



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-22-29>

Научная статья

Research article



Влияние деформационно-термической обработки на формирование структуры дисперсно-армированного металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава

А. Н. Няфкин , Д. В. Косолапов, Е. И. Курбаткина

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Россия, 105275, г. Москва, пр-т Буденного, 25А

 andrey.viam@mail.ru

Аннотация. Исследованы аспекты формирования структуры дисперсно-армированного металлического композиционного материала (МКМ) на основе алюминиевого сплава в зависимости от различных режимов деформационно-термической обработки. Замена традиционных конструкционных материалов на МКМ позволит производителям перейти на качественно более высокий технический уровень. Подбор состава, изменение соотношения исходных компонентов и применение различных методов изготовления МКМ позволяют направленно регулировать прочность, жесткость, диапазон рабочих температур и другие физико-механические характеристики материала. Существуют две наиболее распространенные технологии получения дисперсно-армированных МКМ на основе алюминиевых сплавов – жидкофазная и порошковая. Первая предполагает размешивание армирующего компонента в расплаве матричного сплава с последующей кристаллизацией, которая обеспечивает распределение и фиксацию армирующих частиц в объеме матрицы, а вторая представляет собой совместную обработку порошков исходных компонентов в высокоэнергетических мельницах с последующим объединением полученных композиционных гранул методами обработки давлением. Основной целью деформационно-термической обработки является получение заготовок с формой, максимально приближенной к геометрии конечных изделий, а также изменение структуры деформируемого материала, приводящее к повышению уровня прочностных свойств. В работе с использованием порошковой технологии были изготовлены образцы монолитного композиционного материала, исследована их структура и проведены испытания с целью определения плотности и прочностных характеристик МКМ при комнатной температуре. В результате получены дисперсно-армированные МКМ на основе алюминиевого сплава с однородной структурой, плотностью более 99,0 % от теоретической и повышенными механическими свойствами: $\sigma_B = 300 \div 305$ МПа и $E = 87 \div 95$ ГПа.

Ключевые слова: металлический композиционный материал (МКМ), алюминиевый сплав, деформационно-термическая обработка, прессование, структура, прочностные характеристики

Для цитирования: Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Курбаткина Е.И. Влияние деформационно-термической обработки на формирование структуры дисперсно-армированного металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2023;17(3):22–29.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-22-29>

Influence of thermomechanical treatment on the formation of the structure in dispersed-reinforced aluminum alloy-based metal composite materials

A. N. Nyafkin , D. V. Kosolapov, E. I. Kurbatkina

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center “Kurchatov Institute”
25A Budyonny Pros., Moscow 105275, Russia

✉ andrey.viam@mail.ru

Abstract. The study explored various facets of the structure of dispersed-reinforced aluminum alloy-based metal composite material (MCM) under different modes of thermomechanical treatment. Replacing traditional structural materials with MCM provides manufacturers with an opportunity to achieve higher levels of engineering superiority. The ability to choose composition, modify primary component ratios, and employ a range of MCM manufacturing techniques allows for precise tuning of the material's strength, rigidity, temperature range, and other physical and mechanical properties. Two prevalent technologies for crafting dispersed-reinforced aluminum alloy-based MCM exist: liquid-phase and powder technologies. Liquid-phase methodology entails merging the reinforcing component into the binder alloy's melt, followed by crystallization. This process guarantees the dispersion and fixation of reinforcing particles within the binder volume. In contrast, powder technology involves simultaneous processing of primary component powders in high-energy mills, with subsequent amalgamation of the resultant composite granules via pressure molding. The chief aim of thermomechanical treatment lies in yielding blanks that closely mimic the final product's geometry and reshaping the deformable material's structure to heighten its strength properties. Powder technology was employed to fabricate monolithic composite material samples. Their structures were analyzed, accompanied by tests to ascertain density and strength parameters of the MCM at room temperature. Consequently, dispersed-reinforced aluminum alloy-based MCM possessing a uniform structure, density exceeding 99.0 % of the theoretical value, and elevated mechanical attributes: $\sigma_u = 300 \div 305$ MPa and $E = 87 \div 95$ GPa, were successfully produced.

