

**Received:** 10.06.2024

**Revised:** 29.07.2024

**Accepted:** 16.08.2024

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2024.4.006-023

## THE EFFECT OF THE STRESS STATE ON THE DEFORMABILITY OF AN ALUMINUM MATRIX COMPOSITE WITH 10 VOL% SiC PARTICLE FILLER

D. I. Vichuzhanin<sup>a, \*</sup>, S. V. Smirnov<sup>b</sup>, N. B. Pugacheva<sup>c</sup>,  
A. V. Nesterenko<sup>d</sup>, and P. A. Polyakov<sup>e</sup>

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru);  
<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  [svs@imach.uran.ru](mailto:svs@imach.uran.ru);  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru);  
<sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7010-6260>  [nav@imach.uran.ru](mailto:nav@imach.uran.ru);  
<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7779-8546>  [smokie84@mail.ru](mailto:smokie84@mail.ru)

\*Corresponding author. Email: [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru)

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia  
Tel.: +7 (343) 362-3027

The effect of the stress state on the deformability of an aluminum matrix composite with 10 vol% of SiC particles is studied by using the damage criterion. Backward extrusion of a standard cup-shaped part is used as an example. The process is simulated by the finite element method to evaluate the stress-strain state and damage. It has been found that, in order to make a high-quality product, it is necessary to carry out extrusion under all-round compression at near-solidus temperatures. A laboratory die was designed and manufactured for the experimental verification of the simulation results. The die is peculiar in that the value of compressive stresses can be controlled during deformation. The extrusion process yields a defect-free product. It has been revealed that heating to near-solidus temperature breaks the initial cellular structure of the composite under external loading.

**Keywords:** damage, fracture locus, aluminum matrix composite, silicon carbide

### Acknowledgment

*The study was carried out in accordance with the state assignment for the Institute of Engineering Science UB RAS, theme No. 124020700063-3. The equipment of the Plastometriya shared research facilities (IES UB RAS) was used in the tests. 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 shared research facilities affiliated to the Ural Federal University.*

### References

1. Pramanik, A. and Basak, A.K. Fracture and fatigue life of Al-based MMCs machined at different conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 191, 33–45. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.01.013.
2. Huang, S.-J. and Ali, A.N. Effects of heat treatment on the microstructure and microplastic deformation behavior of SiC particles reinforced AZ61 magnesium metal matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 711, 670–682. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.020.
3. Kurganova, Yu.A., Kolmakov, A.G., Chen, I., and Kurganov, S.V. Study of mechanical characteristics of advanced aluminum-matrix composites reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, 13, 157–160. DOI: 10.1134/S2075113322010245.

4. Gladkovskii, S.V., Petrova, S.V., Cherkasova, T.S., and Patselov, A.M. Structure, physical and mechanical properties of aluminum matrix composites reinforced with carbide particles. *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, 65, 54–61. DOI: 10.1007/s11041-023-00891-5.
5. Munasir, N., Triwikantoro, T., Zainuri, M., Bäßler, R., and Darminto, D. Corrosion polarization behavior of Al–SiO<sub>2</sub> composites in IM and related microstructural analysis. *International Journal of Engineering*, 2019, 32 (7), 982–990. DOI: 10.5829/ije.2019.32.07a.11.
6. Dixit, S., Mahata, A., Mahapatra, D.R., Kailas, S.V., and Chattopadhyay, K. Multi-layer graphene reinforced aluminum – manufacturing of high strength composite by friction stir alloying. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 136, 63–71. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.028.
7. Hu, Z., Chen, F., Xu, J., Nian, Q., Lin, D., Chen, C., Zhu, X., Chen, Y., and Zhang, M. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 746, 269–276. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.272.
8. Ogawa, F. and Masuda, C. Fabrication and the mechanical and physical properties of nanocarbon-reinforced light metal matrix composites: a review and future directions. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 820, 141542. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141542.
9. Ma, J., Kang, J., and Huang, T. Novel application of ultrasonic cavitation for fabrication of TiN/Al composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 661, 176–181. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.11.159.
10. Tan, Z., Li, Z., Fan, G., Kai, X., Ji, G., Zhang, L., and Zhang, D. Diamond/aluminum composites processed by vacuum hot pressing: microstructure characteristics and thermal properties. *Diamond and Related Materials*, 2013, 31, 1–5. DOI: 10.1016/j.diamond.2012.10.008.
11. Bharath, V., Nagaral, M., Auradi, V., and Kori, S.A. Preparation of 6061 Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC's by stir casting evaluation of mechanical and wear properties. *Procedia Materials*, 2014, 6, 1658. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.151.
12. Yolshina, L.A., Kvashnichev, A.G., Vichuzhanin, D.I., and Smirnova, E.O. Mechanical and thermal properties of aluminum matrix composites reinforced by in situ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles fabricated via direct chemical reaction in molten salts. *Applied Sciences*, 2022, 12, 8907. DOI: 10.3390/app12178907.
13. Kumar, D., Angra, S., and Singh, S. Mechanical properties and wear behavior of stir cast aluminum metal matrix composite: a review. *International Journal of Engineering*, 2022, 35 (4), 794–801. DOI: 10.5829/ije.2022.35.04a.19.
14. Najimi, A.A. and Shahverdi, H.R. Microstructure and mechanical characterization of Al6061-CNT nanocomposites fabricated by spark plasma sintering. *Materials Characterization*, 2017, 133, 44–53. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.09.028.
15. Chen, B., Shen, J., Ye, X., Jia, L., Li, S., Umeda, J., Takahashi, M., and Kondoh, K. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites. *Acta Materialia*, 2017, 140, 317–325. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.08.048.
16. Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L., and Wang, B. Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 2016, 94, 54–60. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.034.
17. Çiçek, O., Uslu Tecimer, H., Tan, S.O., Tecimer, H., Orak, İ., and Altındal Ş. Synthesis and characterization of pure and graphene (Gr)-doped organic/polymer nanocomposites to investigate the electrical and photoconductivity properties of Au/n-GaAs structures. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113, 14–23. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.012.
18. Liu, J., Zhang, Z., Lv, Y., Yan, J., Yun, J., Zhao, W., Kou, L., and Zhai, C. Synthesis and characterization of ZnO NWAs/graphene composites for enhanced optical and field emission performances. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 99, 336–372. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.036.
19. Bozkurt, Y. and Boumerzoug, Z. Tool material effect on the friction stir butt welding of AA2124-T4 alloy matrix MMC. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, 7 (1), 29–38. DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.04.001.

