

П. Шарма¹ (✉), В. Дабра¹, С. Шарма², Д. Хандуя³, Н. Шарма⁴,
Р. Шарма⁵, К. Сайни¹

¹ Институт инжиниринга и технологии Панипата,
г. Панипат, Индия

² Университет Гаутамы Будды, г. Грейте Нойда, Индия

³ Национальный институт технологии, г. Курукшетра, Индия

⁴ Университет Махариши Маркендшвар, г. Амбала, Индия

⁵ Университет Амита, город Грейте Нойда, Индия

УДК 666.3:620.22-419.8.001.5(540)

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ AA6082/(SiC + ГРАФИТ)

Разработаны композиты с матрицей из гибридного алюминия AA6082 (hybrid aluminium matrix composites — HAMC), упрочненные разным количеством керамического сыпучего материала из смеси карбид кремния (SiC) + графит (Gr). Количество керамического порошка от 5 до 15 мас. %. Проанализированы такие параметры гибридных композитов, как микроструктура, плотность и пористость, а также механические свойства — стойкость и предел прочности при растяжении. На микрофотографиях, полученных на сканирующем электронном микроскопе, обнаружено равномерное распределение частиц (SiC + Gr) в алюминиевой матрице. Плотность и пористость гибридного композита увеличиваются соответственно от 2,69 до 2,72 г/см³ и от 0,37 до 1,20 %, твердость по Виккерсу и предел прочности при растяжении — соответственно от *HV* 49,5 до 85 и от 161,5 до 187 МПа, а показатель относительного удлинения снижается от 8,6 до 5,3 по мере повышения содержания керамической сыпучей добавки (SiC + Gr) от 0 до 15 мас. %.

Ключевые слова: композиты с матрицей из гибридного алюминия (HAMC), графит (Gr), карбид кремния, сканирующий электронный микроскоп (SEM), предел прочности при растяжении.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы, изготовленные по особой технологии с добавкой упрочняющих частиц (reinforcement particles), таких как Al₂O₃, Si₃N₄, SiC, B₄C, Gr, TiC, TiB₂ и т. д., называются композитами с алюминиевой матрицей (aluminium matrix composites — AMC). AMC обладают отличными механическими свойствами, благодаря которым находят применение в автомобильной, аэрокосмической и оборонной промышленности, а также при изготовлении продукции для занятий спортом [1–3]. Прочность обычного алюминиевого сплава повышается, если он упрочнен твердыми керамическими частицами, причем его износостойкость повышается, а соотношение массы к прочности уменьшается [3–5].

AMC можно получать добавлением в матрицу сыпучей смеси методом распыления (spray casting), литьем под давлением (squeeze casting), перемешиванием (stir casting), измельчением

шарами (ball milling) и обработкой путем перемешивания трением (friction stir processing — FSP). Выбор технологии зависит от относительного объема, зернового состава, типа и морфологии керамических частиц [6, 7]. При обычной технологии упрочняющие частицы, такие как карбиды (SiC, TiC и B₄C), бориды (TiB₂), оксиды (Al₂O₃) и нитриды металлов (Si₃N₄, AlN), вводят в алюминиевую матрицу, находящуюся в расплавленном состоянии при атмосферном давлении, путем механического перемешивания. При измельчении шарами прочный материал можно получить путем перемешивания в емкости порошка металла и упрочняющего порошка с помощью керамических или закаленных стальных шаров [8]. При использовании технологии FSP композиты изготавливают путем точного подбора микроструктуры. Упрочняющие частицы диспергируются в матрице металла, которая находится в твердом состоянии [7, 9–12].

Технология с перемешиванием используется наиболее часто. Она обладает такими плюсами, как простота, низкие затраты, широкий диапазон условий, при которых ее можно использовать, а также широкий диапазон режима обработки и исходного состояния материала



П. Шарма

E-mail: pardeepsharma.mech@piet.co.in

(wide range of processing and material conditions). Кроме того, матрица подвергается более выраженному воздействию упрочняющих частиц, поскольку перемешивание осуществляется с помощью механического перемешивающего устройства [13–22].

При изготовлении АМС используют SiC, твердые керамические частицы которого обладают очень высокой механической прочностью и способствуют увеличению прочности АМС. С увеличением содержания SiC композиты с алюминиевой матрицей A6061/SiC, изготавливаемые по технологии жидкого металла (liquid metallurgy process), демонстрируют увеличение предела прочности при растяжении, твердости и плотности с одновременным уменьшением вязкости [23], композиты AA2014/SiC — увеличение плотности, пористости и твердости [24], композиты AA/SiC, получаемые по технологии вакуумной инфильтрации, — увеличение твердости и плотности [25], композиты AA/SiC, изготавливаемые с перемешиванием (stir casting), — снижение относительного удлинения и плотности с одновременным увеличением предела прочности при растяжении, твердости и пористости [26]. С ростом содержания Gr снижается твердость AA/Gr-композитов в результате роста их пористости [27], уменьшается трещиностойкость и твердость AA2024/Gr-композитов, изготовленных по технологии порошковой металлургии in situ [28], снижаются предел прочности при растяжении и твердость AA7075/Gr-композитов, изготовленных по технологии жидкого литья [29]. Композиты AA6061/Gr, изготовленные по технологии перемешивания, демонстрируют снижение твердости и плотности с одновременным увеличением предела прочности при растяжении и пористости [30], композиты AA6082/Gr, изготовленные по той же технологии, — снижение плотности, твердости, предела прочности при растяжении в результате увеличения пористости по мере роста количества упрочняющей добавки.