Keywords: metal composite material (MCM), aluminum alloy, thermomechanical treatment, pressing, structure, strength properties

For citation: Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Kurbatkina E.I. Influence of thermomechanical treatment on the formation of the structure in dispersed-reinforced aluminum alloy-based metal composite materials. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(3):22–29. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-22-29>

Введение

В настоящее время при создании перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники для силового набора требуются материалы с низкой плотностью и повышенными прочностными характеристиками. Такие материалы за счет совокупности свойств могут также найти применение в сверхлегких высоконагруженных конструкциях в различных отраслях промышленности [1; 2].

Кроме того, важнейшей задачей для современных разработчиков материалов является развитие энерго-сберегающих технологий производства, обеспечивающих снижение стоимости продукции, увеличение коэффициента использования материала в готовых изделиях и повышение конкурентоспособности производимой продукции [3–5].

Перспективным направлением решения обозначенных проблем является применение дисперсно-армированных металлических композиционных материалов (МКМ) на основе алюминиевых сплавов, а также совершенствование технологий получения деталей из них с целью обеспечения требуемого уровня физико-механических и эксплуатационных характеристик изготавливаемых из них изделий [5–10].

Металлические композиционные материалы, как правило, состоят из пластичного металлического сплава, упрочненного твердым керамическим армирующим материалом в виде частиц разных размеров и форм [11–13].

Получение МКМ по порошковой технологии представляет собой совместную обработку порошков исходных компонентов в высокоэнергетических мельницах с последующим объединением полученных композиционных гранул методами обработки давлением.

Основной целью деформационно-термической обработки является получение заготовок с формой, максимально приближенной к геометрии конечных изделий, а также изменение структуры деформируемого материала, приводящее к повышению уровня прочностных свойств. Процесс деформационной обработки основан на способности пластичных материалов безвозвратно и без разрушения изменять свою форму при условии приложения внешней нагрузки [14].

Структура дисперсно-армированных МКМ состоит из металлической матрицы, в которой равномерно распределены мелкодисперсные частицы упрочняющей фазы. Металлическая матрица в МКМ обеспечивает пластичность, а керамическая фаза улучшает показатели прочности, жесткости, термо- и износостойкости. Механизм упрочнения МКМ обусловлен созданием частицами упрочняющей фазы барьеров для перемещения дислокаций аналогично тому, как этот механизм проявляется в сплавах с дисперсионным твердением. Использование алюминиевых сплавов в качестве металлической матрицы в МКМ является предпочтительным за счет их преимуществ перед другими сплавами, включая высокую технологичность, эксплуатационные характеристики и низкую стоимость [15; 16].

Целью данной работы являлось исследование влияния деформационно-термической обработки на структуру МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si, упрочненного 20 об. % SiC, изготовленного методом порошковой технологии.

Методика проведения исследований

Исходным материалом для изготовления дисперсно-армированного МКМ на основе алюми-

евого сплава были композиционные гранулы, полученные методом механического легирования в лабораторной планетарной шаровой мельнице модели РМ 100 («СМ Retsch», Англия).

В качестве матрицы использовали алюминиевый сплав марки АД31, а упрочняющей фазой были частицы карбида кремния марки 63С (F800).

Композиционные гранулы подвергали компактированию в глухой обойме для получения заготовок в виде цилиндрических брикетов. Последние нагревали до температуры горячей деформации и прессовали на гидравлическом прессе к03.032 (Россия).

Требуемое усилие прессования МКМ через конусную матрицу методом прямого прессования рассчитывали по формуле

$$P = \sigma_{0,2} \left[\left(\frac{1}{2 \sin \alpha} \right) + \left(\frac{2}{1 + \cos \alpha} \right) \ln \frac{F}{f} + \frac{2L}{D} + \frac{2l}{d} \right] F,$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести МКМ при температуре прессования, МПа; α – угол наклона образующей матрицы, град; F и f – площади проекций брикета и прессуемого прутка на плоскость, перпендикулярную к направлению движения пуансона прессы соответственно, мм²; L – высота брикета, мм; l – высота рабочего пояса матрицы, мм.

Исследование структуры прессованных образцов МКМ проводили на оптическом электронном микроскопе ВХ51 («Olympus», Япония).

С помощью метода гидростатического взвешивания измеряли плотность образцов МКМ.

Пористость материала рассчитывали по формуле

$$n = \left(1 - \frac{\rho_{\text{факт}}}{\rho_{\text{расч}}} \right) \cdot 100 \%,$$

где $\rho_{\text{факт}}$ и $\rho_{\text{расч}}$ – измеренное и расчетное значения плотности МКМ, г/см³.

