

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-36-84-89>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СТРУКТУРЫ И КАЧЕСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кобелева Л.И.¹, Быков П.А.¹, Катин И.В.¹, Калашиников И.Е.¹, Михеев Р.С.²

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия;*

²*Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Ключевые слова: композиционные материалы, интерметаллидное упрочнение, распределение армирующей фазы, структура, трение, интенсивность изнашивания.

Аннотация. Исследованы образцы, изготовленные методом механического замешивания в расплав АО20-1 предварительно подготовленных в планетарной мельнице гранул из стружки данного сплава и порошка интерметаллида Ti_2NbAl . Измельчение зеренной структуры матрицы при изменении скорости кристаллизации обеспечило улучшение распределения армирующей фазы в матрице, что способствовало кратному снижению интенсивности изнашивания КМ по сравнению с матричным сплавом. Коэффициент трения КМ при этом снижается незначительно и только с ростом нагрузок испытаний.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DISPERSION OF THE STRUCTURE AND THE QUALITY OF THE DISTRIBUTION OF REINFORCING FILLER ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ALUMINUM-MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Kobeleva L.I.¹, Bykov P.A.¹, Katin I.V.¹, Kalashnikov I.E.¹, Mikheev R.S.²

¹*A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia;*

²*Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

Keywords: composite materials, intermetallic hardening, distribution of the reinforcing phase, structure, friction, wear intensity.

Abstract. Samples made by mechanical mixing of composite mixture granules into AO20-1 melt were studied. The granules from chips of this alloy and Ti_2NbAl intermetallic powder are preliminarily prepared in a planetary mill. The refinement of the grain structure of the matrix with a change in the rate of crystallization provided an improvement in the distribution of the reinforcing phase in the matrix. That contributed to a multiple decrease in the wear intensity of the CM in comparison with the matrix alloy. At the same time, the coefficient of friction of KM decreases slightly and only with increasing test loads.

Введение. Развиваются работы, позволяющие получать композиционные материалы (КМ) с повышенной износостойкостью и пониженным коэффициентом трения в широком диапазоне параметров нагружения на базе высокопластичных алюминиевых матриц и тугоплавких армирующих наполнителей с резко отличной от матрицы твердостью.

Свойства матрицы и наполнителя, уровень межфазной связи, а также качество распределения армирующей фазы в матрице являются основными факторами, оказывающими влияние на эксплуатационные свойства алюмоматричных КМ [1]. Обеспечение равномерного распределения армирующей фазы в матрице – одна из основных проблем при изготовлении литых дисперсно-наполненных КМ. Равномерность распределения определяется смачиванием армирующих частиц матричным расплавом, соотношением значений плотностей компонентов, объемным содержанием, формой и размером частиц [2]. По данным [3] улучшение распределения армирующих компонентов в матрице, в частности, наблюдали при увеличении дисперсности структуры литых металломатричных КМ.

Существует целый ряд методик, позволяющих оценить равномерность распределения армирующей фазы [4]. В большинстве случаев методы количественной оценки распределения наполнителя основаны на обработке металлографических изображений структуры КМ с различным размером частиц и объемной доли, обеспечивая схожесть результатов.

Целью данной работы являлась оценка влияния дисперсности структуры матрицы на однородность распределения частиц армирующего наполнителя и трибологические характеристики КМ.

Материалы и методы исследования. Образцы для исследования изготовлены методом механического замешивания армирующей фазы в матричный расплав. Матрицей являлся промышленный сплав АО20-1 (20% Sn, 1% Cu, остальное – алюминий) ГОСТ 14113-78, армирующей фазой - порошок интерметаллида Ti_2NbAl (<100 мкм, НВ ~340), полученный гидридно-кальциевым способом на ООО "Метсинтез" [5]. Порошок в расплав, нагретый до 680°C, вводили в виде композиционных гранул, предварительно подготовленных обработкой в атриторе стружки из сплава АО20-1 и порошка интерметаллида. Содержание Ti_2NbAl в изготовленных образцах составляло 5 масс.%. Размеры зерен в образцах измеряли с применением программы Qwin для анализа изображений по 10 полям с обсчетом не менее 80 зерен для каждого поля. Структуру полученных литых образцов исследовали на оптическом микроскопе Leica DMILM, оснащенный программой Qwin для анализа изображений, и на электронных микроскопах Crossbeam 1540 EsB и LEO 430i. Метод оцифровывания фотоизображений структуры применяли для оценки характера распределения армирующей фазы в матрице [6].

