Zhang // Materials and Design. – 2016. – Vol. 101. – P. 109–116. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.145

9. Enhanced thermal conductivity and flexural properties in squeeze casted diamond/aluminum composites by processing control / P. Wang, Z. Xiu, L. Jiang, G. Chen, X. Lin, G. Wu // Materials and Design. – 2015. – Vol. 88. – P. 1347–1352. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.048

10. Guo H., Zhang Z. Processing and strengthening mechanisms of boron-carbide-reinforced aluminum matrix composites // Materials Today. – 2018. – Vol. 73. – No. 2. – P. 62–67. DOI: 10.1016/j.mprp.2017.06.072

11. Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs) / U. Pandey, R. Purohit, P. Agarwal, S.K. Dhakad, R.S. Rana // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol. 4. – P. 5452–5460. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.05.057

12. Study of Fabrication, Testing and Characterization of Al/TiC Metal Matrix Composites through different Processing Techniques / U. Pandey, R. Purohit, P. Agarwal, S.K. Singh // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. 4106–4117. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.671

13. Determination of Mechanical Behavior of Fe-CNT MMC / C. Parswajinan, B.V. Ramnath, M. Vetrivel, A. Ranjith, B.K. Rohit, S. Vasanth, S. Vignesh // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. 1176–1185. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.199

14. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites / B. Chen, J. Shen, X. Ye, L. Jia, S. Li, J. Umeda, M. Takahashi, K. Kondoh // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 140. – P. 317–325. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.08.048

15. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites / Z. Hu, F. Chen, J. Xu, Q. Nian, D. Lin, C. Chen, X. Zhu, Y. Chen, M. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 746. – P. 269–276. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.272

16. Li J., Zhang X., Geng L. Improving graphene distribution and mechanical properties of GNP/Al composites by cold drawing // Materials and Design. – 2018. – Vol. 144. – P. 159–168. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.02.024

17. Anisotropic mechanical properties of graphene/copper composites with aligned graphene / K. Chu, F. Wang, X. Wang, D. Huang // Materials Science & Engineering A. – 2018. – Vol. 713. – P. 269–277. DOI: 10.1016/j.msea.2017.12.080

18. Sharif E.M., Karimzadeh F. Wear behavior of aluminum matrix hybrid nanocomposites fabricated by powder metallurgy // Wear. – 2011. – Vol. 271. – P. 1072–1079. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.015

19. Hot deformation behavior and mechanism of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with micro-SiC and nano-TiB₂ / X. Chen, D. Fu, J. Teng, H. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 753. – P. 566–575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.223

20. Strengthening behavior of carbon nanotube-graphene hybrids in copper matrix composites / X. Chen, J. Tao, J. Yi, Y. Liu, C. Li, R. Bao // Materials Science & Engineering A. – 2018. – Vol. 718. – P. 427–436. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.006

21. Smirnov S.V. Accumulation and Healing of Damage During Plastic Metal Forming: Simulation and Experiment // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 528. – P. 61–69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.528.61

22. Bai Y., Wierzbicki T. A comparative study of three groups of ductile fracture loci in the 3D space // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – Vol. 135. – P. 147–167. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.023

23. Algami M., Bai Y., Choi Y. A study of Inconel 718 dependency on stress triaxiality and Lode angle in plastic deformation and ductile fracture // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – Vol. 147. – P. 140–157. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.08.007

24. A new shear and tension based ductile fracture criterion: Modeling and validation / Q. Hu, X. Li, X. Han, J. Chen // European Journal of Mechanics A/Solids. – 2017. – Vol. 66. – P. 370–386. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2017.08.005

25. A fracture locus for a 50 volume-percent Al/SiC metal matrix composite at high temperature / S. Smirnov, D. Vichuzhanin, A. Nesterenko, A. Smirnov, N. Pugacheva, A. Kononov // International Journal of Material Forming. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 831–843. DOI: 10.1007/s12289-016-1323-6

26. Mimia M.J., Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental using a phenomenological ductile fracture criterion // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 244. – P. 17–43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029

27. Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. Комплекс испытаний для исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность металла при повышенной температуре // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 3. – С. 146–164. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.11

28. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник. – М.: Металлургия, 1994. – 228 с.

29. Пат. РФ 2 623 410. Способ синтеза металл-графеновых нанокompозитов / Ёлишина Л.А., Мурадымов Р.В. 20.07.2015.