Прочностные характеристики МКМ определяли при одноосном растяжении по ГОСТ 1497-84 на испытательной машине производства «Zwick Roell Group», Германия.

Результаты исследований и их обсуждение

Морфология исходного материала – механически легированных композиционных гранул – показана на рис. 1. В большинстве своем они имеют сферическую форму с бугристой поверхностью. Фракционный состав основного объема гранул находится в диапазоне от 600 до 1000 мкм.

Из композиционных гранул методом прессования в глухой обойме на гидравлическом прессе получены

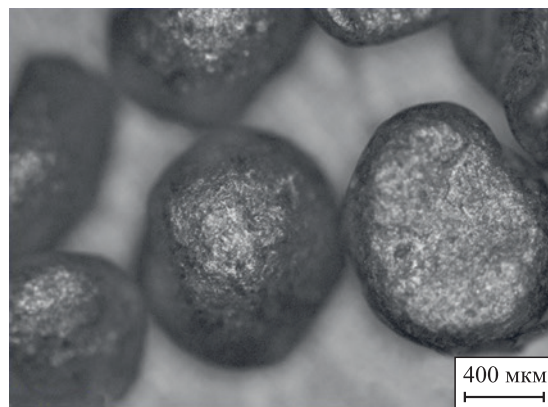


Рис. 1. Структура механически легированных гранул МКМ на основе алюминиевого сплава

Fig. 1. Structure of mechanically alloyed aluminum alloy-based MCM granules

цилиндрические брикеты для последующего проведения процесса горячей прямого прессования через конусную матрицу.

Уплотнение гранул при прессовании в глухой обойме протекает в несколько стадий. На начальном этапе процесса уплотнения под воздействием прессующего инструмента происходят взаимные перемещения гранул относительно друг друга при одновременном уменьшении свободного пространства между ними, что в дальнейшем замедляет их перемещения из-за нарастающего трения, возникающего на поверхностях контакта между гранулами. Вторая стадия процесса характеризуется ростом контактных напряжений и началом деформационных процессов. В момент, когда уровень напряжений достигает предела текучести композиционного материала, пластическая деформация охватывает весь объем брикета, и наблюдается интенсивное изменение формы и состояния контактных поверхностей гранул, что в результате приводит к образованию уплотненной структуры композиционного материала с пористостью на уровне 5–10 %.

В работах [17–19] проведены исследования влияния удельного давления прессования на плотность брикетов, получаемых из порошковых материалов. Показано, что при достижении порога плотности в 90–95 % от теоретической уплотнение материала замедляется, и при дальнейшем увеличении усилия прессования повышения плотности не наблюдается.

График зависимости плотности от усилия прессования, полученный в ходе экспериментов, проведенных в рамках данной работы, представлен на рис. 2, на котором зона 1 относится к начальной стадии процесса прессования в глухой обойме, а зона 2 – ко второй стадии.

Эффект замедления уплотнения прессуемого материала объясняется спецификой деформацион-

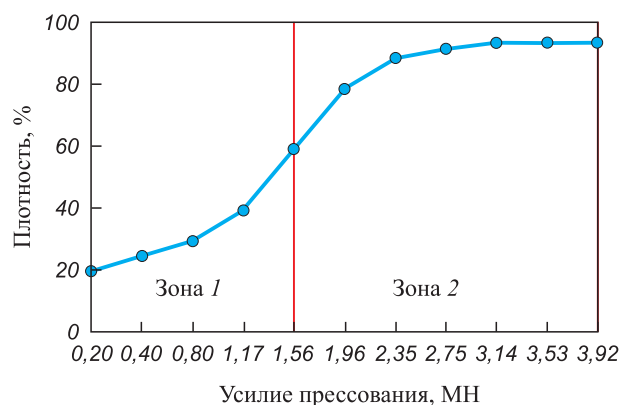


Рис. 2. Зависимость плотности МКМ от усилия прессования

Fig. 2. Dependence of MCM density on the pressing force

ной обработки в закрытом объеме глухой обоймы, а именно ограниченным уровнем перераспределения объема прессуемого МКМ в замкнутом пространстве обоймы, а также малой степенью деформации при напряженном состоянии материала за счет процесса всестороннего сжатия.