20. Zhang, X., Chen, Y., and Hu, J. Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 97, 22–34. DOI: 10.1016/J.PAEROSCI.2018.01.001.
21. Yusof, N.S.B., Sapuan, S.M., Sultan, M.T.H., Jawaid, M., and Maleque, M.A. Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2017, 29 (3), 129–144. DOI: 10.1016/j.ctmat.2017.09.003.
22. Hamza, M. and Mondal, S. Effect of reinforcement with ceramic microparticles on structure and properties of composites with an aluminum matrix. *Metal Science and Heat Treatment*, 2022, 64 (3), 163–166. DOI: 10.1007/s11041-022-00778-x.
23. Adetunla, A. and Akinlabi, E. Fabrication of aluminum matrix composites for automotive industry via multipass friction stir processing technique. *International Journal of Automotive Technology*, 2019, 20 (6), 1079–1088. DOI: 10.1007/s12239-019-0101-0.
24. Cao, T.S. Models for ductile damage and fracture prediction in cold bulk metal forming processes: a review. *International Journal of Material Forming*, 2015, 10 (2), 1–33. DOI: 10.1007/s12289-015-1262-7.
25. Bogatov, A.A., Mizhiritsky, O.I., and Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* [Metal Plasticity Resource Under Metal Forming]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1984, 144 p. (In Russian).
26. Bai, Y. and Wierzbicki, T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24 (6), 1071–1096. DOI: 10.1016/j.ijplas.2007.09.004.
27. Xue, L. Stress based fracture envelope for damage plastic solids. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76, 419–438. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2008.11.010.
28. Khan, A.S. and Liu, H. A new approach for ductile fracture prediction on Al 2024–T351 alloy. *International Journal of Plasticity*, 2012, 35, 1–12. DOI: 10.1016/j.ijplas.2012.01.003.
29. Malcher, L. and Mamiya, E.N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant. *International Journal of Plasticity*, 2014, 56, 232–261. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.
30. Kolmogorov, V.L., Shishmintsev, V.F., and Matveev, G.A. Ultimate deformability of metals tensile-tested to failure under hydrostatic pressure. *Physics of Metals and Metallography*, 1967, 23 (1), 170–171.
31. Rahmanifard, R., Akhlaghi, F. Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356SiC<sub>p</sub> composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187–188, 433–436. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.077.
32. Jia, Y. and Bai, Y. Ductile fracture prediction for metal sheets using all-strain based anisotropic eMMC model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 115–116, 516–531. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.07.022.
33. Vichuzhanin, D.I., Khotinov V.A., and Smirnov, S.V. The effect of the stress state on the ultimate plasticity of steel X80. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, 1, 73–89. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.073-089. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1\\_21.html](http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_21.html)
34. *Kovka i shtampovka*, t. 2: *Goryachaya obyemnaya shtampovka* [Forging and Stamping, Semenova, E.I., ed., Hot Volume Stamping, vol. 2]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2010, 720 p. (In Russian).
35. Vichuzhanin, D.I., Smirnov, S.V., Nesterenko, A.V., and Igumnov, A.S. A fracture locus for a 10 volume-percent B95/SiC metal matrix composite at the near-solidus temperature. *Letters on Materials*, 2018, 8 (1), 88–93. DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-88-93.
36. Pugacheva, N.B., Michurov, N.S., Senaeva, E.I., and Bykova, T.M. Structure and thermophysical properties of aluminum-matrix composites. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, 117 (11), 1144–1151. DOI: 10.1134/S0031918X16110119.

37. Iwasaki, H., Takeuchi, M., Mori, T., Mabuchi, M., and Higashi, K. A comparative study of cavitation characteristics in composite and 7475 aluminum alloy. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1994, 31 (3), 255–260. DOI: 10.1016/0956-716x(94)90279.
38. Mabuchi, M., Higashi, K., and Langdon, T.G. An investigation of the role of a liquid phase in Al Cu Mg metal matrix composites exhibiting high strain rate superplasticity. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, 42 (5), 1739–1745. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90384-0.
39. Grudev, A.P., Zilberg, Yu.V., and Tilik, V.T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem* [Friction and Lubricants in Metal Forming by Pressure: Reference Book]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1982, 312 p. (In Russian).
40. Pugacheva, N.B., Malygina, I.Yu., Michurov, N.S., Senaeva, E.I., and Antenorova, N.P. Effect of heat treatment on the structure and phase composition of aluminum matrix composites containing silicon carbide. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, 6, 28–36. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.028-036. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6\\_161.html](http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6_161.html)
41. Pugacheva, N.B. and Senaeva, E.I. Influence of Al/SiC composite structure on corrosion damages nature. *AIP Conf. Proc.*, 2016, 1785, 040049. DOI: 10.1063/1.4967106.

Подана в журнал: 10.06.2024

УДК 620.173:539.431.1:539.422.53

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.006-023

## ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В95/10%SiC ПРИ ОБРАТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Д. И. Вичужанин<sup>а, \*</sup>, С. В. Смирнов<sup>б</sup>, Н. Б. Пугачева<sup>в</sup>,  
А. В. Нестеренко<sup>г</sup>, П. А. Поляков<sup>д</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия*

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru);

<sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  [svs@imach.uran.ru](mailto:svs@imach.uran.ru);

<sup>в</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru);

<sup>г</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7010-6260>  [nav@imach.uran.ru](mailto:nav@imach.uran.ru);

<sup>д</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7779-8546>  [smokie84@mail.ru](mailto:smokie84@mail.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [mmm@imach.uran.ru](mailto:mmm@imach.uran.ru)

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362-30-27

С использованием критерия поврежденности выполнено исследование влияния напряженного состояния на деформационную способность алюмоматричного композита В95/10%SiC на примере обратного выдавливания типовой детали «стакан». Для оценки напряженно-деформированного состояния и поврежденности в процессе выдавливания выполнено моделирование процесса методом конечных элементов. Установлено, что для получения качественного изделия необходимо осуществлять выдавливание в условиях всестороннего сжатия при околосolidусной температуре. Для экспериментальной проверки результатов моделирования спроектирован и изготовлен лабораторный штамп, особенностью которого является возможность регулирования величины сжимающих напряжений в процессе деформации. Получено бездефектное изделие при выдавливании. Установлено, что нагрев до околосolidусной температуры способствует разбиению первоначальной ячеистой структуры композита при внешнем нагружении.

**Ключевые слова:** поврежденность, диаграмма предельной пластичности, алюмоматричный композит, карбид кремния

### 1. Введение

Алюминий и его сплавы наиболее часто используются при создании металломатричных композитов (ММК) в качестве материалов матрицы, которая усиливается различного рода наполнителями: частицами карбида кремния SiC [1–5], углеродных нановолокон, углеродных нанотрубок, графена [6–8], керамическими частицами [9]. Композиты, как правило, производят горячим прессованием [10], литьем [1, 2, 11–13], различными видами спекания порошков [14–16]. Благодаря высокой теплопроводности и низкому коэффициенту термического расширения, высокой жесткости и прочности ММК обладают большим потенциалом применения в качестве конструкционного материала в электронной промышленности [17, 18], машиностроении [19], автомобильной и аэрокосмической промышленности [20–23].

В литературных источниках приводятся в основном стандартные механические свойства металломатричных композитов при комнатной температуре. Данные свойства определены в достаточно узком диапазоне изменения параметров напряженно-деформированного

состояния (в условиях стандартных испытаний), которые не всегда реализуются в процессах пластической деформации.

Весьма актуальной является проблема обоснования выбора оптимальных режимов деформирования композита, позволяющих изготавливать изделия требуемой формы и с требуемым уровнем эксплуатационных свойств. В связи с вышесказанным, большое значение имеет оценка деформационной способности (степени деформации до разрушения) ММК. Оценка деформируемости материала может быть осуществлена в категориях механики поврежденности. Безразмерный скалярный параметр  $\omega$  является основным концептуальным и расчетным параметром моделей механики поврежденности. До деформации  $\omega = 0$ , а в момент возникновения трещины разрушения  $\omega = 1$ . Существует большое количество моделей поврежденности, обзор которых приведен в работе [24].