Известно, что добавка SiC улучшает механические свойства, повышая твердость и предел прочности при растяжении, а добавка Gr, наоборот, снижает эти показатели. То есть предпочтительно упрочнять матрицу из алюминия частицами SiC и Gr и получать гибридный композит [32]. В настоящем исследовании использовали в качестве упрочняющих материалов SiC и Gr. Обнаружено [32–37], что гибридные композиты AA/SiC/Gr обладают более высокой твердостью, причем их твердость возрастает при добавке SiC в качестве второго упрочняющего компонента в Al–Gr-композиты. Твердость металлической матрицы AA6061 и AA6082 увеличивается при упрочнении керамическими частицами комбинированного состава ($TiB_2 + Gr$) и ($Si_3N_4 + Gr$), причем чем большее количество этих частиц

вводится в металлическую матрицу перемешиванием, тем выше твердость [38, 39]. Таким образом, НАМС обладают лучшими механическими свойствами, чем обычные АМС.

В качестве материала матрицы был использован алюминий 6082, так как он обладает отличной коррозионной стойкостью и высокой прочностью. Сплав применяется главным образом в строительстве и транспорте. Область применения этого сплава можно расширить, если улучшить его механические свойства [39–42]. С учетом этого в данном исследовании изучали микроструктуру, физические и механические свойства гибридного композита AA6082/(SiC + Gr), изготовленного перемешиванием.

ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Процесс изготовления композита

Гибридные композиты изготавливали по технологии введения добавок перемешиванием (stir casting process). Химический состав исследуемого композита AA6082 [43], мас. %: Al 97,14, Si 1,16, Mg 0,690, Cu 0,0380, Mn 0,58, Ni 0,04, Fe 0,258, Zn 0,027. В качестве упрочняющих компонентов были взяты SiC и Gr с размером частиц около 30 мкм. В таблице приведены их свойства.

Сплав алюминия был расплавлен в электропечи при 920 °С (рис. 1, а) [43]. Расплав перемешивали с помощью механической мешалки для получения хорошего завихрения [44, 45]. Части-

Свойства упрочняющих компонентов SiC и Gr

Компонент	Твердость, ГПа	Плотность, г/см ³	Средний размер частиц, мкм
SiC	24,5–29,0	3,2	30
Gr	0,25	2,2	30



Рис. 1. Электропечь для проведения испытания (а) и подогрев упрочняющего материала [43] (b)

цы (SiC + Gr) были предварительно подогреты (рис. 1, *b*) до окисления их поверхности [43]. Параметры процесса введения упрочняющих добавок с перемешиванием приведены ниже:

Температура перемешивания, °C.....	920
Продолжительность перемешивания, мин.....	15
Частота вращения перемешивающего устройства, об/мин.....	250
Температура, °C:	
в подогретом состоянии.....	300
упрочняющих частиц.....	550

Микроструктура и тестирование

Металлографическое исследование образцов НАМС проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (FESEM с рентгено-спектральным анализатором на основе метода энергетической дисперсии EDX) и прибора Surpa 40 VP с рентгеноспектральным анализатором на основе метода энергетической дисперсии (Bruker, Германия) с получением фотографий, отображающих пространственное распределение элементов (elemental mapping) [43]. Определяли также такие показатели, как плотность и пористость — по закону Архимеда [46], микротвердость — на твердомере Виккерса (MITUTOYO-MVK-H1, Англия) при нагрузке

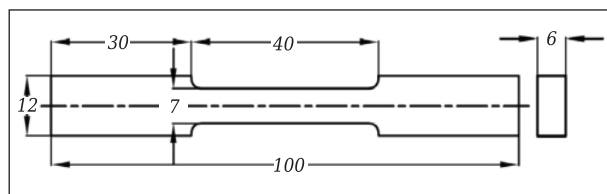


Рис. 2. Образец для испытания на предел прочности при растяжении [47]; все размеры указаны в мм

500 г, которая воздействовала в течение 20 с на все образцы [43]. Макротвердость измеряли на твердомере Бринелля (7KB3000, Индия) при нагрузке 500 кг, которая воздействовала в течение 20 с в десяти различных зонах поверхности образцов [43]. Образцы были изготовлены по стандарту ASTM E08 [47]. Типичный образец для испытания на растяжение показан на рис. 2. Предел прочности при растяжении рассчитывали на компьютеризированной универсальной установке (HITECH TUE-C-1000, Индия) [43].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура

На рис. 3 показана микрофотография литого образца материала AA6082. В образце обнаружены частицы Mg и Si, которые являются основными составляющими компонентами AA6082 [48]. На рис. 4 показаны микрофотографии гибридных композитов. Видны равномерное распределение

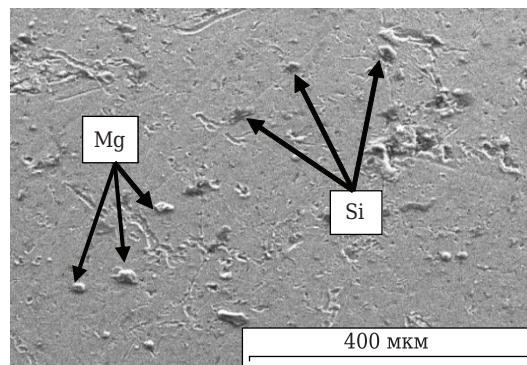


Рис. 3. СЭМ-микрофотография литого образца сплава AA6082

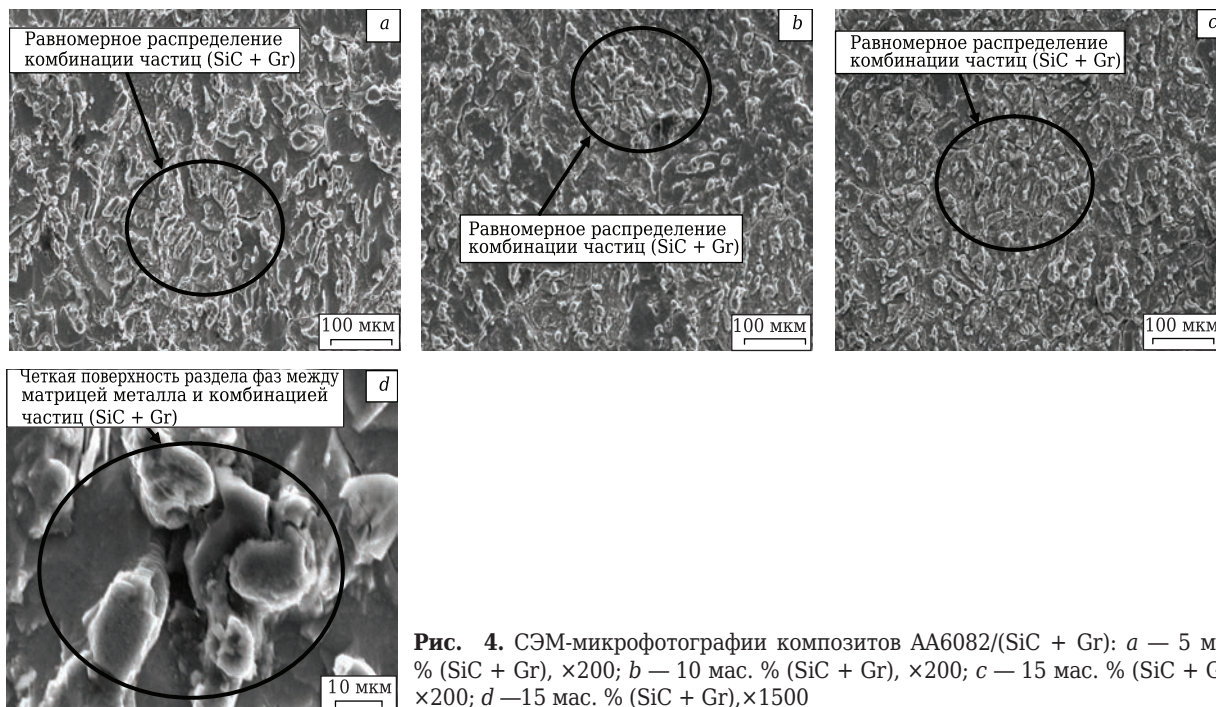


Рис. 4. СЭМ-микрофотографии композитов AA6082/(SiC + Gr): *a* — 5 мас. % (SiC + Gr), $\times 200$; *b* — 10 мас. % (SiC + Gr), $\times 200$; *c* — 15 мас. % (SiC + Gr), $\times 200$; *d* — 15 мас. % (SiC + Gr), $\times 1500$

керамических частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) в матрице (см. рис. 4, с) в результате их хорошей межфазной связи с металлической матрицей [48], а также четкая поверхность раздела фаз между матрицей и керамическими частицами ($\text{SiC} + \text{Gr}$) (см. рис. 4, d). На рис. 5 показано пространственное распределение элементов в гибридном композите с 15 мас. % ($\text{SiC} + \text{Gr}$). Частицы в виде Si (SiC) и C (Gr) равномерно распределены в матрице металла; присутствуют также частицы Mg и Mn. Состав элементов в гибридном композите AA6082 с 15 мас. % ($\text{SiC} + \text{Gr}$), мас. % / ат. %: Al 76,65/60,71, Si 1,04/1,04, C 20,72/36,66, Mg 0,77/0,89, Mn 0,82/0,70. По анализу микроструктуры и пространственному распределению частиц можно утверждать, что изготовленные композиты являются гибридными, упрочненными керамическими частицами ($\text{SiC} + \text{Gr}$).