Поля распределения накопленной деформации, полученные в результате моделирования процесса прессования в глухой обойме, продемонстрированы на рис. 3. Центральная часть брикета имеет наибольшую проработку структуры, в то время как верхняя и нижняя его части, которые соприкасались с пуансоном и дном обоймы, показали меньший уровень накопленной деформации в диапазоне от 0,1 до 0,3. Силы трения, возникающие на контактной поверхности пуансона и дна обоймы, тормозят перемещение прессуемого материала в замкнутом пространстве обоймы, вследствие чего образуется неравномерная

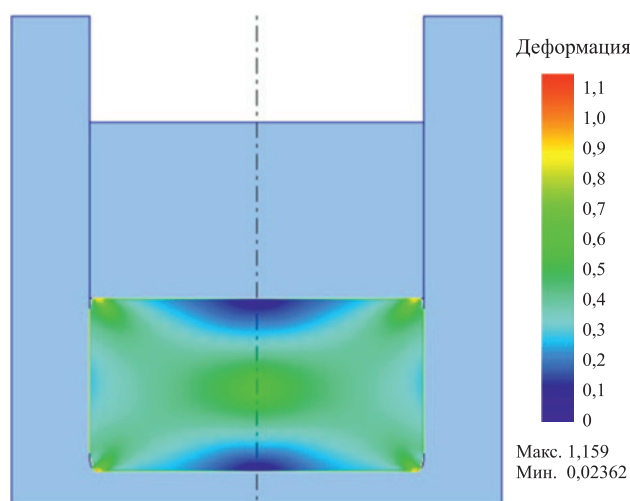


Рис. 3. Результаты моделирования процесса прессования образца МКМ в глухой матрице

Fig. 3. Results of modeling the MCM sample pressing process in a blind die

проработка в объеме получаемого брикета [20–22].

На фотографиях структуры прессованного в глухой обойме МКМ прослеживаются границы исходных гранул (рис. 4). При этом полученная структура является отражением происходивших с материалом изменений в процессе деформационной обработки. Так, например, в периферийной части брикета наблюдается большая пористость по сравнению с центром.

Наличие пористости в прессованном материале оказывает негативное влияние на уровень прочностных свойств МКМ, а также накладывает ограничение на его применение в качестве конструкционного для изготовления деталей. Проработка и улучшение структуры материала с целью обеспечения высоких эксплуатационных характеристик возможны посредством вторичной деформационно-термической обработки с более высокими степенями деформации.

В данной работе проводили процесс горячего прямого прессования через конусную матрицу и исследовали влияние коэффициента вытяжки на структуру и свойства полученного композиционного материала.

Горячее прямое прессование представляет собой деформацию брикета при непрерывном поступлении

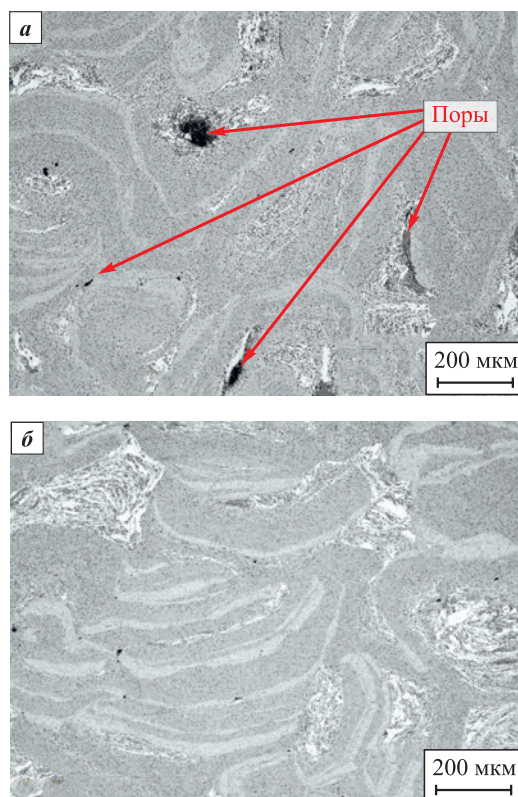


Рис. 4. Структура прессованного в закрытой обойме образца МКМ
а и б – периферийная и центральная части брикета соответственно

Fig. 4. Structure of the MCM sample pressed in a closed blind die
а and б – peripheral and central parts of the briquette, respectively

нагретого прессуемого материала в очаг деформации, при этом процесс сопровождается изменением не только формы прессуемого материала, но и его свойств. Внешними силами, действующими на МКМ в ходе прямого прессования, являются давление пуансона, нормальные давления на боковых поверхностях контейнера, матрицы и калибрующего пояска, а также силы трения, возникающие на контактных поверхностях МКМ с инструментом. В результате воздействия этих сил происходит перестройка структуры материала, что связано с увеличением плотности и прочностных характеристик МКМ.