В данной работе оценка деформируемости ММК осуществляется с использованием феноменологической модели В. Л. Колмогорова [25]:

$$\omega = \int_0^{\Lambda} \frac{d\Lambda}{\Lambda_f(k, \mu_\sigma)}, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  – степень деформации сдвига;  $\Lambda_f(k, \mu_\sigma)$  – предельная пластичность или степень деформации сдвига, накопленная к моменту разрушения в условиях монотонного деформирования (при постоянных на всем процессе деформирования величинах  $k$  и  $\mu_\sigma$ ). Значение величины  $\Lambda_f(k, \mu_\sigma)$  в формуле (1) зависит от текущего напряженного состояния материала в процессе деформации. Данная величина является функцией коэффициента напряженного состояния  $k$  и коэффициента Лоде – Надаи  $\mu_\sigma$ :

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

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. Показатель  $k$  характеризует относительный уровень нормальных напряжений: при  $k > 0$  преобладают нормальные растягивающие напряжения, а при  $k < 0$  – сжимающие. Показатель Лоде – Надаи  $\mu_\sigma$  характеризует вид напряженного состояния. При  $\mu_\sigma = +1/-1$  имеет место напряженное состояние осесимметричного сжатия/растяжения. При  $\mu_\sigma = 0$  реализуется схема плоского напряженного состояния.

Совокупность величин  $k$  и  $\mu_\sigma$  однозначно характеризует напряженное состояние при пластической деформации. Графическая интерпретация функции  $\Lambda_f(k, \mu_\sigma)$  называется диаграммой предельной пластичности материала.

Для того чтобы оценить поврежденность материала в процессе пластической деформации, необходимо предварительно определить функцию  $\Lambda_f(k, \mu_\sigma)$ . Для этого существуют различные виды испытаний пластичности материала. При  $\mu_\sigma = -1$  в условиях растягивающих напряжений используют испытания на растяжение цилиндрических образцов [26–29], а в условиях сжимающих напряжений может применяться техника высоких давлений [30, 31]. Для исследований пластичности материала в условиях  $\mu_\sigma = 0$  используют испытания на кручение цилиндрических образцов, а также испытания на сдвиг с растяжением и сжатием [29, 32]. При  $\mu_\sigma = +1$  используют испытания на сжатие цилиндрических образцов [28], а также испытания на выдавливание образцов в виде толстостенного стаканчика [33].

В настоящей работе исследован металломатричный композит на основе сплава системы Al–Zn–Mg–Cu с наполнителем из частиц SiC (10 об. %). Выполнена оценка деформаци-

онной способности исследованного материала на примере изготовления типовой детали типа «стакан» (по классификации Е. И. Семенова [34]) методом обратного выдавливания.

Целью работы является оценка (с использованием механики поврежденности) возможности изготовления детали конструкционного назначения из данного композита, а также разработка и реализация в лабораторных условиях технологического процесса ее изготовления.

## 2. Материал и методика исследования

Исследованный ММК имеет матрицу из высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Zn–Mg–Cu следующего химического состава (в масс. %): 5–7 Zn; 1,8–2,8 Mg; 1,4–2 Cu; до 0,5 Fe; до 0,5 Si; 0,2–0,6 Mn; 0,1–0,25 Cr; до 0,05 Ni; до 0,05 Ti. В качестве наполнителя использовали частицы SiC. Синтез ММК осуществлен во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ). Композит получен по технологии порошковой металлургии путем спекания смеси порошков алюминиевого сплава и карбида кремния. Количественный анализ показал, что среднее содержание SiC по объему составляло 10 об. %. Средний размер частиц наполнителя SiC – 12 мкм (рис. 1). Исследование микроструктуры и характера расположения частиц карбида кремния на поверхности полированных нетравленных шлифов, выполненных на продольном резе детали «стакан», проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU с энергодисперсионной приставкой Oxford для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 450. Структурная особенность исследованного композита заключалась в том, что исходная заготовка имела ячеистую структуру: частицы карбида кремния расположены по границам матричных гранул, образуя сетку (рис. 2).

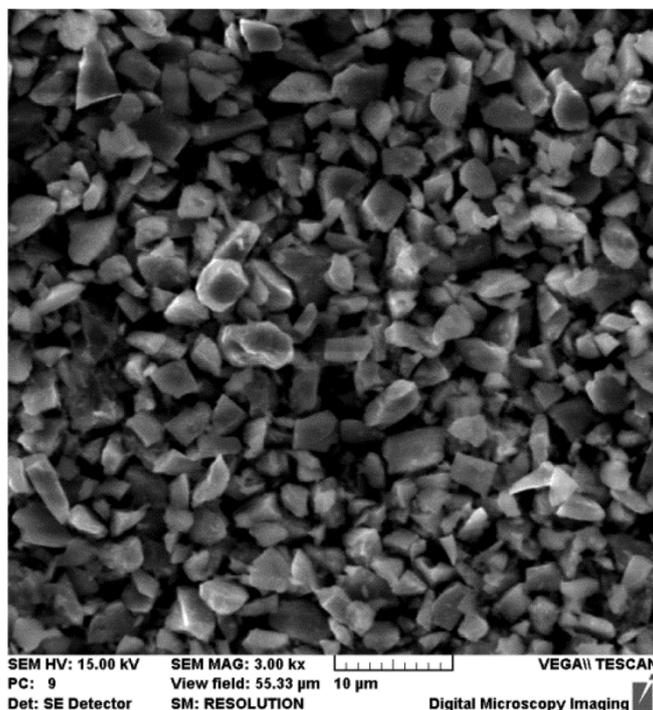


Рис. 1. Морфологическая форма частиц карбида кремния SiC, использованного при изготовлении исследованного композита

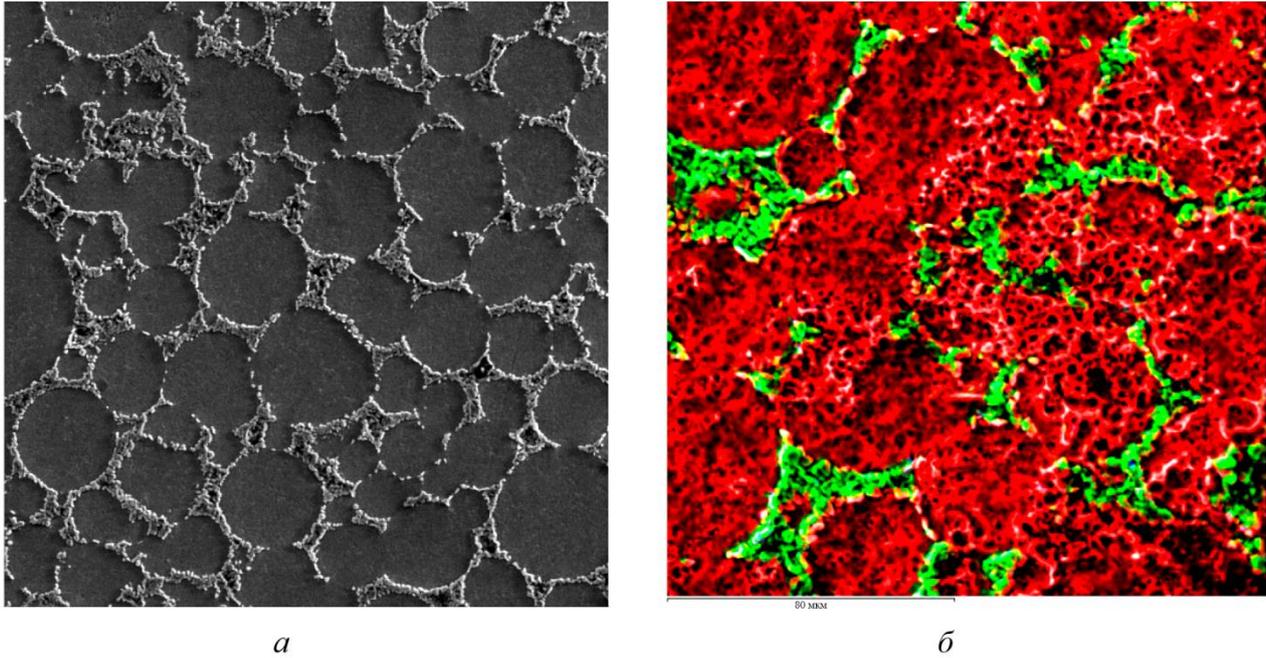


Рис. 2. Микроструктура (а) и характер распределения (б) алюминия (красный) и кремния (зеленый) в исследованном ММК