30. Enhancement of the mechanical properties of aluminum-graphene composites / L.A. Yolshina, R.V. Muradymov, D.I. Vichuzhanin, E.O. Smirnova // AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1785, 040093. DOI: 10.1063/1.4967150

31. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982 – 312 с.

32. Smirnov A.S., Kononov A.V., Muizemnek O.Y. Modeling and simulation of strain resistance of alloys taking into account barrier effects // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 1. – P. 61–72. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.061-072

33. Диаграмма предельной пластичности алюминий-графенового металло матричного композита с содержанием графена 1 мас. % при температуре 300°C / Д. И. Вичужанин [и др.] // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8, вып. 2. – С. 184–189. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-184-189

34. A Fracture locus for commercially pure Aluminum at 300 °C / S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, A.V. Nesterenko, A.S. Igumnov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1785, 040067. DOI: 10.1063/1.4967124

References

1. Hashiguchi D., Tricker D., Tarrant A., Campbell J., Pokross, C. Discontinuously reinforced aluminum MMC extrusions. *Metal Powder Report*, 2017, 72 (4), pp. 252–258. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.01.074

2. Rawal, S.P. Metal-matrix composites for space applications. *JOM*, 2001, 53 (4), pp. 14–17. DOI: 10.1007/s11837-001-0139-z

3. Yan, C., Lifeng, W., Jianyue, R. Multi-functional SiC/Al Composites for Aerospace Applications. *Chinese Journal of Aero-*