Определены параметры технологического процесса, значительно влияющие на структуру получаемого в процессе прессования материала: скорость деформирования (скорость движения пуансона пресса), скорость истечения материала из матрицы, коэффициент вытяжки. Скорость деформирования – линейная скорость движения рабочего инструмента пресса в направлении основной деформации – зависит от технических возможностей оборудования и в данной работе была постоянной 10 мм/с. Скорость истечения материала из матрицы и коэффициент вытяжки являются взаимозависимыми параметрами: последний определяет степень деформации прессуемого материала, и его увеличение приводит к пропорциональному повышению скорости истечения.

Известно, что дисперсно-армированные МКМ за счет наличия в составе армирующего компонента в виде мелкодисперсных керамических частиц относятся к сложнодеформируемым материалам, отличающимся высоким сопротивлением деформации. Поэтому для обеспечения равномерности истечения МКМ в процессе деформации, а также снижения требуемого усилия прессования была выбрана коническая форма матрицы.

В ходе данной работы было проведено исследование процессов прямого горячего прессования с коэффициентами вытяжки $\mu = 10\div30$.

Установлено, что максимальная плотность (более 99,0 % от теоретической) получена на образцах МКМ с $\mu \geq 20$. На их поверхности в области, близкой к пресс-остатку, наблюдалось наличие поверхностных рисок (задилов). Такой вид дефектов обусловлен постепенным истончением слоя смазки, нанесенного на инструмент в процессе горячего прямого прессования, и нарастанием контактных сил трения в этой области, вследствие чего периферийные слои прессуемого прутка начинают отставать от центральных. Нивелирование данного эффекта возможно за счет применения многокомпонентных смазок либо при помощи нанесения высокотвердого покрытия на рабочую поверхность инструмента. Моделирование процесса горячего прямого прессования с помощью программного пакета Qform 3D подтверждает полу-

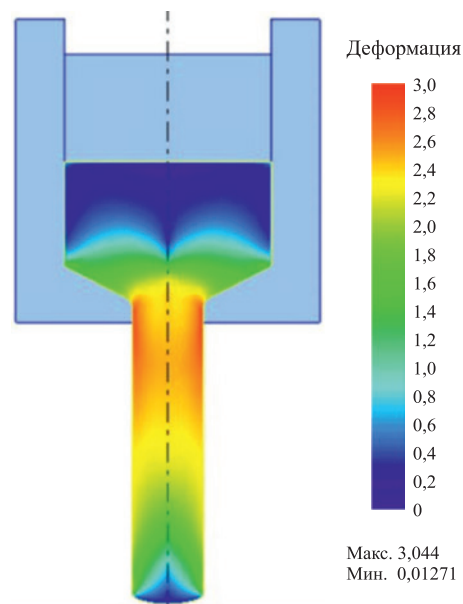


Рис. 5. Результаты моделирования процесса прямого прессования МКМ в конической матрице

Fig. 5. Results of modeling the process of MCM direct pressing in a cone die

ченные в ходе экспериментов результаты. Уровень накопленной деформации в периферийных слоях прутка превышает центральный в 1,25 раза (рис. 5).

Структура МКМ вдоль направления прессования имеет полосчатый вид, связанный с особенностями напряженного состояния материала в процессе деформирования, а именно наличием растягивающих напряжений, направленных вдоль оси деформации. Границы гранул, которые были зафиксированы в структуре исходного брикета, вытягиваются вдоль оси прессуемого прутка и формируют структуру, представленную на рис. 6. Причем при коэффициенте вытяжки $\mu \geq 10$ структура прессованного МКМ выглядит неоднородно (см. рис. 6, а) ввиду недостаточных сжимающих напряжений, возникающих в очаге деформации, в то время как при $\mu \geq 20$ и ≥ 30 (см. рис. 6, б, в) она отличается лучшей однородностью.

Из полученных прутков для проведения испытаний на растяжение были изготовлены образцы, вид которых представлен на рис. 7.