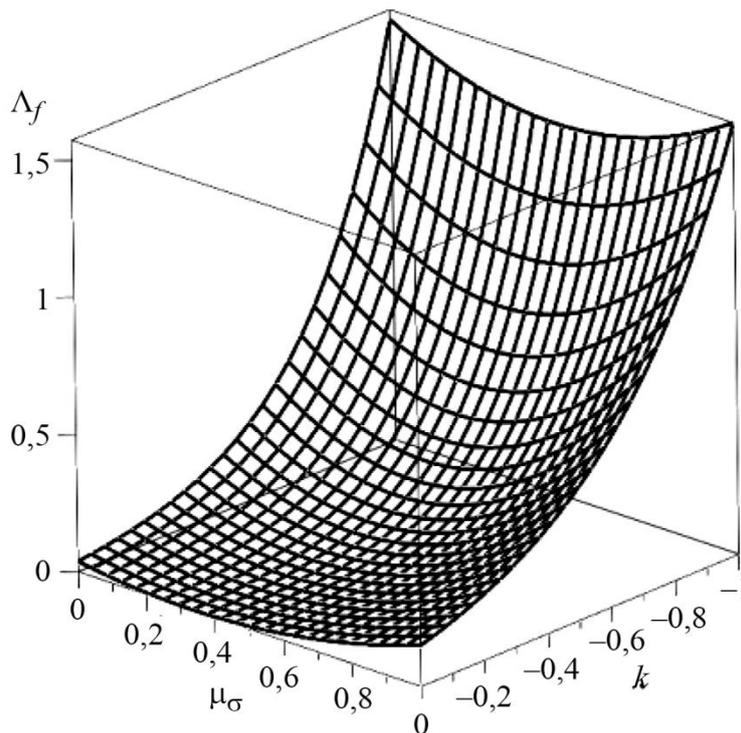


Рис. 3. Диаграмма предельной пластичности ММК [35]

Диаграмма предельной пластичности композита [35] приведена на рис. 3. Диаграмма построена по результатам испытаний при температуре 570 °С, которая является околосолидусной [36] для исследуемого ММК. Такая температура испытаний выбрана потому, что для ММК на основе алюминиевых сплавов представляется перспективным увеличение температур технологической деформации вплоть до околосолидусных, так как это приводит к снижению интенсивности образования микропористости на частицах SiC [31] и, как следствие,

улучшению деформационных свойств ММК [37, 38]. Для исследования предельной пластичности в работе [35] использовали следующие виды испытаний: растяжение гладких (без выточки) цилиндрических образцов, растяжение цилиндрических образцов с концентраторами напряжений (выточкой на боковой поверхности), сжатие цилиндрических образцов, кручение цилиндрических образцов, сжатие и растяжение образцов типа «колокольчик», выдавливание доньшка толстостенного стаканчика с подпором и без подпора. По результатам испытаний на растяжение различных видов образцов было установлено, что материал разрушается хрупко в условиях растягивающих напряжений для всех видов образцов. В связи с вышесказанным принципы разработки технологического процесса изготовления детали конструкционного назначения должны основываться на положении о том, что процесс изготовления детали должен осуществляться в условиях преобладающих сжимающих напряжений.

В качестве детали конструкционного назначения рассматривалась осесимметричная деталь типа стакана (рис. 4). Для оценки напряженно-деформированного состояния ММК в процессе изготовления детали выполнено математическое моделирование методом конечных элементов в пакете конечно-элементного анализа Deform. Для оценки адекватности результатов моделирования выполнено сравнение усилия деформирования в процессе испытания с усилием, полученным в результате моделирования. Отличие данных величин не превышает 9 %. Все испытания проведены на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801 при температуре 570 °С. Температура образцов контролировалась хромель-копелевой термопарой.

### 3. Моделирование процесса изготовления детали «стакан»

Детали типа стакана обычно изготавливают путем обратного выдавливания цилиндрической заготовки. В процессе моделирования для материала ММК принималась изотропная жесткопластическая модель. Материал деформирующего инструмента рассматривался как жесткое тело. Кривая упрочнения ММК определена в работе [35].

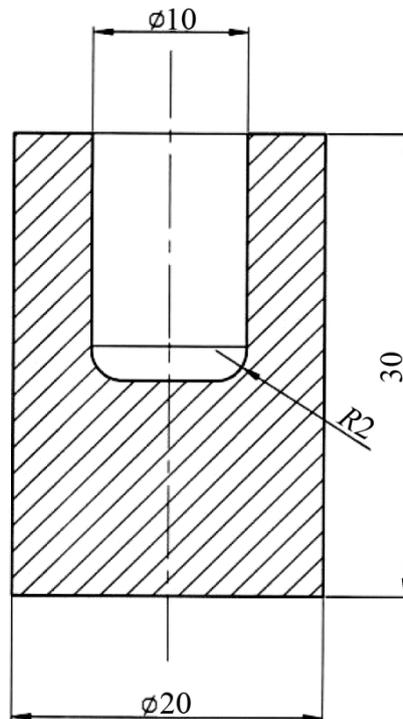


Рис. 4. Чертеж детали «стакан»

В качестве смазки между образцом и бойками использовали смазку на основе графита. Трение между деформирующим инструментом и ММК учитывали с помощью закона трения Зибеля. Величину коэффициента трения определяли методом осадки двух образцов [39]. По результатам испытаний коэффициент трения установлен равным 0,29. Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнены с использованием 2D-модели в предположении осесимметричного деформированного состояния. Так как деталь является симметричной, то моделировалась только половина ее сечения. На рис. 5 в левой части представлена конечно-элементная модель до деформации, в правой части – после деформации. Модель состоит из неподвижного основания 1, неподвижного цилиндрического контейнера 2 и подвижного пуансона 3, который внедряется в заготовку 4.

На рис. 6 приведено распределение эффективных деформаций  $\epsilon_{eff}$  и поврежденности  $\omega$  по сечению детали в конце процесса выдавливания. Величину поврежденности здесь рассчитывали по формуле (1) при помощи пользовательской подпрограммы `usr_dmg.f`, код которой написан авторами, после чего подпрограмма интегрирована в Deform. В связи с тем, что в процессе расчета приращения деформации на каждом шаге незначительные, было сделано допущение о постоянстве величины  $\Lambda_{fi}(k_i, \mu_{\sigma_i})$  на шаге расчета. При этом формула (1) для конечно-элементной реализации, в соответствии с принципом линейного суммирования поврежденности, использовалась в следующем виде:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \Lambda_i}{\Lambda_{fi}(k_i, \mu_{\sigma_i})}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество шагов расчета.

Из рис. 6 видно, что в процессе выдавливания материал претерпевает значительные пластические деформации, которые концентрируются под пуансоном и на контакте с его боковой поверхностью. При этом расчетная поврежденность на большей части выдавленного объема металла равна единице. Это говорит о том, что металл в этих местах подвергается разрушению. Данное явление объясняется тем, что с самого начала и на протяжении всего процесса выдавливания в очаге деформации существуют зоны с преобладающими растягивающими напряжениями ( $k > 0$ ), в которых материал разрушается хрупко даже при небольших пластических деформациях. На рис. 7 эти области обозначены красным цветом.