Физические свойства

Результаты замеров плотности литого AA6082 и изготовленных гибридных композитов показаны на рис. 6. Видно, что присутствие комбинации частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) очень незначительно влияет на плотность НАМС. Плотность упрочненного НАМС увеличилась от $2,69 \text{ г/см}^3$ в образце без добавки до $2,72 \text{ г/см}^3$ в образце с 15 мас. % добавки (см. рис. 6, a). Плотность образцов НАМС выше, чем у литого материала AA6082, что объясняется, вероятно, более высокой плотностью частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) по сравнению с плотностью чисто металлической матрицы AA6082. Открытая пористость упрочненных НАМС увеличилась от 0,37 до 1,20 % (см. рис. 6, b), что, вероятно, объясняется присутствием примесей в матрице металла и в смеси частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) [43].

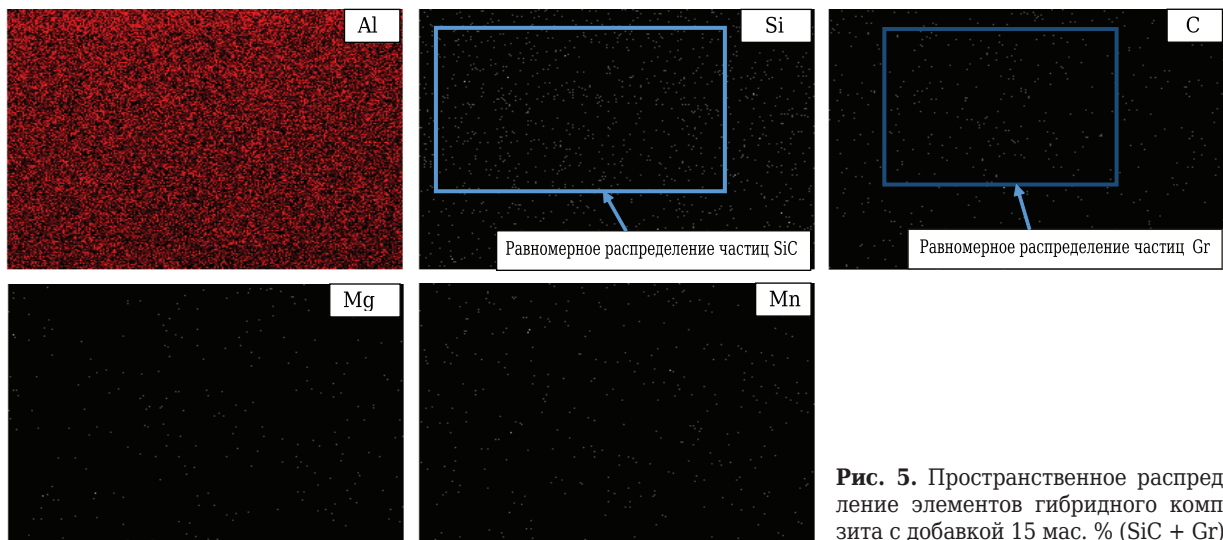


Рис. 5. Пространственное распределение элементов гибридного композита с добавкой 15 мас. % ($\text{SiC} + \text{Gr}$)