Образцы для трибологических испытаний в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 12 мм испытывали в условиях сухого трения скольжения при последовательном ступенчатом осевом нагружении каждого образца в интервале нагрузок 0,5-3,0 МПа с шагом 0,5 МПа на установке CETR UMT Multi-Specimen Test System. Контртело в виде втулки, изготовлено из стали 45Х (HRC>63). Время испытаний при каждой осевой нагрузке составляло 2000 с, путь трения составил 6000 м. Непрерывно регистрировали силу трения $f_{тр}$. Износ после полного цикла нагружения определяли взвешиванием образцов по формуле $\Delta m = m_1 - m_2$, где m_1 , m_2 – масса образца до и после

испытания, а также проводили расчет интенсивности изнашивания $I_m = \Delta m/L$, где L – путь трения.

Результаты и обсуждение. Кристаллизацию расплавов КМ проводили в изложницах, изготовленных из материалов с различной теплопроводностью (теплопроводность меди – 384 Вт/м·град, графита – 130 Вт/м·град), т.е. скорости затвердевания расплавов были различны. Отмечено измельчение структуры матрицы (рис. 1). Средний размер зерен сплава АО20-1 – 114 мкм, матрицы в КМ 34 мкм (кристаллизация в медной изложнице) и 44 мкм (графитовая изложница), таким образом средний размер зерна уменьшился примерно в 3 раза. Как показано в [7] модифицирующее влияние интерметаллида Ti_2NbAl на литую структуру КМ не выявлено.

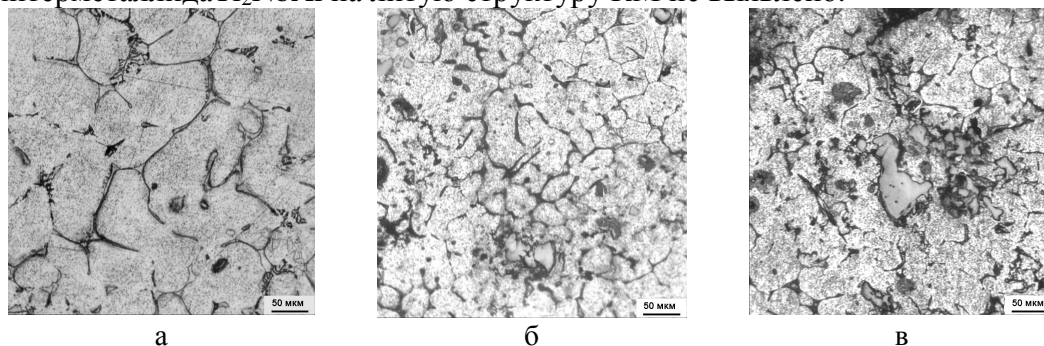


Рис. 1. Структура литого сплава АО20-1 (а) и КМ: б – кристаллизация в медной изложнице, в – кристаллизация в графитовой изложнице

При подготовке композиционных гранул в процессе механической обработки стружки из сплава АО20-1 и порошка Ti_2NbAl в шаровой мельнице происходит измельчение компонентов, максимальный размер частиц Ti_2NbAl в гранулах не превышал 20 мкм. Предварительное распределение частиц Ti_2NbAl в гранулах позволило уменьшить образование их агломераций в структуре литых КМ.

Для образцов КМ с различной дисперсностью структуры проанализирован характер равномерности распределения армирующей фазы в матрице. Применяли метод наложения на микрофотографию структуры КМ сетки из квадратных ячеек. Размер стороны ячейки был выбран 30 мкм, исходя из размера частиц Ti_2NbAl в КМ. Пример структуры КМ, которую использовали при оценке равномерности распределения частиц в матрице, приведен на рисунке 2. По результатам обсчета построены гистограммы: число ячеек в процентах в зависимости от количества находящихся в них частиц. В образцах с более мелкой структурой наибольшее число ячеек содержит близкое количество частиц (2-4 частицы), количество частиц в ячейках образцов с более крупной структурой изменяется от 1 до 11. Близкое количество частиц, содержащееся в наибольшем числе ячеек, свидетельствует о более равномерном распределении армирующей фазы [6].