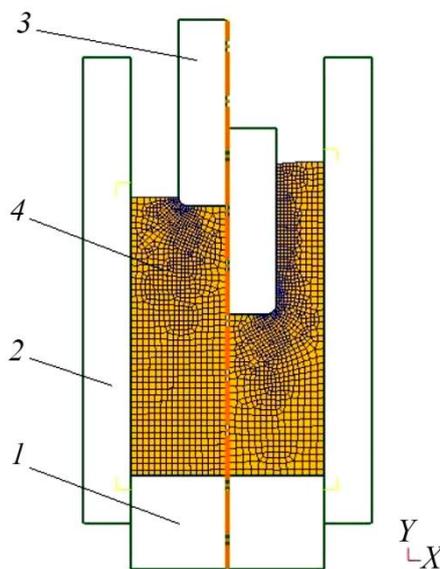


Рис. 5. Конечно-элементная модель выдавливания детали «стакан»

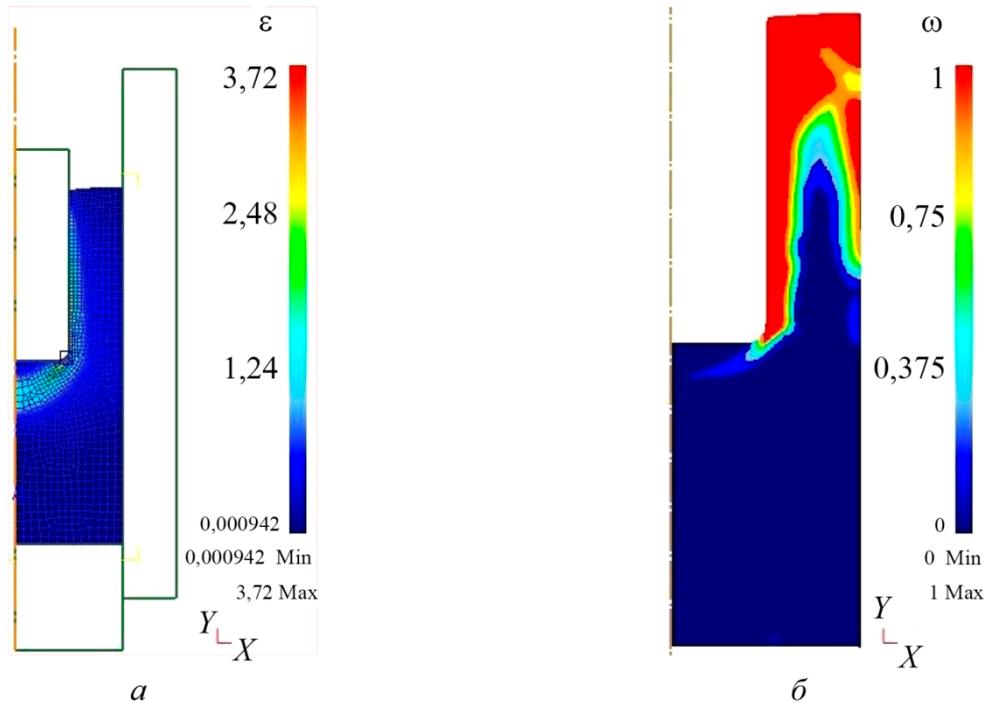


Рис. 6. Распределение эквивалентных пластических деформаций  $\varepsilon_{eff}$  (а) и поврежденности  $\omega$  (б) по сечению детали «стакан» в конце процесса выдавливания

Чтобы исключить возникновение областей с растягивающими напряжениями, предлагается осуществлять процесс выдавливания детали «стакан» с подпором свободной поверхности ММК. На рис. 8 в левой части представлена конечно-элементная модель до деформации, а в правой части – после деформации. Модель состоит из подвижного основания 1, к которому перед началом процесса выдавливания прикладывается «подпирающее» давление  $p$ , неподвижного цилиндрического контейнера 2 и подвижного пуансона 3, который внедряется в заготовку 4.

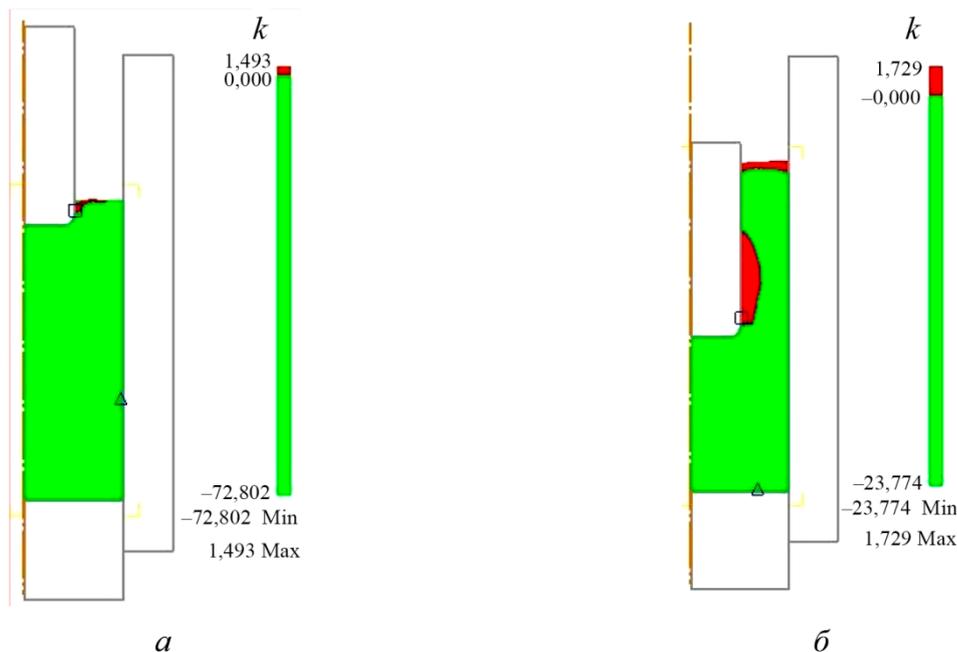


Рис. 7. Распределение значений коэффициента напряженного состояния  $k$  в начале (а) и в конце (б) процесса выдавливания

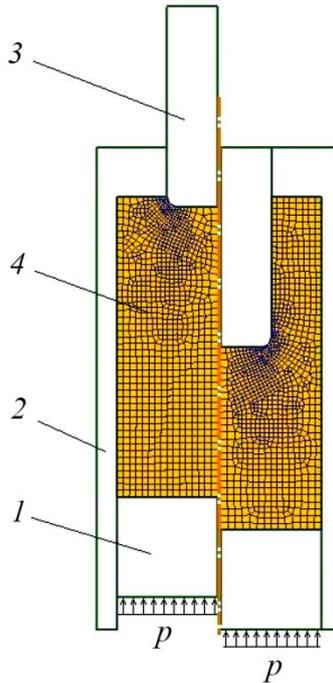


Рис. 8. Конечно-элементная модель выдавливания детали «стакан» с подпором свободной поверхности ММК

Согласно [25], в общем случае можно выделить два критических значения поврежденности:  $\omega^* = 0,2 \div 0,4$  и  $\omega^{**} = 0,6 \div 0,8$ . В случае если в конце деформации поврежденность находится в интервале  $0 < \omega < \omega^*$ , то при последующей термообработке наблюдается полное залечивание поврежденности. Если значение поврежденности в конце процесса деформирования находится в интервале  $\omega^* < \omega < \omega^{**}$ , то при последующем отжиге поврежденность залечивается не полностью. При этом значения  $\omega^*$  и  $\omega^{**}$  неодинаковы для разных материалов. В связи с вышесказанным, чтобы полностью исключить возможность разрушения детали «стакан» в процессе выдавливания, было подобрано такое значение давления  $p = 79,5$  МПа, чтобы значение поврежденности в конце процесса выдавливания не превышало 0,15. На рис. 9 приведено распределение поврежденности  $\omega$  по сечению детали «стакан» в конце процесса выдавливания с подпором.