Исследование механических свойств образцов прессованного дисперсно-армированного МКМ проводили при температуре 20 °С. В таблице представлены полученные результаты оценки предела прочности (σ_b), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и модуля упругости (E).

Образцы из МКМ, полученные с коэффициентом вытяжки ≥ 20 , обладая однородной структурой, показали наилучшие прочностные характеристики по сравнению с образцами с $\mu \geq 10$, отличающимися

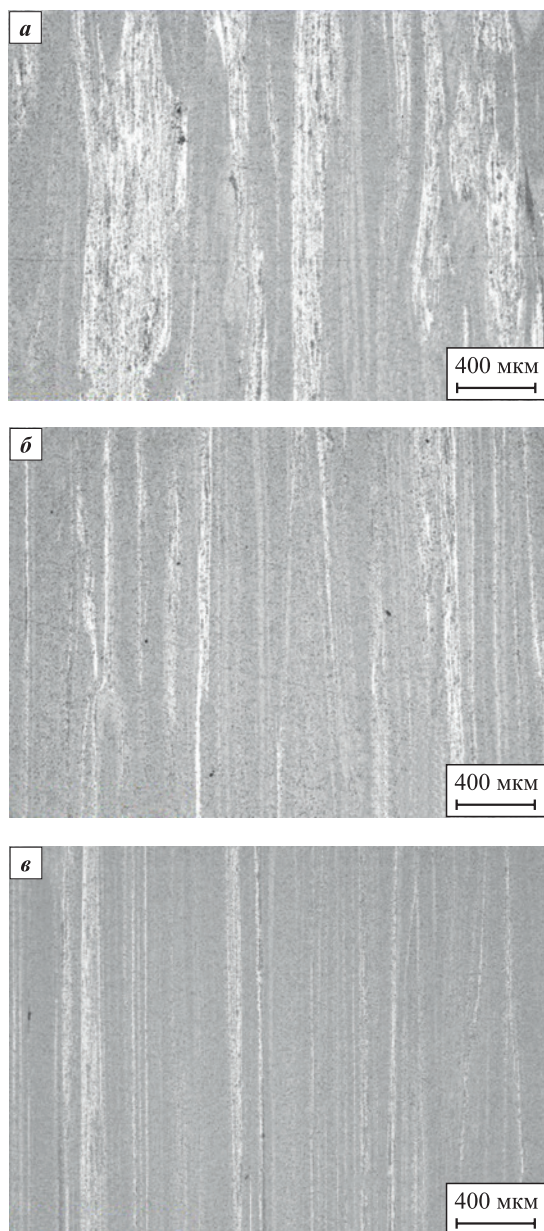


Рис. 6. Структура прутков МКМ после прямого прессования с коэффициентами вытяжки ≥ 10 (а), ≥ 20 (б) и ≥ 30 (в)

Fig. 6. Structure of MCM bars after direct pressing with elongation ratios of ≥ 10 (a), ≥ 20 (b) and ≥ 30 (v)

Значения механических характеристик образцов дисперсно-армированного МКМ в сравнении с алюминиевым сплавом марки АД31

Values of mechanical parameters of dispersed-reinforced MCM samples in comparison with aluminum alloy of AD31 grade

Образец	μ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	E , ГПа
МКМ	≥ 10	290–300	235–240	87–93
	≥ 20	300–305	240–245	88–94
	≥ 30	300–305	240–245	87–95
АД31	—	240–250	200–205	71–73



Рис. 7. Образцы из дисперсно-армированного МКМ для испытаний на растяжение

Fig. 7. Samples of dispersed-reinforced MCM for tensile testing

неоднородностью структуры. При этом увеличение $\mu \geq 30$ не дало существенного прироста в показателях аналогично данным по плотности, описанным выше.

Выводы

1. Деформационно-термическая обработка дисперсно-армированного МКМ на основе алюминиевого сплава методом прессования в глухой обойме позволяет получать материал с пористостью 5–10 %.
2. При достижении порога плотности в 90–95 % от теоретической уплотнение дисперсно-армированного МКМ замедляется, и при дальнейшем росте усилия прессования увеличения плотности не происходит.
3. Применение вторичной деформационно-термической обработки, характеризующейся повышенными степенями деформации материала, позволяет улучшить структуру и свойства получаемого МКМ на основе алюминиевого сплава.
4. Горячее прямое прессование с коэффициентом вытяжки > 20 приводит к получению дисперсно-армированного МКМ на основе алюминиевого сплава с однородной структурой, плотностью более 99,0 % от теоретической и повышенными механическими свойствами: $\sigma_b = 300 \div 305$ МПа и $E = 87 \div 95$ ГПа.