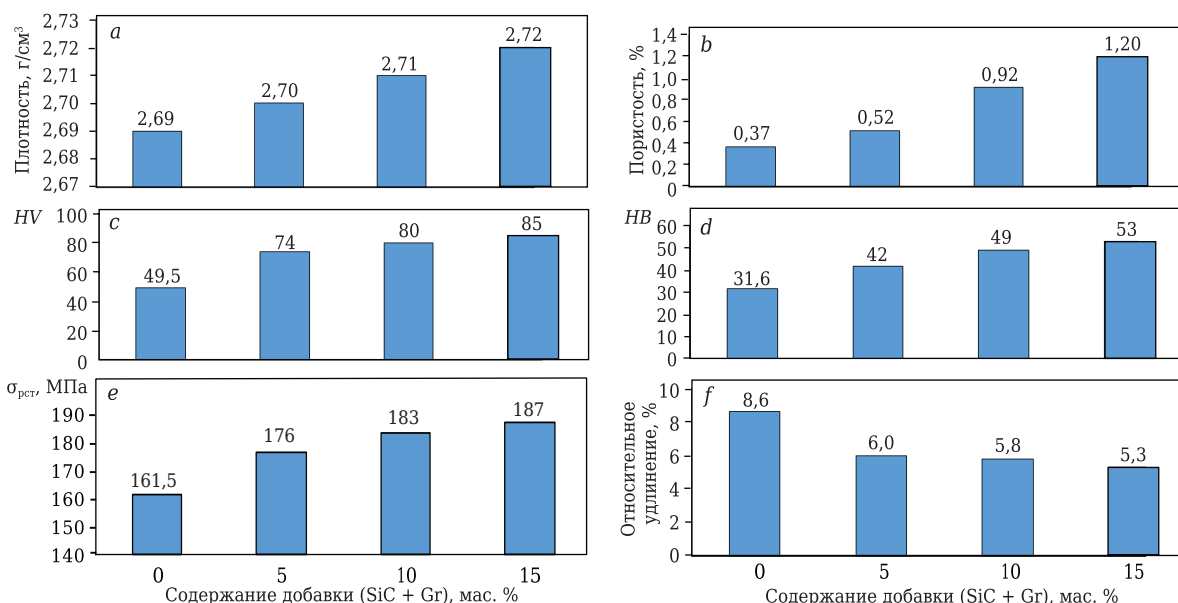


Рис. 6. Зависимости плотности (a), пористости (b), микротвердости (c), макротвердости — число твердости по Бринеллю (d), предела прочности при растяжении (e) и относительного удлинения (f) от содержания добавки ($\text{SiC} + \text{Gr}$)

Механические свойства

Механические свойства гибридных композитов зависят главным образом от распределения упрочняющих частиц и межфазной связи между частицами и матрицей [48]. Распределение частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) равномерное (см. рис. 4). На микрофотографиях, полученных при большом увеличении (см. рис. 4, *d*), видно также, что керамические частицы покрыты сплавом матрицы. Механические свойства АА6082 в результате введения добавок ($\text{SiC} + \text{Gr}$) улучшились. Из рис. 6, *c*, *d* видно, что микро- и макротвердость НАМС линейно возрастает по мере увеличения количества керамической сыпучей

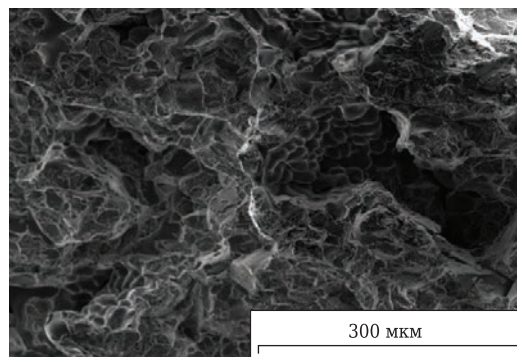


Рис. 7. Морфология излома литого образца сплава АА6082 без добавки

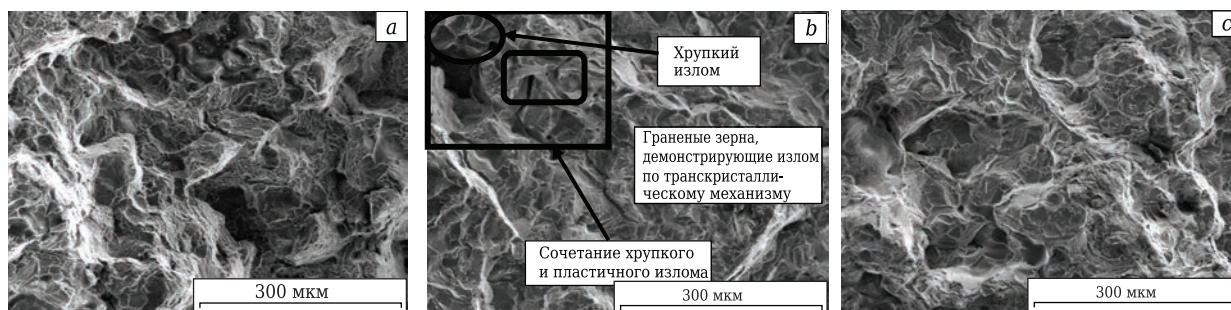


Рис. 8. Морфология излома гибридных композитов с добавкой ($\text{SiC} + \text{Gr}$)

смеси ($\text{SiC} + \text{Gr}$). Это, вероятно, объясняется повышением доли твердых керамических частиц в матрице металла и высокой твердостью комбинированного материала ($\text{SiC} + \text{Gr}$) по сравнению с АА6082. Твердые керамические частицы придают материалу большую стойкость к воздействию пластической деформации, что увеличивает твердость НАМС [48]. Из рис. 6, *e* видно также, что керамические сыпучие частицы заметно повышают предел прочности при растяжении НАМС — от 161,5 до 187 МПа, что объясняется их равномерным распределением в матрице металла (см. рис. 4, *c*). Частицы придают прочность матрице благодаря механизму упрочнения в результате переноса нагрузки с упрочняющих частиц на матрицу [48]. Тепловое несоответствие между матрицей металла и частицами ($\text{SiC} + \text{Gr}$) приводит к более высокой плотности дислокаций в алюминиевой матрице и к более высокой нагрузочной способности твердых частиц, благодаря чему увеличивается предел прочности при растяжении НАМС [49]. Из рис. 6, *f* видно, что относительное удлинение НАМС снижается по мере увеличения количества добавки. Хрупкая природа упрочняющих матрицу частиц ($\text{SiC} + \text{Gr}$) играет важную роль в снижении пластичности [48].