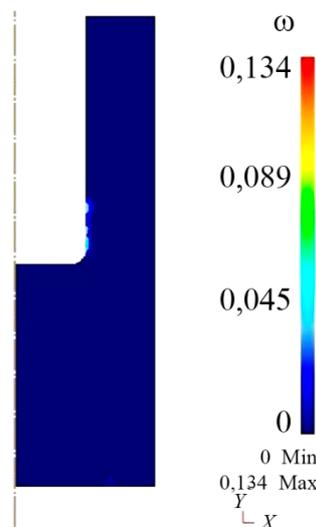


Рис. 9. Распределение поврежденности  $\omega$  по сечению детали «стакан» в конце процесса выдавливания с подпором

#### 4. Экспериментальные исследования процесса изготовления детали «стакан»

Для экспериментальной проверки результатов моделирования спроектирован и изготовлен лабораторный штамп для выдавливания детали «стакан» (рис. 10).

Перед испытанием штамп помещается в нагревательную печь 1 испытательной машины. Температура заготовки контролируется хромель-копелевой термопарой 2. Штамп состоит из двухслойного контейнера 3, внутрь которого устанавливается заготовка из ММК 4. Сверху на заготовку устанавливается боек 5, который упирается в верхнюю неподвижную штангу испытательной машины 6. Особенностью конструкции штампа является то, что за счет изменения усилия подпора он позволяет в широком диапазоне варьировать жесткость напряженного состояния (значения коэффициента  $k$ ) в процессе изготовления детали. Для этого в конструкции штампа предусмотрена опора 7, которая устанавливается на основание 8 нижнего подвижного захвата испытательной машины. Перед началом испытания к основанию нижнего захвата 8 прикладывается необходимое сжимающее усилие, которое передается на заготовку через опору 7, втулку 9 и кольцо 10. В нашем случае это усилие равно 2,5 кН, при этом на контакте между бойком 5 и заготовкой 4 возникает давление  $p = 79,5$  МПа. В заготовке возникает напряженное состояние всестороннего сжатия (мягкое напряженное состояние). Процесс выдавливания осуществляется за счет перемещения вверх гидроцилиндра 11 нижнего захвата испытательной машины, который, в свою очередь, перемещает фланец 12, шпильку 13 и пуансон 14 штампа. При этом поддерживается первоначальное сжимающее усилие, приложенное к основанию нижнего захвата 8, который в процессе выдавливания перемещается вниз на некоторое расстояние.

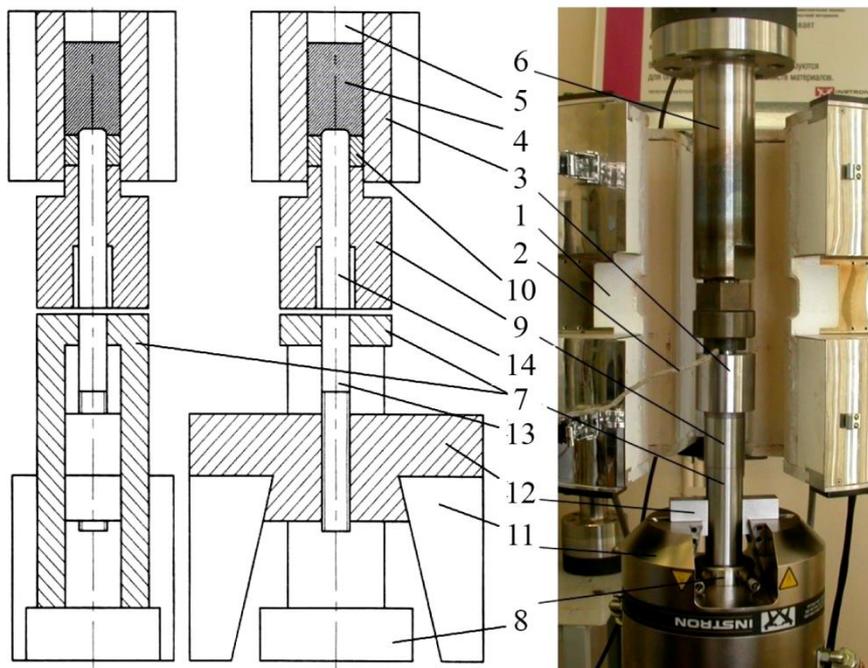


Рис. 10. Лабораторный штамп для изготовления детали «стакан»

В результате выдавливания получено готовое изделие «стакан» (рис. 11 а). На изделии трещин не обнаружено. Выполнено также выдавливание детали «стакан» без подпора. При этом на внутренней и внешней боковой поверхности изделия образовались трещины (рис. 11 б). Таким образом, экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами расчета поврежденности методом конечных элементов.



Рис. 11. Фотографии детали «стакан»: выдавливание с подпором (а); выдавливание без подпора (б) (деталь разрезана)

Выполненные ранее исследования показали, что при нагреве исследованного ММК при температуре 534 °С происходит эвтектическое превращение  $\alpha + S(\text{Al}_2\text{CuMg}) \rightarrow L$ , сопровождающееся эндотермическим эффектом. Это приводит к локальному появлению жидкой фазы на межфазной границе между  $\alpha$ -твердым раствором на основе алюминия и игольчатыми частицами S-фазы  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Чаще всего появление продуктов эвтектического превращения характерного скелетообразного строения наблюдали в образцах ММК, подвергнутых термической обработке без действия внешней нагрузки, на участках скопления частиц карбида кремния [40], создающих дополнительные межфазные границы, в которые может затекать образовавшийся расплав алюминия. Этот эффект можно использовать для уменьшения внутренней микропористости ММК на участках скопления частиц наполнителя, которая неизбежно возникает после спекания заготовок.

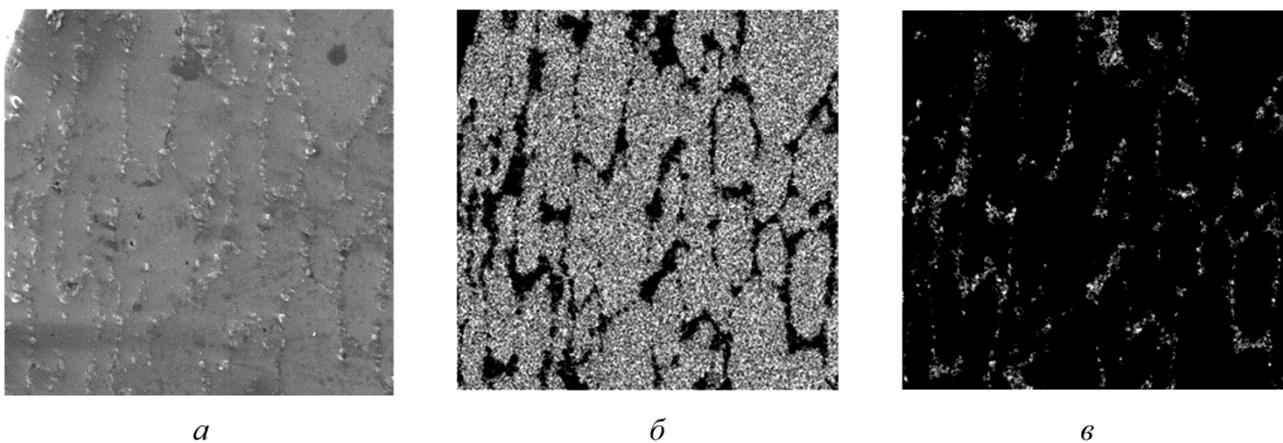


Рис. 12. Микроструктура (а) и распределение алюминия (б) и кремния (в) в зоне максимальных значений эквивалентной пластической деформации