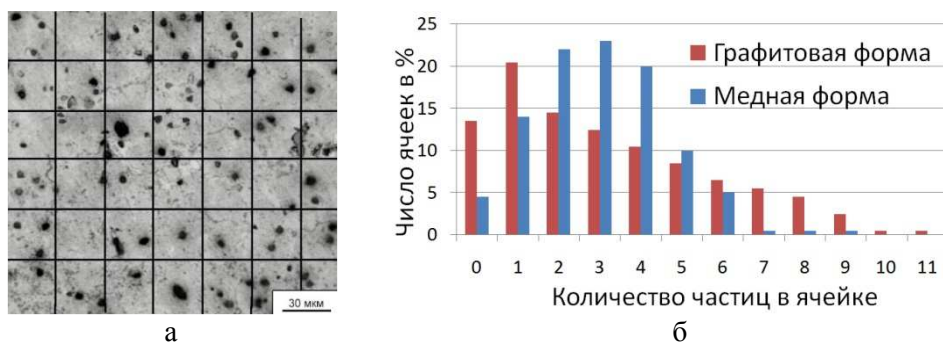


Рис. 2. Пример микроструктуры КМ (а) для проведения анализа путем разбиения на квадраты с построением гистограммы распределения частиц в соответствующем квадрате (б)

Проведены трибологические испытания изготовленных образцов. Показано, что коэффициент трения сплава АО20-1 достаточно стабилен во всем диапазоне нагрузок испытаний, разброс средних значений лежит в интервале 0,269-0,256. На этапе притирки $f_{тр}$ КМ выше, чем у сплава АО20-1, однако с увеличением нагрузок испытаний $f_{тр}$ образцов КМ снижается. В интервале нагрузок 0,5-3 МПа разброс величин $f_{тр}$ образцов при кристаллизации в медной изложнице находится в интервале 0,316-0,144, образцов, при кристаллизации в графитовой изложнице 0,312-0,182, т.е. при максимальной нагрузке испытаний снижение $f_{тр}$ для образцов с более дисперсной структурой значительнее.

По сравнению с матричным сплавом для образцов КМ наблюдали значительное снижение потери массы в процессе трения и, как следствие, более высокие показатели износостойкости. Равномерность распределения армирующей фазы в матрице обеспечивает на поверхности трения образец - контртело равномерное распределение участков контакта трущихся поверхностей, склонных к схватыванию. Это, в конечном счете, ограничивает пластическое деформирование матрицы и уменьшает унос ее материала. Лучшие показатели имеют образцы с более дисперсной структурой и с наиболее равномерным распределением армирующей фазы. Потеря массы таких образцов после полного цикла испытания на трение 0,1082 г, тогда как для исходного сплава – 0,8080 г.

Таким образом, показано, что измельчение зеренной структуры матричного сплава в КМ обеспечивает наиболее равномерно распределение в ней армирующего наполнителя и способствует повышению износостойкости КМ.

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-01176-23-00.

Список литературы

1. Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Bykov P.A., Kobeleva L.I. Investigation of the structure and properties of aluminum-matrix composite coatings for tribotechnical purposes formed on steel substrates // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2275, p. 012007. doi.org/10.1088/1742-6596/2275/1/012007.