На рис. 7 показана СЭМ-микрофотография поверхности излома АА6082 в виде сплава с литой матрицей (в виде сплава, к матрице которого был добавлен упрочняющий материал — cast matrix alloy). Поверхность излома неупрочненной литой матрицы (unreinforced cast matrix) алюми-

ниевого сплава неровная, покрыта углублениями разного размера. Более крупные по размеру трещины распределены беспорядочно, рваные края заметны в зоне, в которой перед разрушением наблюдалась наибольшая пластическая деформация. Очевидно, после литья матрица сплава испытала пластическое разрушение (пластический разрыв), которое произошло вследствие образования трещины, срастания и разрушения. На рис. 8 показана морфология трещин гибридных композитов АА6082/($\text{SiC} + \text{Gr}$). Поверхность излома гибридных композитов с 5–15 мас. % добавки имеет трещины, углубления и граненные зерна, что указывает на смешанную природу разрыва. Внутри углублений распределяются частицы SiC и Gr , что создает хорошую межфазную связь упрочняющих частиц с алюминиевой матрицей вследствие равномерного распределения, благодаря чему увеличиваются твердость и прочность композитов. Хотя в морфологии трещин наблюдаются признаки пластического разрушения, все же следует отметить, что в сплаве АА6082 пластический разрыв более сильный, чем в гибридных композитах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гибридные композиты АА6082/($\text{SiC} + \text{Gr}$) были изготовлены перемешиванием с 5, 10 и 15 мас. % комбинированного упрочняющего состава. Проанализированы микроструктура, физические и механические свойства композитов. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Композит AA6082/(SiC + Gr) был изготовлен по технологии введения упрочняющей добавки с перемешиванием (stir casting process).

2. На SEM-микрофотографиях и изображениях, демонстрирующих пространственное распределение элементов (elemental map analysis), обнаруживается присутствие упрочняющих частиц (SiC + Gr), которые распределены в матрице довольно равномерно.

3. Плотность и пористость гибридных композитов возросла от 2,69 до 2,72 г/см³ и от 0,37 до

1,20 % в зависимости от количества упрочняющей добавки от 0 до 15 мас. %.

4. Микро- и макротвердость гибридных композитов увеличилась от HV 49,5 до 85 и от HB 31,6 до 53 в зависимости от содержания добавки.

5. Благодаря упрочняющему воздействию частиц (SiC + Gr) предел прочности при растяжении литого сплава AA6082 увеличился от 161,5 до 187 МПа с одновременным снижением пластичности от 8,6 до 5,3 в зависимости от содержания упрочняющей добавки.