При анализе структурного состояния различных зон полученного в результате выдавливания изделия «стакан» на продольном сечении обнаружено, что изменения структуры определяются степенью деформации материала зоны. Так, в зоне возможных максимальных значений эквивалентной пластической деформации (рис. 6 а) наблюдали вытягивание ячеистой структуры композита вдоль направления деформации (рис. 12), тогда как в зонах с минимальными деформациями структура сохраняется практически в исход-

ном состоянии (правая часть структуры на рис. 13 *а*). На всех участках поверхности исследованного продольного реза стакана произошло уменьшение внутренней микропористости за счет затекания под давлением во время выдавливания образовавшегося в результате эвтектического превращения расплава алюминия между частицами карбида кремния. В максимальной степени этот эффект проявился в зонах с максимальными расчетными значениями эквивалентной пластической деформации. Ячеистая структура композита разбивается (левая часть структуры на рис. 13 *а*). В результате каждая частица наполнителя SiC оказалась окружена алюминиевой матрицей (рис. 13 *б*). Единичные микропоры наблюдали в зонах минимальных деформаций.

Разбиение ячеистой структуры ММК улучшает последующие эксплуатационные свойства детали. Например, было показано [41], что коррозионная стойкость таких ММК определяется характером распределения частиц наполнителя по объему композита, поскольку коррозионные повреждения происходят за счет окисления матрицы по интерфейсу «матрица – наполнитель», что в дальнейшем приводит к образованию питтингов и отслоений. В случае равномерного распределения частиц наполнителя коррозионному повреждению препятствует отсутствие протяженных межфазных границ, тогда как ячеистая структура композита обеспечивает наличие протяженных извилистых границ между частицами SiC и матрицей.

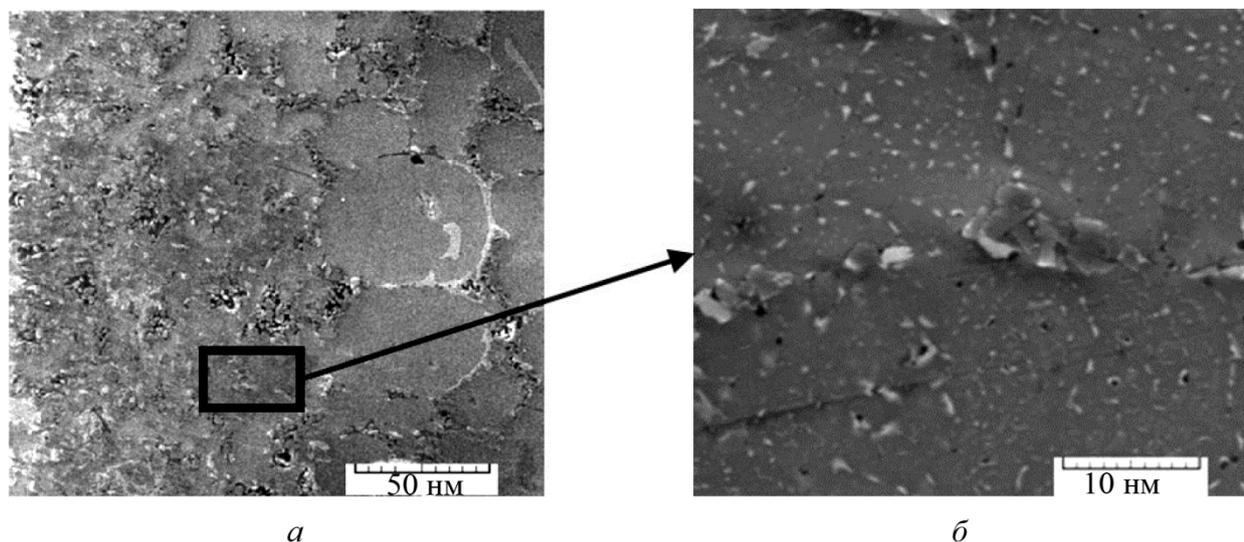


Рис. 13. Микроструктура ММК в зоне максимальных деформаций, возникающих при выдавливании детали «стакан»: в левой части ячеистая структура разбита, а в правой сохранилась (*а*); все частицы наполнителя SiC окружены алюминиевой матрицей (*б*)

## 5. Заключение

Методом конечных элементов выполнено моделирование процесса выдавливания с подпором детали «стакан». Особенностью процесса является то, что выдавливание осуществляется в условиях мягкого напряженного состояния (в состоянии всестороннего сжатия). Определены параметры процесса, необходимые для получения качественной детали, при этом рассчитанная поврежденность не превышает значения 0,15. Спроектирован лабораторный штамп для выдавливания с подпором детали «стакан» при температуре 570 °С. Усилие подпора регулируется, что позволяет выполнять процесс выдавливания в условиях требуемой величины сжимающих напряжений. Осуществлен процесс выдавливания, и получено бездефектное изделие. Выполнено выдавливание детали «стакан» без подпора. Установлено, что при таких параметрах процесса получить качественное изделие не удастся. Показано, что локальное появление расплава алюминия вблизи участков скопления частиц наполнителя SiC в результате эвтектического превращения  $\alpha + S(\text{Al}_2\text{CuMg}) \rightarrow L$  при нагреве выше темпе-

ратуры 534 °С способствует разбиению ячеистой структуры при внешнем нагружении, равномерному перераспределению частиц SiC в зонах максимальных деформаций и залечиванию микропор в местах исходного скопления частиц SiC.

### Благодарность

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМАШ УрО РАН № 124020700063-3. Испытания проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. При проведении моделирования использовано программное обеспечение лаборатории структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.*