Список литературы / References

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра. *Металлы Евразии*. 2015;1:36–39.
Kablov E.N. Composites: Today and tomorrow. *Metallurgy Eurazii*. 2015;1:36–39. (In Russ.).
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные*

- материалы и технологии. 2015;1(34):3–33.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
- Kablov E.N. Innovative developments of the Federal State Unitary Enterprise “VIAM” of the State Scientific Center of the Russian Federation for the implementation of the “Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030”. *Aviatsionnye materialy iologii. 2015;1(34): 3–33. (In Russ.)*.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
3. Fakhir Aziz Rasul Rozhbiany, Shawnim Rashied Jalal Reinforcement and processing on the machinability and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology. 2019;8(5):4766–4777*.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.023>
 4. Alaneme K.K., Bodunrin M.O. Corrosion behavior of alumina reinforced aluminium (6063) metal matrix composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2011;10(12):1153–1165*.
<https://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2011.1012088>
 5. Sheng-Han Li and Chuen-Guang Chao. Effects of carbon fiber/Al interface on mechanical properties of carbon-fiber-reinforced aluminum-matrix composites. *Metallurgical and Materials Transactions A. 2004; 35(7):2153–2160*.
<https://doi.org/10.1007/s11661-004-0163-z>
 6. Singh J., Chauhan A. Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology. 2015;3(2)*.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.004>
 7. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники. *Авиационные материалы и технологии. 2017;S:186–194*.
<http://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194>
 Antipov V.V. Prospects for development of aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviatsionnye materialy iologii. 2017;S:186–194. (In Russ.)*.
<https://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194>
 8. Гращенко Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты. *Авиационные материалы и технологии. 2017;S:264–271*.
<https://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271>
 Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviatsionnye materialy iologii. 2017;S: 264–271. (In Russ.)*.
<https://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271>
 9. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Shchetanov B.V., Shavnev A.A., et al. AlSiC-based metal matrix composites for power electronic devices. *Composites: Mechanics, Computations, Applications. 2013; 4(1):65–74*.
<https://dx.doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v4.i1.40>
 10. Стоякина Е.А., Курбаткина Е.И., Симонов В.Н., Косолапов Д.В., Гололобов А.В. Механические свойства алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами SiC, в зависимости от матричного сплава. *Труды ВИАМ. 2018;2:62–73*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8>
 Stoyakina E.A., Kurbatkina E.I., Simonov V.N., Koso-lapov D.V., Gololobov A.V. Russ. Mechanical properties of aluminum-matrix composite materials reinforced with SiC particles, depending on the matrix alloy (review). *Trudy VIAM. 2018;2:62–73. (In Russ.)*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8>
 11. Няфкин А.Н., Лощинин Ю.В., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Исследование влияния фракционного состава карбида кремния на теплопроводность композиционного материала на основе алюминиевого сплава. *Труды ВИАМ. 2019;(11):53–59*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-11-53-59>
 Nyafkin A.N., Loshinin Yu.V., Kurbatkina E.I., Koso-lapov D.V. Investigation of the influence of silicon carbide fractional composition on thermal conductivity of composite material based on aluminum alloy. *Trudy VIAM. 2019;(11):53–59. (In Russ.)*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-11-53-59>
 12. El Moumen A., Kanit T., Imad A., El Minor H. Effect of reinforcement shape on physical properties and representative volume element of particles-reinforced composites: Statistical and numerical approaches. *Mechanics of Materials. 2015;(83):1–16*.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.12.008>
 13. Yuan W., Zhang J., Zhang C., Chen Z. Processing of ultrahigh strength SiCp/Al–Zn–Mg–Cu composites. *Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(7):3251–3255*.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.030>
 14. Косолапов Д.В., Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Няфкин А.Н., Гололобов А.В. Исследование структуры и свойств дисперсно-упрочненного МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si. *Труды ВИАМ. 2020;(1):58–67*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-58-67>
 Kosolapov D.V., Shavnev A.A., Kurbatkina E.I., Nyafkin A.N., Gololobov A.V. Study of structure and properties of dispersion hardened MCM based on aluminum alloy of Al–Mg–Si system. *Trudy VIAM. 2020;(1):58–67. (In Russ.)*.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-58-67>
 15. Miller W.S., Humphreys F.J. Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites. *Scripta Metallurgica et Materialia. 1991;25(1):33–38*.
[https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90349-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90349-6)
 16. Abdoli H., Salahi E., Farnoush H., Pourazrang K. Evolutions during synthesis of Al–AlN-nanostructured composite powder by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds. 2008;461(1–2):166–172*.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.07.054>
 17. Березовский В.В., Шавнев А.А., Ломов С.Б., Курганова Ю.А. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al–SiC с различным содержанием армирующей фазы. *Авиационные материалы и технологии. 2014;S(6):17–23*.
<http://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s6-17-23>

