

УДК 539.382.2: 669-1  
DOI 10.17223/19988621/74/14

А.П. Хрусталёв, В.В. Платов, Н.И. Кахидзе, И.А. Жуков, А.Б. Ворожцов

### ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1550 В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ<sup>1</sup>

Исследовано влияние наночастиц вольфрама на структуру и механические свойства сплава 1550. С использованием методов оптической и растровой электронной микроскопии изучена структура композита 1550-W и исходного сплава. Введение 0.5 мас.% наночастиц вольфрама не модифицирует структуру алюминиевого сплава, но за счёт дисперсного упрочнения позволяет повысить показатели твёрдости и значения предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций до разрушения металлической матрицы.

**Ключевые слова:** *дисперсно-упрочнённые сплавы, наноразмерные частицы, структура, механические свойства, пластичность.*

Композиты с металлической матрицей на основе алюминия привлекательны для автомобильной и аэрокосмической промышленности благодаря сочетанию их физико-механических свойств и стойкости к окислению [1, 2]. Неметаллические материалы (оксиды, нитриды, карбиды, интерметаллиды) обычно используются в качестве упрочняющих частиц алюминиевых композитов. Упрочняющие частицы вводятся «ex-situ» методом [3], где упрочнитель синтезируется перед добавлением в матрицу, либо «in-situ» [4–6], где в матрицу вводятся материалы, реагирующие с матрицей для синтеза упрочняющих частиц. При использовании «ex-situ» метода возможно заранее задавать параметры дисперсности и фазового состава упрочняющих частиц, а для упрочнения как правило используются  $Al_2O_3$  [7, 8], SiC [9, 10],  $W_4C$  [11, 12] и другие неметаллические частицы. Наиболее эффективное упрочнение достигается при введении наночастиц, при этом они должны быть равномерно распределены в объёме алюминиевой матрицы и иметь с ней хорошую связь, которая сохранится во время движения дислокации. Авторами [13] был получен композит Al/ $Al_3Ti$ , модуль Юнга которого увеличился на 57% и составил 110 ГПа. Изготовление таких материалов возможно различными способами, однако технологии литья представляют собой наиболее универсальный и эффективный способ [14, 15]. При этом получение композитных материалов с помощью литья связано с рядом проблем, обусловленных агломерацией и флотацией частиц из-за плохой смачиваемости жидким расплавом [16–19]. В результате этого наблюдается снижение плотности композита, неоднородность структуры, что приводит к снижению его механических характеристик. Решение этой проблемы возможно несколькими способами: нанесением покрытий на частицы, повышающих смачиваемость [20], применением лигатур и воздействием внешних полей на металлический расплав.

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00060).

Алюминиевый сплав 1550 используется в основном в виде листового проката. Наибольшие показатели свойств данного сплава достигаются за счёт дисперсионного твердения при введении таких элементов, как цирконий или скандий [21–23]. Основным недостатком данного метода, является высокая стоимость, которая приводит к значительному удорожанию изделий. В ряде работ сообщается об использовании вольфрама для получения композитов на основе алюминия. В процессе литья возможно взаимодействие [24–27] металлического вольфрама с алюминиевой матрицей и образование интерметаллических соединений  $Al_4W$ ,  $Al_5W$  и  $Al_{12}W$ , а процесс будет совмещать «in-situ» и «ex-situ» методы в одной технологии. Механизм образования интерметаллического соединения во время обработки можно объяснить процессом диффузии [28].

В рамках данного исследования были использованы наночастицы вольфрама для изготовления алюминиевого композита. При этом известно, что вольфрам имеет высокую температуру плавления, высокую прочность и низкий коэффициент теплового расширения. Исследования таких материалов показывали значительное увеличение механических и электрических свойств алюминиевых сплавов [29]. Частицы вольфрама и интерметаллиды  $W-Al$  в алюминиевой матрице могут улучшить механические характеристики, такие, как прочность, стойкость к окислению и термическая стабильность по сравнению с исходным алюминием. Низкая растворимость вольфрама в алюминии и высокая реакционная способность позволяют получить алюминиевый композит, упрочнённый наночастицами.