Библиографический список

1. **Hemanth, J.** Quartz (SiO₂) reinforced chilled metal matrix composite (CMMC) for automobile applications / J. Hemanth // Material and Design. — 2009. — Vol. 30. — P. 323–329.
2. **Feng, Y. C.** Fabrication and characteristic of Al-based hybrid composite reinforced with tungsten oxide particle and aluminum borate whisker by squeeze casting / Y. C. Feng, L. Geng, P. Q. Zheng [et al.] // Material and Design. — 2008. — Vol. 29. — P. 2023–2026.
3. **Ramesh, C. S.** Microstructure and mechanical properties of Ni–P coated Si₃N₄ reinforced Al6061 composites / C. S. Ramesh, R. Keshavamurthy, B. H. Channabasappa, A. Abrar // Mater. Sci. Eng. A. — 2009. — Vol. 502. — P. 99–106.
4. **Lashgari, H. R.** The effect of strontium on the microstructure and wear properties of A356 – 10 % B₄C cast composites / H. R. Lashgari, A. R. Sufizadeh, M. Etemy // Material and Design. — 2010. — Vol. 31. — P. 2187–2195.
5. **Sharma, P.** Tribological and mechanical behavior of particulate aluminium matrix composites / P. Sharma, D. Khandja, S. Sharma // J. Reinf. Plast. Compos. — 2014. — Vol. 33, № 23. — P. 2192–2202.
6. **Altinkok, N.** Modelling of the tensile and density properties in particle reinforced metal matrix composites by using neural networks / N. Altinkok, R. Koker // Material and Design. — 2006. — Vol. 27. — P. 625–631.
7. **Kaczmar, J. W.** The production and application of metal matrix composite materials / J. W. Kaczmar, K. Pietrzak, W. Wlosinski // J. Mater. Process. Technol. — 2000. — Vol. 106. — P. 58–67.
8. **Sharma, P.** On the use of ball milling for the production of ceramic powders / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // Mater. Manuf. Processes. — 2015. — Vol. 30. — P. 1370–1376.
9. **Wang, W.** A novel way to produce bulk SiC reinforced aluminium metal matrix composites by friction stir processing / W. Wang, Q. Y. Shi, P. Liu // J. Mater. Process. Technol. — 2009. — Vol. 209. — P. 2099–2103.
10. **Hu, C. M.** Solute-enhanced tensile ductility of ultrafine-grained Al–Zn alloy fabricated by friction stir processing / C. M. Hu, C. M. Lai, P. W. Kao // Scripta Mater. — 2009. — Vol. 60. — P. 639–642.
11. **Rhodes, C. G.** Fine-grain evolution in friction stir processed 7050 aluminium / C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel // Scripta Mater. — 2003. — Vol. 48. — P. 1451–1455.
12. **Hsu, C. J.** Al–Al₃Ti nanocomposites produced in situ by friction stir processing / C. J. Hsu, C. Y. Chang, P. W. Kao // Acta Mater. — 2006. — Vol. 54. — P. 5241–5249.
13. **Ravi, K. R.** Optimization of mixing parameters through a water model for metal matrix composites synthesis / K. R. Ravi, V. M. Sreekumar, R. M. Pillai [et al.] // Material and Design. — 2007. — Vol. 28. — P. 871–881.
14. **Shorowordi, K. M.** Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC, and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study / K. M. Shorowordi, T. Laoui, A. S. M. A. Haseeb [et al.] // J. Mater. Process. Technol. — 2003. — Vol. 142. — P. 738–743.
15. **Kerti, I.** Microstructural variations in cast B₄C-reinforced aluminium matrix composites (AMCs) / I. Kerti, F. Toptan // Mater. Lett. — 2008. — Vol. 62. — P. 1215–1218.
16. **Surappa, M. K.** Microstructure evolution during solidification of DRMMC: state of art / M. K. Surappa // J. Mater. Process. Technol. — 1997. — Vol. 63. — P. 325–333.
17. **Mortensen, A.** Mechanical and physical behaviour of metals and ceramic compounds / A. Mortensen. — Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1988. — P. 141.
18. **Pai, B. C.** Effect of chemical and ultrasound treatment on the tensile properties of carbon fibers / B. C. Pai, K. G. Satyanarayana, P. S. Robi // Mater. Sci. Lett. — 1992. — Vol. 11. — P. 779–781.
19. **Kok, M.** Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites / M. Kok // J. Mater. Process. Technol. — 2005. — Vol. 161. — P. 381–387.
20. **Sharma, P.** Production of AMC by stir casting: an overview / P. Sharma, G. Chauhan, N. Sharma // International Journal of Contemporary Practices. — 2013. — Vol. 2, № 1. — P. 23–46.
21. **Sharma, P.** Metallurgical and mechanical characterization of Al6082–B₄C/Si₃N₄ hybrid composites manufactured by combined ball milling and stir casting / P. Sharma, D. Khanduja, S. Sharma // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 594. — P. 484–488.
22. **Sharma, P.** A study on microstructure of aluminium matrix composites / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // J. Asian Ceram. Soc. — 2015. — Vol. 3, № 3. — P. 240–244.
23. **Kumar, G. B. V.** Studies on mechanical and dry sliding wear of Al6061–SiC composites / G. B. V. Kumar, C. S. P. Rao, N. Selvaraj // Composite : Part B. — 2012. — Vol. 43. — P. 1185–1191.
24. **Sahin, Y.** Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites / Y. Sahin // Material and Design. — 2003. — Vol. 24. — P. 671–679.
25. **Sahin, Y.** Production and properties of SiC_p reinforced aluminium alloy composites / Y. Sahin, M. Acilar // Composite : Part A. — 2003. — Vol. 34. — P. 709–718.