### Литература

1. 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.
2. Huang S.-J., Ali A. N. Effects of heat treatment on the microstructure and microplastic deformation behavior of SiC particles reinforced AZ61 magnesium metal matrix composite // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 711. – P. 670–682. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.020.
3. Study of mechanical characteristics of advanced aluminum–matrix composites reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Yu. A. Kurganova, A. G. Kolmakov, I. Chen, S. V. Kurganov // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2022. – Vol. 13. – P. 157–160. – DOI: 10.1134/S2075113322010245.
4. Structure, physical and mechanical properties of aluminum matrix composites reinforced with carbide particles / S. V. Gladkovskii, S. V. Petrova, T. S. Cherkasova, A. M. Patselov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2023. – Vol. 65. – P. 54–61. – DOI: 10.1007/s11041-023-00891-5.
5. Corrosion polarization behavior of Al–SiO<sub>2</sub> composites in 1M and related microstructural analysis / N. Munasir, T. Triwikantoro, M. Zainuri, R. Bäbler, D. Darminto // *International Journal of Engineering*. – 2019. – Vol. 32 (7). – P. 982–990. – DOI: 10.5829/ije.2019.32.07a.11.
6. Multi-layer graphene reinforced aluminum – manufacturing of high strength composite by friction stir alloying / S. Dixit, A. Mahata, D. R. Mahapatra, S. V. Kailas, K. Chattopadhyay // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 136. – P. 63–71. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.028.
7. 3D printing graphene-aluminum nanocomposites / Z. Hu, F. Chen, J. Xu, Q. Nian, D. Lin, Ch. 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.
8. Ogawa F., Masuda C. Fabrication and the mechanical and physical properties of nanocarbon-reinforced light metal matrix composites: a review and future directions // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – Vol. 820. – P. 141542. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.141542.
9. Ma J., Kang J., Huang T. Novel application of ultrasonic cavitation for fabrication of TiN/Al composites // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 661. – P. 176–181. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.11.159.
10. Diamond/aluminum composites processed by vacuum hot pressing: microstructure characteristics and thermal properties / Z. Tan, Z. Li, G. Fan, X. Kai, G. Ji, L. Zhang, D. Zhang // *Diamond and Related Materials*. – 2013. – Vol. 31. – P. 1–5. – DOI: 10.1016/j.diamond.2012.10.008.
11. Preparation of 6061 Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC's by stir casting 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.
12. Mechanical and thermal properties of aluminum matrix composites reinforced by in situ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles fabricated via direct chemical reaction in molten salts / L. A. Yolshina, A. G. Kвашnichen, D. I. Vichuzhanin, E. O. Smirnova // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (17). – P. 8907. – DOI: 10.3390/app12178907.

13. Kumar D., Angra S., Singh S. Mechanical properties and wear behavior of stir cast aluminum metal matrix composite: a review // *International Journal of Engineering*. – 2022. – Vol. 35 (4). – P. 794–801. – DOI: 10.5829/ije.2022.35.04a.19.
14. Najimi A. A., Shahverdi H. R. Microstructure and mechanical characterization of Al6061-CNT nanocomposites fabricated by spark plasma sintering // *Materials Characterization*. – 2017. – Vol. 133. – P. 44–53. – DOI: 10.1016/j.matchar.2017.09.028.
15. Equilibrium composition variation of Q-phase precipitates in aluminum alloys / 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.
16. Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composite / X. Gao, H. Yue, E. Guo, H. Zhang, X. Lin, L. Yao, B. Wang // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 94. – P. 54–60. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.034.
17. Synthesis and characterization of pure and graphene (Gr)-doped organic/polymer nanocomposites to investigate the electrical and photoconductivity properties of Au/n-GaAs structures / O. Çiçek, H. Uslu Tecimer, S. O. Tan, H. Tecimer, İ. Orak, Ş. Altındal // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 14–23. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.012.
18. Synthesis and characterization of ZnO NWAs/graphene composites for enhanced optical and field emission performances / J. Liu, Z. Zhang, Y. Lv, J. Yan, J. Yun, W. Zhao, L. Kou, C. Zhai // *Composites Part B: Engineering*. – 2016. – Vol. 99. – P. 336–372. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.036.
19. Bozkurt Y., Boumerzoug Z. Tool material effect on the friction stir butt welding of AA2124-T4 alloy matrix MMC // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 7 (1). – P. 29–38. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.04.001.
20. Zhang X., Chen Y., Hu J. Recent advances in the development of aerospace materials // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2018. – Vol. 97. – P. 22–34. – DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.01.001.
21. Design and materials development of automotive crash box: a review / N. S. B. Yusof, S. M. Sapuan, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, M. A. Maleque // *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. – 2017. – Vol. 29 (3). – P. 129–144. – DOI: 10.1016/j.ctmat.2017.09.003.
22. Hamza M., Mondal S. Effect of reinforcement with ceramic microparticles on structure and properties of composites with an aluminum matrix // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2022. – Vol. 64 (3). – P. 163–166. – DOI: 10.1007/s11041-022-00778-x.
23. Adetunla A., Akinlabi E. Fabrication of aluminum matrix composites for automotive industry via multipass friction stir processing technique // *International Journal of Automotive Technology*. – 2019. – Vol. 20 (6). – P. 1079–1088. – DOI: 10.1007/s12239-019-0101-0.
24. Cao T. S. Models for ductile damage and fracture prediction in cold bulk metal forming processes: a review // *International Journal of Material Forming*. – 2015. – Vol. 10 (2). – P. 1–33. – DOI: 10.1007/s12289-015-1262-7.
25. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.
26. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // *International Journal of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24 (6). – P. 1071–1096. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2007.09.004.
27. Xue L. Stress based fracture envelope for damage plastic solids // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2009. – Vol. 76 (3). – P. 419–438. – DOI: 10.1016/j.engfractmech.2008.11.010.
28. Khan A. S., Liu H. A new approach for ductile fracture prediction on Al 2024–T351 alloy // *International Journal of Plasticity*. – 2012. – Vol. 35. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2012.01.003.
29. Malcher L., Mamiya E. N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 232–261. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.
30. Kolmogorov V. L., Shishmintsev V. F., Matveev G. A. Ultimate deformability of metals tensile-tested to failure under hydrostatic pressure // *Physics of Metals and Metallography*. –

31. 1967. – Vol. 23 (1). – P. 170–171.
32. Rahmanifard R., Akhlaghi F. Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356SiC<sub>p</sub> composites // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vols. 187–188. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.077.
33. Jia Y., Bai Y. Ductile fracture prediction for metal sheets using all-strain-based anisotropic eMMC model // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – Vols. 115–116. – P. 516–531. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.07.022.
34. Vichuzhanin D. I., Khotinov V. A., Smirnov S. V. The effect of the stress state on the ultimate plasticity of steel X80 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 1. – P. 73–89. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.073-089. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1\\_21.html](http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_21.html)
35. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е. И. Семенова. – 2-е изд., перераб. и доп.– М. : Машиностроение, 2010. – 720 с.
36. A fracture locus for a 10 volume-percent B95/SiC metal matrix composite at the near-solidus temperature / D. I. Vichuzhanin, S. V. Smirnov, A. V. Nesterenko, A. S. Igumnov // *Letters on Materials*. – 2018. – Vol. 8 (1). – P. 88–93. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-1-88-93.
37. Structure and thermophysical properties of aluminum-matrix composites / N. B. Pugacheva, N. S. Michurov, E. I. Senaeva, T. M. Bykova // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117 (11). – P. 1144–1151. – DOI: 10.1134/S0031918X16110119.
38. A comparative study of cavitation characteristics in composite and 7475 aluminum alloy / H. Iwasaki, M. Takeuchi, T. Mori, M. Mabuchi, K. Higashi // *Scripta Metallurgica et Materialia*. – 1994. – Vol. 31 (3). – P. 255–260. – DOI: 10.1016/0956-716x(94)90279.
39. Mabuchi M., Higashi K., Langdon T. G. An investigation of the role of a liquid phase in Al Cu Mg metal matrix composites exhibiting high strain rate superplasticity // *Acta Metallurgica et Materialia*. – 1994. – Vol. 42 (5). – P. 1739–1745. – DOI: 10.1016/0956-7151(94)90384-0.
40. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
41. Effect of heat treatment on the structure and phase composition of aluminum matrix composites containing silicon carbide / N. B. Pugacheva, I. Yu. Malygina, N. S. Michurov, E. I. Senaeva, N. P. Antenorova // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 6. – P. 28–36. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.028-036. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6\\_161.html](http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6_161.html)
42. Pugacheva N. B., Senaeva E. I. Influence of Al/SiC composite structure on corrosion damages nature // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1785. – P. 040049. – DOI: 10.1063/1.4967106.