Таким образом, цель работы: исследование влияния наночастиц вольфрама на структуру и механические свойства алюминиевого сплава  $Al-Mg$  после литья.

### Материалы и методы исследований

В качестве исходного сплава использован алюминиевый сплав 1550 (91.9–94.68%  $Al$ , 4.8–5.8%  $Mg$ ). 1 кг сплава 1550 помещали в тигель, расплавляли в муфельной печи (780 °C) и выдерживали в течение двух часов. Затем тигель с помощью захвата извлекали из печи и вводили порошок вольфрама при температуре расплава 730 °C с последующим воздействием механического смесителя, вращающегося со скоростью 500 об/мин в течение 30 с. При температуре 720 °C расплав заливался в стальной кокиль, установленный на вибростол, совершающем колебания с частотой 60 Гц и амплитудой 0.5 мм. Исходный сплав 1550 был получен при аналогичных условиях без введения наночастиц вольфрама.

Структура материалов исследована методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Quanta 200 3D и методом оптической микроскопии на микроскопе Olympus GX71. Дисперсность частиц исследована с использованием полученных изображений методом случайных секущих. Механические испытания проведены на универсальной испытательной машине Instron 3369 со скоростью движения траверсы 0.2 мм/мин. Образцы вырезались из отливок при помощи электроэрозионной резки и представляли собой плоские лопатки, толщиной 2 мм с соотношением ширины рабочей части и места захвата  $\geq 1.5$ . Испытания проводились согласно ASTM B557–15.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены РЭМ (рис. 1, а) и ПЭМ (рис. 1, б) изображения нанопорошка вольфрама, полученного методом электрического взрыва проводника. Частицы в порошке имеют правильную сферическую форму, а их средний размер

составляет 200 нм. В порошке наблюдаются крупные частицы, размер которых достигает 10 мкм, что связано с особенностями получения порошка в процессе электрического взрыва в камере.

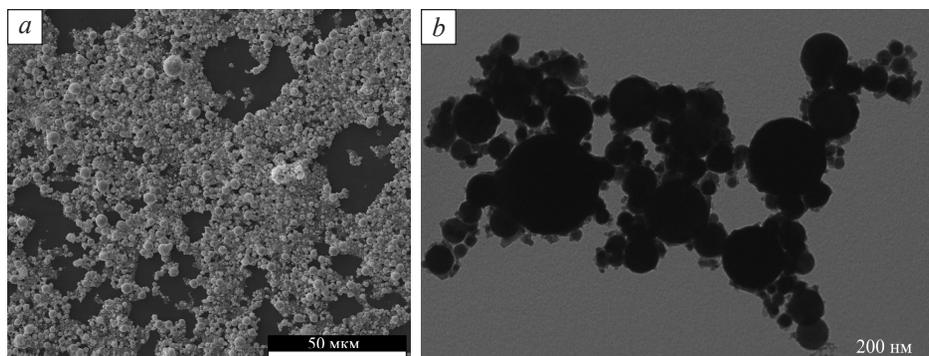


Рис. 1. РЭМ (a) и ПЭМ (b) изображения нанопорошка вольфрама

Fig. 1. SEM (a) and TEM (b) images of a tungsten nanopowder

На рис. 2 представлены оптические изображения микроструктуры полученных сплавов.