- Berezovsky V.V., Shavnev A.A., Lomov S.B., Kurganova Yu.A. Receiving and the analysis of structure of the disperse strengthened composite materials of Al-SiC system with the different maintenance of the reinforcing phase. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*. 2014;S(6): 17–23. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s6-17-23>
18. Ranjit Bauri, Mirle Surappa. Processing and properties of Al-Li-SiCp composites. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2007;8(6):494–502.
<https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.07.004>
 19. Ogie N.A., Oyejide O.J., Akusu O.M., Udumebaye J.E. Effect of compaction on thermal conductivity of aluminum powder. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*. 2018;6(2):1–5.
 20. Kumar V.R., Mahesh N.S., Anwar M.I. Numerical analysis of powder compaction to obtain high relative density in ‘601AB’ aluminum powder. *SasTech Journal*. 2012;11(1):79–84.
 21. Radu Muresan. Research into the warm compaction of metal powders. *Materials Research Proceedings*. 2018;8: 152–156. <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291999-17>
 22. Няфкин А.Н., Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Исследование влияния размера частиц карбида кремния на температурный коэффициент линейного расширения композиционного материала на основе алюминиевого сплава. *Труды ВИАМ*. 2020;(2):41–49.
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-2-41-49>
- Nyafkin A.N., Shavnev A.A., Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V. Studying the effect of silicon carbide particle size on the thermal coefficient linear expansion of the composite material based on aluminum alloy. *Trudy VIAM*. 2020;(2):41–49. (In Russ.).
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-2-41-49>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Андрей Николаевич Няфкин – начальник участка лаборатории № 626, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ).

✉ E-mail: andrey.viam@mail.ru

Дмитрий Викторович Косолапов – заместитель начальника лаборатории № 626, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

✉ E-mail: d.kosolapov87@gmail.com

Елена Игоревна Курбаткина – к.т.н., начальник лаборатории № 626, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

ORCID: 0000-0001-8458-2332

✉ E-mail: elena.kurbatkina@mail.ru

Andrey N. Nyafkin – Head of the Section of Laboratory No. 626, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM (NRC “Kurchatov Institute” – VIAM).

✉ E-mail: andrey.viam@mail.ru

Dmitry V. Kosolapov – Deputy Head of Laboratory No. 626, NRC “Kurchatov Institute” – VIAM.

✉ E-mail: d.kosolapov87@gmail.com

Elena I. Kurbatkina – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory No. 626, NRC “Kurchatov Institute” – VIAM.

ORCID: 0000-0001-8458-2332

✉ E-mail: elena.kurbatkina@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. Н. Няфкин – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка экспериментов, подбор режимов деформационно-термической обработки, написание текста статьи.

Д. В. Косолапов – приготовление смеси и проведение деформационно-термической обработки, анализ полученных результатов экспериментов и исследований свойств образцов, выполнение расчетов.

Е. И. Курбаткина – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

A. N. Nyafkin – conceptualized the main ideas, defined the study’s objectives, formulated the research questions, devised experimental protocols, determined modes of thermomechanical treatment, and authored the paper’s content.

D. V. Kosolapov – prepared mixtures, conducted thermomechanical treatments, analyzed experimental outcomes, assessed sample properties, performed calculations, and contributed to data interpretation.

E. I. Kurbatkina – provided scientific supervision, reviewed and revised the manuscript, refined conclusions, and ensured textual accuracy.

Статья поступила 07.04.2022 г.
 Доработана 05.06.2023 г.
 Принята к публикации 01.07.2023 г.

Received 07.04.2022
 Revised 05.06.2023
 Accepted 01.07.2023