26. **Aigbodion, V. S.** Effect of Silicon carbide reinforcement on microstructure and properties of cast Al-Si-Fe/SiC particulate composites / V. S. Aigbodion, S. B. Hassan // Mater. Sci. Eng. A. — 2007. — Vol. 447. — P. 355–360.
27. **Hassan, A. M.** Effect of graphite and/or silicon carbide particles addition on the hardness and surface roughness of Al – 4 wt. % Mg alloy / A. M. Hassan, G. M. Tashtoush, A. K. J. Ahmed // J. Compos. Mater. — 2007. — Vol. 41. — P. 453–465.
28. **Akhlaghi, F.** Influence of graphite content on dry sliding and oil impregnated sliding wear behaviour of Al2024-Gr composite produced by in situ powder metallurgy method / F. Akhlaghi, Z. A. Bidaki // Wear. — 2009. — Vol. 266. — P. 37–45.
29. **Baradeswaran, A.** Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites / A. Baradeswaran, A. E. Perumal // Composites : Part B. — 2014. — Vol. 56. — P. 472–476.
30. **Prashant, S. N.** Preparation and evaluation of mechanical and wear properties of 6061 Al reinforced with graphite particulate metal matrix composite / S. N. Prashant, N. Madeva, V. Auradi // Int. J. of Metallurgical & Materials Science and Engineering. — 2012. — Vol. 2, № 3. — P. 85–95.
31. **Sharma, P.** Effect of graphite reinforcement on physical and mechanical properties of aluminium metal matrix composites / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // Part. Sci. Technol. — 2016. — Vol. 34, № 1. — P. 1–6.
32. **Suresha, S.** Effect of silicon carbide particulates on wear resistance of graphitic aluminium matrix composites / S. Suresha, B. K. Sridhara // Material and Design. — 2010. — Vol. 31. — P. 4470–4477.
33. **Riahi, A. R.** The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites / A. R. Riahi, A. T. Alpas // Wear. — 2001. — Vol. 251. — P. 1396–1407.
34. **Basavarajappa, S.** Influence of sliding speed on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite / S. Basavarajappa, G. Chandramohan, M. Arjun [et al.] // Wear. — 2007. — Vol. 262. — P. 1007–1012.
35. **Rohatgi, P. K.** Wear and friction of cast aluminum-SiC-Gr composites: materials solutions, On wear of engineering materials proceedings / P. K. Rohatgi, R. Guo, J. K. Kim [et al.]. — Indianapolis, Indiana, 1997. — P. 205–211.
36. **Alidokht, S. A.** Microstructure and tribological performance of an aluminium based hybrid composite produced by friction stir processing / S. A. Alidokht, Z. A. Abdollah, S. Soleymani, H. Assadi // Material and Design. — 2011. — Vol. 32. — P. 2727–2733.
37. **Rohatgi, P. K.** Friction and wear of metal-matrix composites / P. K. Rohatgi, Y. Liu, S. Ray // ASM Handbook. — 2004. — Vol. 18. — P. 801–811.
38. **Suresh, S.** Effect of graphite addition on mechanical behavior of Al6061/TiB₂ hybrid composite using acoustic emission / S. Suresh, N. S. V. Moorthi, S. C. Vettivel, N. Selvakumar, G. R. Jinu // Mater. Sci. Eng. A. — 2014. — Vol. 612. — P. 16–27.
39. **Sharma, P.** Parametric study of dry sliding wear behavior of hybrid metal matrix composite produced by a novel process / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // Metall. Mater. Trans. A. — 2015. — Vol. 46, № 7. — P. 3260–3270.
40. **Sharma, P.** Dry sliding wear investigation of Al6082/Gr metal matrix composites by response surface methodology / P. Sharma, D. Khanduja, S. Sharma // Journal of Material Research and Technology. — 2016. — Vol. 5, № 1. — P. 29–36.
41. **Sharma, P.** Parametric study of dry sliding wear of aluminium metal matrix composites by response surface methodology / P. Sharma, D. Khanduja, S. Sharma // Material Today Proceedings. — 2015. — Vol. 2, № 4/5. — P. 2687–2697.
42. **Sharma, P.** Production of hybrid composite by a novel process and its physical comparison with single reinforced composites / P. Sharma, D. Khanduja, S. Sharma // Material Today Proceedings. — 2015. — Vol. 2, № 4/5. — P. 2698–2707.
43. **Sharma, P.** Production and some properties of Si₃N₄ reinforced aluminium alloy composites / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // J. Asian Ceram. Soc. — 2015. — Vol. 3, № 3. — P. 352–359.
44. **Hashim, J.** Metal matrix composites: production by the stir casting method / J. Hashim, L. Looney, M. S. J. Hashmi // J. Mater. Process. Technol. — 1999. — Vol. 92/93. — P. 1–7.
45. **Sevik, H.** Properties of alumina particulate reinforced aluminium alloy produced by pressure die casting / H. Sevik, K. S. Can // Material and Design. — 2006. — Vol. 27. — P. 676–683.
46. **Sajjadi, S. A.** Microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting / S. A. Sajjadi, H. R. Ezatpour, H. Beygi // In proceeding of 14th national conference on material science and engineering. — Tehran, Iran, 2010. — P. 325–332.
47. A.S.T.M. Standard E8, Standard test method for tension testing of metallic materials, West Conshohocken (USA), ASTM, International (2004).
48. **Sharma, P.** Production and characterization of AA6082-(Si₃N₄ + Gr) stir cast hybrid composites / P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja // Part. Sci. Technol. — 2016. — Vol. 35, № 2. — P. 158–165.
49. **Toptan, F.** Processing and microstructural characterization of AA1070 and AA 6063 matrix B₄C reinforced composites / F. Toptan, A. Kilicarslan, M. Cigdem, I. Kerti // Material and Design. — 2010. — Vol. 31. — P. 87–91. ■

Получено 28.06.17

© П. Шарма, В. Дабра, С. Шарма, Д. Хандуя,
Н. Шарма, Р. Шарма, К. Сайни, 2018 г.

Пер. — С. Н. Клявлиня
(ОАО «Комбинат «Магнезит»), 2018 г.