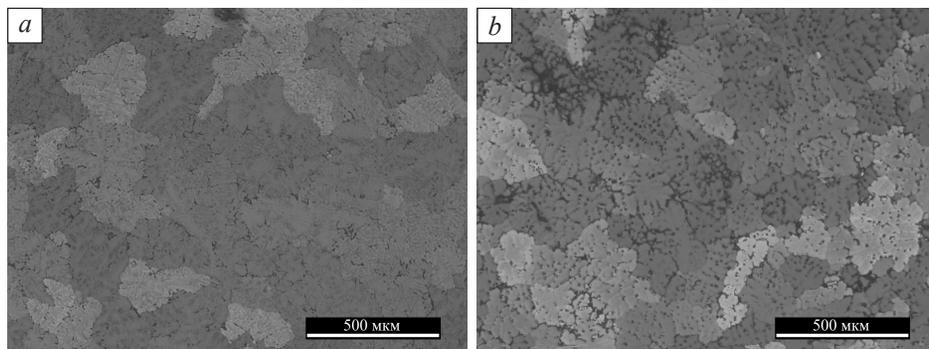


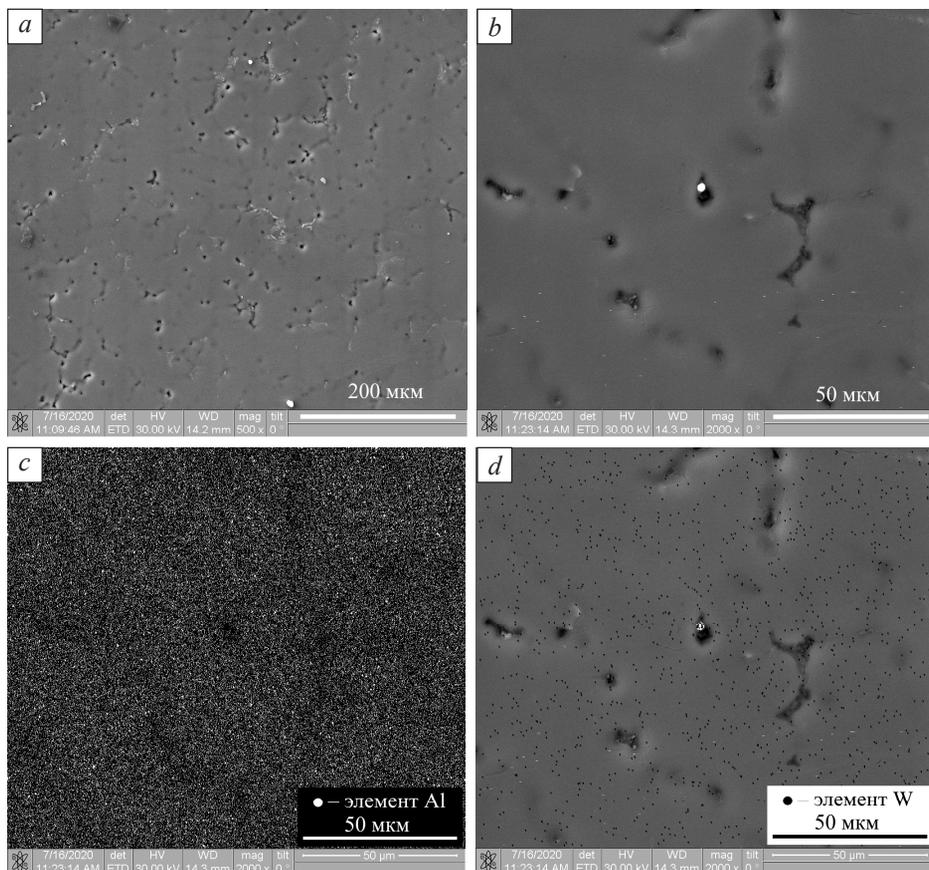
Рис. 2. Оптические изображения микроструктуры сплавов 1550 (a) и 1550-W (b)

Fig. 2. Optical images of a microstructure of (a) 1550 and (b) 1550-W alloys

Наночастицы вольфрама не оказывают модифицирующего воздействия на структуру сплава 1550, средний размер которого составил около 180 мкм. При этом видно, что структура сплавов достаточно однородная с равноосными зёрнами. В структуре сплавов присутствуют поры, однако пористость сплавов не превышает 5%. Известно, что вольфрам реагирует с алюминием и возможно образование интерметаллидов Al-W. На рис. 3 представлены РЭМ-изображения сплава 1550-W с результатами картирования по элементам.