- nautics, 2008, 21, pp. 578-584. DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60177-6
4. Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*, 2017, 7, pp. 178-182. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.045
 5. Sulaiman, S., Marjom, Z., Ismail, M.I.S., Ariffin, M.K.A., Ashrafi, N. Effect of Modifier on Mechanical Properties of Aluminium Silicon Carbide (Al-SiC) Composites. *Procedia Engineering*, 2017, 184, pp.773-777. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.156
 6. Bharath, V., Nagaral, M., Auradi, V., Kori, S.A. Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by Stir Casting and Evaluation of Mechanical and Wear Properties. *Procedia Materials Science*, 2014, 6, pp. 1658-1667. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.151
 7. Jadhav S.S., Kakde A.S., Patil N.G., Sankpal J.B. Effect of Cutting parameters, Point angle and reinforcement percentage on surface finish, in drilling of AL6061/Al₂O_{3p} MMC. *Procedia Manufacturing*, 2018, 20, pp. 2-11. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.001
 8. Ma L., Zhang L., Zhao P., Hu N., Gong Z., Ye, W., Wei Q., Zhou K., Yu, Z., Zhang Y. A new design of composites for thermal management: Aluminium reinforced with continuous CVD diamond coated W spiral wires. *Materials and Design*, 2016, 101, pp. 109-116. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.145
 9. Wang, P., Xiu, Z., Jiang, L., Chen, G., Lin, X., Wu, G. Enhanced thermal conductivity and flexural properties in squeeze casted diamond/aluminum composites by processing control. *Materials and Design*, 2015, 88, pp. 1347-1352. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.048
 10. Guo, H., Zhang, Z. Processing and strengthening mechanisms of boron-carbide-reinforced aluminum matrix composites. *Materials Today*, 2018, 73 (2), pp. 62-67. DOI: 10.1016/j.mprp.2017.06.072
 11. Pandey, U., Purohit, R., Agarwal, P., Dhakad, S.K., Rana, R.S. Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4, pp. 5452-5460. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.05.057
 12. Pandey, U., Purohit, R., Agarwal, P., Singh, S.K. Study of Fabrication, Testing and Characterization of Al/TiC Metal Matrix Composites through different Processing Techniques. *Materials Today: Proceedings*, 2018,5, pp. 4106-4117. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.671
 13. Parswajinan, C., Ramnath, B.V., Vetrivel, M., Ranjith, A., Rohit, B.K., Vasanth, S., Vignesh, S. Determination of Mechanical Behavior of Fe-CNT MMC. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5, pp 1176-1185. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.199
 14. Chen, B., Shen, J., Ye, X., Jia, L., Li, S., Umeda, J., Takahashi, M., Kondoh, K. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites. *Acta Materialia*, 2017, 140, pp. 317-325. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.08.048
 15. Hu, Z., Chen, F., Xu, J., Nian, Q., Lin, D., Chen, C., Zhu, X., Chen, Y., Zhang, M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 746, pp. 269-276. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.272
 16. Li, J., Zhang, X., Geng, L. Improving graphene distribution and mechanical properties of GNP/Al composites by cold drawing. *Materials and Design*, 2018, 144, pp. 159-168. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.02.024
 17. Chu, K., Wang, F., Wang, X., Huang, D. Anisotropic mechanical properties of graphene/copper composites with aligned grapheme. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 713, pp. 269-277. DOI: 10.1016/j.msea.2017.12.080
 18. Sharif, E.M., Karimzadeh, F. Wear behavior of aluminum matrix hybrid nanocomposites fabricated by powder metallurgy. *Wear*, 2011, 271, pp. 1072-1079. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.015
 19. Chen, X., Fu, D., Teng, J., Zhang, H. Hot deformation behavior and mechanism of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with micro-SiC and nano-TiB₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 753, pp. 566-575. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.223
 20. Chen, X., Tao, J., Yi, J., Liu, Y., Li, C., Bao, R. Strengthening behavior of carbon nanotube-graphene hybrids in copper matrix composites. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 718, pp. 427-436. 10.1016/j.msea.2018.02.006
 21. Smirnov, S.V. Accumulation and Healing of Damage During Plastic Metal Forming: Simulation and Experiment. *Key Engineering Materials*, 2013, 528, pp. 61-69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.528.61
 22. Bai, Y., Wierzbicki, T. A comparative study of three groups of ductile fracture loci in the 3D space. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015,135, pp. 147-167. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.023
 23. Algarni, M., Bai, Y., Choi, Y. A study of Inconel 718 dependency on stress triaxiality and Lode angle in plastic deformation and ductile fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015,147, pp. 140-157. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.08.007
 24. Hu, Q., Li, X., Han, X., Chen, J. A new shear and tension based ductile fracture criterion: Modeling and validation. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2017, 66, pp. 370-386. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2017.08.005
 25. Smirnov, S., Vichuzhanin, D., Nesterenko, A., Smirnov, A., Pugacheva, N. Kononov, A. A fracture locus for a 50 volume-percent Al/SiC metal matrix composite at high temperature. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10 (5), pp. 831-843. DOI: 10.1007/s12289-016-1323-6
 26. Mimia, M.J., Shamsari, M. Numerical prediction of failure in single point incremental using a phenomenological ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017,244, pp. 17-43. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029
 27. Miklyaev P.G. Mekhanicheskie svoistva legkikh splavov pri temperaturakh i skorostiakh obrabotki davleniem: Sprav. [Mechanical properties of light alloys at temperatures and rates of metal forming: ref. ed.]. *Moscow, Metallurgiya*, 1994, 228 p.
 28. Yolshina, L.A., Muradymov, R.V. RU 2 623 410 «Sposob sinteza metall-grafenovykh nanokompozitov» [«The method for synthesis of metal-graphene nanocomposites»] dd. 20.07.2015.
 29. Yolshina, L.A., Muradymov, R.V., Vichuzhanin, D.I., Smirnova, E.O. Enhancement of the mechanical properties of aluminum-graphene composites, *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1785 (040093). DOI: 10.1063/1.4967150
 30. Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Nesterenko A.V. A set of tests for studying the effect of the stress state on ultimate metal plasticity at high temperature. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no.3, pp.146-164.
 31. Grudev A.P., Zil'berg Iu.V., Tilik V.T. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Friction and lubricants in metal forming]. *Moscow, Metallurgiya*, 1982, 312 p.
 32. Smirnov, A.S., Kononov, A.V., Muizemnek, O.Y. Modeling and simulation of strain resistance of alloys taking into account barrier effects. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015,1, pp. 61-72. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.061-072
 33. Vichuzhanin D.I., Yolshina L.A., Muradymov R.V., Nesterenko A.V. Diagramma predel'noi plastichnosti aliuminiigrafenovogo metallomatrichnogo kompozita s sodержaniem grafena 1 mas.% pri temperature 300°S [A fracture locus for a 1 wt% aluminum-graphene metal matrix composite at 300°C]. *Letters on Materials*, 2018, no. 8(2), pp.184-189. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-2-184-189
 34. Smirnov, S.V., Vichuzhanin, D.I., Nesterenko, A.V., Igumnov, A.S. A Fracture locus for commercially pure Aluminum at 300 °C. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1785 (040067). DOI: 10.1063/1.4967124