2. Martynova A.V., Chen' I., Lopatina Y.A., Kurganova Y.A., Kovalev V.V., Mikheev R.S., Kobernik N.V. Analysis of the nonuniform reinforcing-phase distribution in cast rods and a deposited layer made of an aluminum-matrix composite material // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018, vol. 2018, no 13, pp. 1189-1194. doi.org/10.1134/S0036029518130165.
3. Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Быков П.А., Катин И.В., Колмаков А.Г. Получение наплавочных прутков из композиционного материала на основе сплава системы SnSbCu для формирования антифрикционных покрытий // *Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет. Сборник научных трудов.* – М.: Интерконтакт Наука, 2018. – С. 632-644. – doi.org/10.30791/978-5-902063-58-2-632-644.
4. Калашников И.Е., Кобелева Л.И., Быков П.А., Колмаков А.Г., Катин И.В., Михеев Р.С. Оценка равномерности распределения частиц Ti_2NbAl в алюмоматричном композиционном материале // *Перспективные материалы.* – 2022. – № 5. – С. 40-48. – doi.org/10.30791/1028-978X-2022-5-40-48.
5. Касимцев А.В., Левинский Ю.В. Гидридно-кальциевые порошки металлов, интерметаллидов, тугоплавких соединений и композиционных материалов. – М.: Изд-во МИТХТ, 2012. – 248 с.
6. Raj R., Thakur D.G. Qualitative and quantitative assessment of microstructure in Al- B_4C metal matrix composite processed by modified stir casting technique // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016, vol. 16, pp. 949-960. doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.004.
7. Kobleva L.I., Kalashnikov I.E., Bykov P.A., Kolmakov A.G., Katin I.V. Structure and tribological properties of the AO20-1 alloy- Ti_2NbAl intermetallic compound composite material // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, vol. 2020, no. 10, pp. 1137-1141. doi.org/10.1134/S0036029520100134.

References

1. Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Bykov P.A., Kobleva L.I. Investigation of the structure and properties of aluminum-matrix composite coatings for tribotechnical purposes formed on steel substrates // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2275, p. 012007. doi.org/10.1088/1742-6596/2275/1/012007.
2. Martynova A.V., Chen' I., Lopatina Y.A., Kurganova Y.A., Kovalev V.V., Mikheev R.S., Kobernik N.V. Analysis of the nonuniform reinforcing-phase distribution in cast rods and a deposited layer made of an aluminum-matrix composite material // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018, vol. 2018, no 13, pp. 1189-1194. doi.org/10.1134/S0036029518130165.
3. Kalashnikov I.E., Bolotova L.K., Kobleva L.I., Bykov P.A., Katin I.V., Kolmakov A.G. Production of surfacing rods from a composite material based on an alloy of the SnSbCu system for the formation of antifriction coatings // *Baykov Institute of Metallurgy of Materials Science of the Russian Academy of Sciences – 80 years old. Collection of scientific papers.* – М.: Intercontact Science, 2018. – P. 632-644. – doi.org/10.30791/978-5-902063-58-2-632-644.
4. Kalashnikov I.E., Kobleva L.I., Bykov P.A., Kolmakov A.G., Katin I.V., Mikheev R.S. Estimation of distribution uniformity of Ti_2NbAl particles in an aluminum-matrix composite material // *Advanced materials*. 2022, no. 5, pp. 40-48. doi.org/10.30791/1028-978X-2022-5-40-48.

5. Kasimtsev A.V., Levinsky Yu.V. Hydride-calcium powders of metals, intermetallides, refractory compounds and composite materials. – M.: MITHT Publ. house, 2012. – 248 p.
6. Raj R., Thakur D.G. Qualitative and quantitative assessment of microstructure in Al-B₄C metal matrix composite processed by modified stir casting technique // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016, vol. 16, pp. 949-960. doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.004.
7. Kobeleva L.I., Kalashnikov I.E., Bykov P.A., Kolmakov A.G., Katin I.V. Structure and tribological properties of the AO20-1 alloy–Ti₂NbAl intermetallic compound composite material // Russian Metallurgy (Metally). 2020, vol. 2020, no. 10, pp. 1137-1141. doi.org/10.1134/S0036029520100134.

Кобелева Любовь Ивановна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Kobeleva Lyubov Ivanovna – candidate of technical sciences, leading researcher
Быков Павел Андреевич – научный сотрудник	Bykov Pavel Andreevich – researcher
Катин Игорь Валентинович – научный сотрудник	Katin Igor Valentinovich – researcher
Калашников Игорь Евгеньевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник	Kalashnikov Igor Evgenievich – doctor of technical sciences, leading researcher
Михеев Роман Сергеевич – доктор технических наук, профессор	Mikheev Roman Sergeevich – doctor of technical sciences, professor
pbykov@imet.ac.ru	

Received 22.05.2023