В структуре сплава 1550-W видны включения пор размером не более 1 мкм. При этом структура сплава достаточно однородная, без видимого скопления пор и агломератов наночастиц вольфрама (рис. 3, a). При этом в некоторых порах наблюдаются микрочастицы вольфрама (рис. 3, b), которые появляются в них из-за влияния фронта кристаллизации, который вытесняет их в газовые полости сплава.

Картирование по элементам (рис. 3, *c, d*) показало, что вольфрам распределён равномерно в алюминиевой матрице.



**Рис. 3.** РЭМ-изображения 1550-W (*a, b*) и результаты картирования по элементам (*c, d*)  
**Fig. 3.** (*a, b*) SEM images of the 1550-W alloy and (*c, d*) elemental mapping results

Диаграммы нагружения и характеристики полученных сплавов представлены на рис. 4 и в таблице соответственно.

Из диаграммы нагружения полученных сплавов (рис. 4) видно, что введение в сплав наночастиц вольфрама приводит к увеличению значений предела текучести и максимальных деформаций до разрушения сплава 1550. Введение 0.5 мас.% наночастиц вольфрама приводит к увеличению значений предела текучести с 52 до 79 МПа и максимальных деформаций до разрушения с 1.9 до 5.5%. Также наблюдается незначительное увеличение значений предела прочности с 140 до 155 МПа. Авторы [30] наблюдали аналогичную зависимость для алюминиевого сплава, когда увеличиваются значения предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций. Предполагается, что введение частиц в тело зерна может привести к отклонению потенциальной трещины от границы зерна в его объем, а также к большему вовлечению металлической матрицы в процесс деформации и разрушения [31, 32]. Кроме этого, введение наночастиц вольфрама приводит

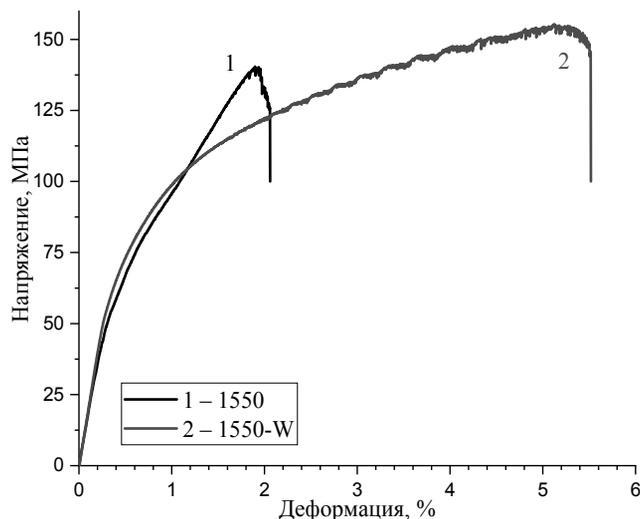


Рис. 4. Диаграммы растяжения алюминиевых сплавов: 1550 (1) и 1550-W (2)  
 Fig. 4. Tensile diagrams for aluminum alloys: (1) 1550 and (2) 1550-W

#### Структурные и механические характеристики полученных сплавов

Сплав	Размер зерна, мкм	Твёрдость, НВ	Микротвёрдость, НВ	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon_{max}$ , %
1550	$250 \pm 17$	$58.8 \pm 3$	$67.4 \pm 11.2$	$52.5 \pm 3$	$140 \pm 7.6$	$1.9 \pm 0.8$
1550-0.5 W	$158 \pm 26$	$63.7 \pm 1.1$	$85.7 \pm 14.4$	$79.4 \pm 1.6$	$155.4 \pm 6$	$5.5 \pm 1.13$

к увеличению твёрдости и микротвёрдости (таблица) сплава 1550 с 58 до 63 НВ и с 67 до 85 НВ соответственно. Основываясь на данных микроструктуры (рис. 2), можно предположить, что увеличение механических характеристик происходит за счёт механизмов Орована [33, 34], разности коэффициентов теплового расширения (КТР) матрицы и частиц [35] и передачи нагрузки от частиц к матрице [36]. Механизм передачи нагрузки от частиц к матрице можно оценить с использованием формулы

$$\sigma_{load} = 0.5V_p\sigma_m, \quad (1)$$

где  $V_p$  – объёмное содержание наночастиц вольфрама, а  $\sigma_m$  – предел текучести матрицы (52.5 МПа).

Вклад механизма передачи нагрузки от частиц к матрице в данном случае составил 1.83 МПа. Это обусловлено высокой плотностью вольфрама ( $19.25 \text{ г/см}^3$ ), объёмное содержание которого в сплаве не превышает 0.07 об. %. При этом такой массовый процент частиц в сплаве, как правило, используется при модифицировании алюминиевых сплавов, например микрочастицами  $\text{TiB}_2$  [37], в результате чего происходит измельчение зерна сплава.

Вклад механизма Орована рассчитывается по формуле

$$\sigma_{OR} = \frac{0.13bG_m}{\lambda} \ln \frac{d_p}{2b}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – значение, учитывающее размер и объёмное содержание частиц, которое рассчитывается как

$$\lambda = d_p \left( \left( \frac{1}{2V_p} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right), \quad (3)$$

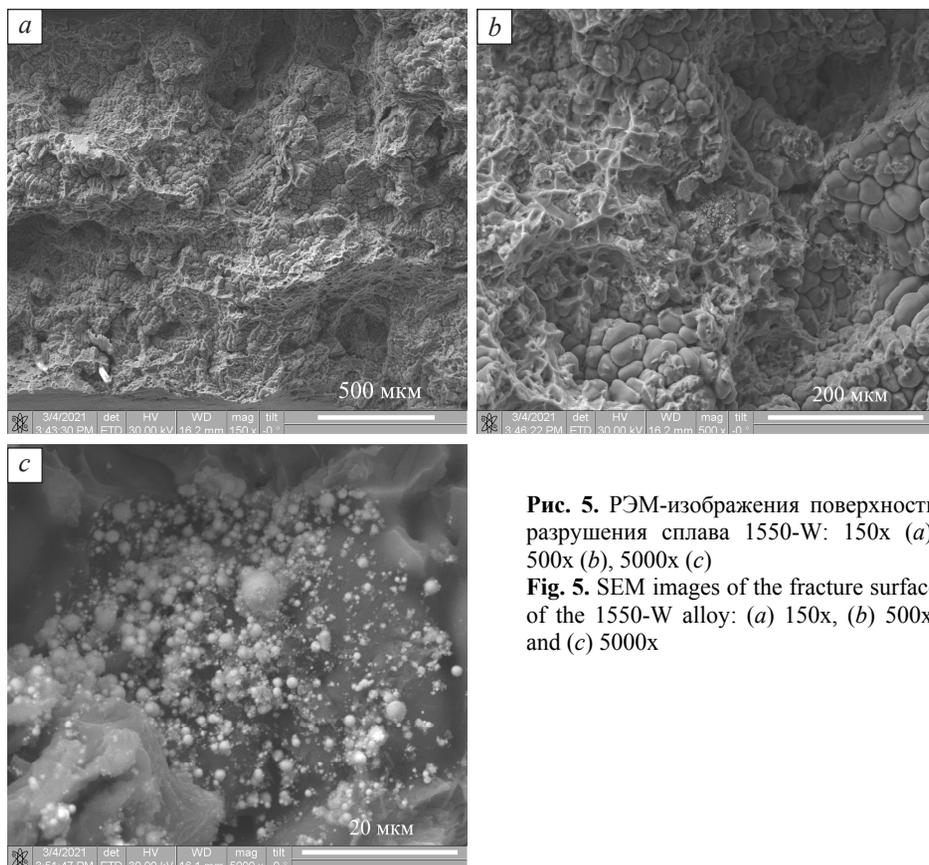
где  $b$  – вектор Бюргерса;  $G_m$  – модуль сдвига;  $d_p$  – диаметр наночастиц.

Рассчитанный вклад наночастиц вольфрама в механические свойства сплава 1550 по механизму Орована составил 30.5 МПа. Вклад механизма разности КТР матрицы и частиц рассчитывается по формуле

$$\Delta\sigma_{\text{СТЕ}} = \beta G b \left( \frac{12(a_m - a_p)\Delta T V_p}{b l_p (1 - V_p)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $l_p$  – расстояние между частицами;  $\beta$  – константа ( $\sim 1.25$ );  $a_m$  – КТР матрицы ( $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ );  $a_p$  – КТР частиц;  $\Delta T$  – разность между температурой синтеза ( $725 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и комнатной температурой ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Несмотря на то, что вольфрам имеет более низкий КТР по сравнению с алюминиевой матрицей, расчёт вклада данного механизма невозможен из-за малого объёмного содержания наночастиц, что свидетельствует о доминирующем действии механизма Орована в увеличении механических свойств сплава. Исследования поверхности разрушения сплавов 1550-W (рис. 5) позволили выявить наночастицы вольфрама в структуре алюминиевого сплава.



**Рис. 5.** РЭМ-изображения поверхности разрушения сплава 1550-W: 150x (a), 500x (b), 5000x (c)

**Fig. 5.** SEM images of the fracture surface of the 1550-W alloy: (a) 150x, (b) 500x, and (c) 5000x

В целом разрушение сплава 1550-W (рис. 5, *a*) имеет явно выраженное разрушение по вязкому транскристаллитному механизму. На поверхности дендритов (рис. 5, *b*) отсутствуют частицы вольфрама и их агломераты, что свидетельствует о малом количестве упрочнителей, находящихся в микропорах сплава, как было показано на рис. 3, *a*. Стоит отметить, что при исследовании структуры на оптическом микроскопе в сплаве 1550-W были определены участки с дефектами (рис. 2, *b*), которые, по всей видимости, результат не полностью однородного распределения наночастиц вольфрама в сплаве: в объёме слитка присутствуют скопления отдельных наночастиц и их агломератов (рис. 5, *c*).

Процесс получения алюминиевого сплава требует оптимизации для более равномерного распределения наночастиц. Кроме этого, важным является исследование влияния объёмного содержания «тяжёлых» наночастиц вольфрама на изменение механических свойств алюминиевого сплава 1550.

### Заключение

Установлено, что наночастицы вольфрама не позволяют измельчать размер зерна алюминиевого сплава 1550, средний размер которого составил 180 мкм.

Введение наночастиц вольфрама позволило повысить показатели твёрдости и микротвёрдости сплава с 58 до 63 НВ и с 67 до 85 НV соответственно, значения предела текучести с 52 до 79 МПа, предела прочности со 140 до 155 МПа и максимальной деформаций до разрушения с 1.9 до 5.5%. С использованием расчётных данных показано, что доминирующим механизмом увеличения механических свойств является механизм Орована. На основе фрактографических исследований установлено, что наночастицы вольфрама неравномерно распределены в объёме сплава, а дополнительная оптимизация процесса введения наночастиц и литья сплава должна позволить улучшить прочностные свойства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kawazoe M., Shibata T., Mukai T., Higashi K. Elevated temperature mechanical properties of A 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion // *Scripta Materialia*. 1997. V. 36(6). P. 699–705. DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00446-0.
2. Jones R.H. The influence of hydrogen on the stress-corrosion cracking of low-strength Al-Mg alloys // *JOM*. 2003. V. 55(2). P. 42–46. DOI: 10.1007/s11837-003-0225-5.
3. Kannan C., Ramanujam R. Advanced liquid state processing techniques for ex-situ discontinuous particle reinforced nanocomposites: A review // *Science and Technology of Materials*. 2018. V. 30(2). P. 109–119. DOI: 10.1016/j.stmat.2018.05.005.
4. Meti V.K.V., Shirur S., Nampoothiri J., Ravi K.R., Siddhalingeshwar I.G. Synthesis, characterization and mechanical properties of AA7075 based MMCs reinforced with TiB<sub>2</sub> particles processed through ultrasound assisted in-situ casting technique // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018. V. 71(4). P. 841–848. DOI: 10.1007/s12666-017-1216-5.
5. Basak A.K., Pramanik A., Prakash C. Deformation and strengthening of SiC reinforced Al-MMCs during in-situ micro-pillar compression // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. V. 763. Article 138141. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138141.
6. Jafari H., Idris M.H., Ourdjini A., Abdul Kadir M.R. An investigation on interfacial reaction between in-situ melted AZ91D magnesium alloy and ceramic shell mold during investment casting process // *Materials Chemistry and Physics*. 2013. V. 138(2–3). P. 672–681. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.12.037.
7. Tahamtan S., Halvaeae A., Emamy M., Zabihi M.S. Fabrication of Al/A206–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology // *Materials & Design*. 2013. V. 49. P. 347–359. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.01.032.

8. Hosseini N., Karimzadeh F., Abbasi M.H., Enayati M.H. Tribological properties of Al6061–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite prepared by milling and hot pressing // *Materials & Design*. 2010. V. 31(10). P. 4777–4785. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.001.
9. Adeosun S.O., Akpan E.I., Gbenezor O.P., Balogun S.A. Ductility and hardness of chloride cleaned AA6011/SiCp composites // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. V. 26(2). P. 339–347. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64124-9.
10. Goyal H., Mandal N., Roy H., Mitra S.K., Mondal B. Multi response optimization for processing Al–SiCp composites: An approach towards enhancement of mechanical properties // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015. V. 68(3). P. 453–463. DOI: 10.1007/s12666-014-0476-6.
11. Abdizadeh H., Baghchesara M.A. Optimized parameters for enhanced properties in Al–B<sub>4</sub>C composite // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. V. 43. P. 4475–4485. DOI: 10.1007/s13369-017-2929-9.
12. Khademian M., Alizadeh A., Abdollahi A. Fabrication and characterization of hot rolled and hot extruded boron carbide (B<sub>4</sub>C) reinforced A356 aluminum alloy matrix composites produced by stir casting method // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017. V. 70(6). P. 1635–1646. DOI: 10.1007/s12666-016-0962-0.
13. Sun Z., Hashimoto H., Wang Q., Park Y., Abe T. Synthesis of Al–Al<sub>3</sub>Ti composites using pulse discharge sintering process // *Materials Transactions, JIM*. 2000. V. 41(5). P. 597–600. DOI: 10.2320/matertrans1989.41.597.
14. Akbari M.K., Baharvandi H.R., Shirvanimoghaddam K. Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB<sub>2</sub> particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites // *Materials and Design*. 2015. V. 66. P. 150–161. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.048.
15. Katsarou L., Mounib M., Lefebvre W., Vorozhtsov S., Pavese M., Badini C., Molina-Aldareguia J.M., Jimenez C.C., Pérez Prado M.T., Dieringa H. Microstructure, mechanical properties and creep of magnesium alloy Elektron21 reinforced with AlN nanoparticles by ultrasound-assisted stirring // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. V. 659. P. 84–92. DOI: 10.1016/j.msea.2016.02.042.
16. Sreekumar V.M., Babu N.H., Eskin D.G. Prospects of in-situ  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an inoculant in aluminum: A feasibility study // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. V. 26(9). P. 4166–4176. DOI: 10.1007/s11665-017-2853-x.
17. Dieringa H. Properties of magnesium alloys reinforced with nanoparticles and carbon nanotubes: A review // *Journal of Materials Science*. 2011. V. 46(2). pp. 289–306. DOI: 10.1007/s10853-010-5010-6.
18. Puga H., Costa S., Barbosa J., Ribeiro S., Prokic M. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub> alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. V. 211(11). P. 1729–1735. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.012.
19. Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalev A.P., Vorozhtsov S.A. Ultrasonic effect on the penetration of the metallic melt into submicron particles and their agglomerates // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017. V. 58(4). P. 427–433. DOI: 10.3103/S1067821217040101.
20. Zhang F., Jacobi A.M. Aluminum surface wettability changes by pool boiling of nanofluids // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2016. V. 506. P. 438–444. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2016.07.026.
21. Lee S., Utsunomiya A., Akamatsu H., Neishi K., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al–Mg alloys // *Acta Materialia*. 2002. V. 50(3). P. 553–564. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00368-8.
22. Filatov Y.A., Yelagin V.I., Zakharov V.V. New Al–Mg–Sc alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. V. 280(1). P. 97–101. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00673-5.
23. Ahmad Z. The properties and application of scandium-reinforced aluminum // *JOM*. 2003. V. 55(2). P. 35–39. DOI: 10.1007/s11837-003-0224-6.

24. *Krishnan B.P., Surappa M.K., Rohatgi P.K.* The UPAL process: A direct method of preparing cast aluminium alloy-graphite particle composites // *Journal of Materials Science*. 1981. V. 16. P. 1209–1216. DOI: 10.1007/BF01033834.
25. *Javdani A., Pouyafar V., Ameli A., Volinsky A.A.* Blended powder semisolid forming of Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites: Investigation of microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. 2016. V. 109. P. 57–67. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.042.
26. *Cao X., Shi Q., Liu D., Feng Z., Liu Q., Chen G.* Fabrication of in situ carbon fiber/aluminum composites via friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and tribological behaviors // *Composites Part B*. 2018. V. 139. P. 97–105. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.001.
27. *Singh R., Singh R., Dureja J.S., Farina I., Fabbrocino F.* Investigations for dimensional accuracy of Al alloy/Al-MMC developed by combining stir casting and ABS replica based investment casting // *Composites Part B: Engineering*. 2017. V. 115. P. 203–208. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.008.
28. *Philofsky E.* Intermetallic formation in gold-aluminum systems // *Solid-State Electron*. 1970. V. 13(10). P. 1391–1394 DOI: 10.1016/0038-1101(70)90172-3.
29. *Dixit S., Kashyap S., Kailas S.V., Chattopadhyaya K.* Manufacturing of high strength aluminium composites reinforced with nano tungsten particles for electrical application and investigation on in-situ reaction during processing // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 767. P. 1072–1082. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.110.
30. *Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Zhukov I.A., Platov V.V., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov A.B.* Influence of vibration treatment and modification of A356 aluminum alloy on its structure and mechanical properties // *Metals*. 2019. V. 9(1). Article 87. P. 1–9. DOI: 10.3390/met9010087.
31. *Dieringa H., Katsarou L., Buzolin R., Szakács G., Horstmann M., Wolff M., Mendis C., Vorozhtsov S., StJohn D.* Ultrasound assisted casting of an AM60 based metal matrix nanocomposite, its properties, and recyclability // *Metals*. 2017. V. 7(10). Article 388. P. 1–13. DOI: 10.3390/met7100388.
32. *Belov N.A.* Effect of eutectic phases on the fracture behavior of high-strength castable aluminum alloys // *Metal Science and Heat Treatment*. 1995. V. 37(5–6). P. 237–242. DOI: 10.1007/BF01152226.
33. *Zhang Z., Chen D.L.* Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // *Materials Science and Engineering: A*. 2008. V. 483–484. P. 148–152. DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.184.
34. *Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M.* Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on 1055 processing, mechanical and wear properties // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. V. 59. P. 131–152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010.
35. *Sreekumar V.M., Babu N.H., Eskin D.G., Fan Z.* Structure–property analysis of in-situ Al–MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> metal matrix composites synthesized using ultrasonic cavitation // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 628. P. 30–40. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.029.
36. *Ramakrishnan N.* An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites // *Acta Materialia*. 1996. V. 44(1). P. 69–77. DOI: 10.1016/1359-6454(95)00150-9.
37. *Khrustalyov A.P., Kozulin A.A., Zhukov I.A., Khmeleva M.G., Vorozhtsov A.B., Eskin D., Chankitmongkong S., Platov V.V., Vasilyev S.V.* Influence of titanium diboride particle size on structure and mechanical properties of an Al-Mg alloy // *Metals*. 2019. V. 9(10). Article 1030. P. 1–14. DOI: 10.3390/met9101030.

Khrustalyov A.P., Platon V.V., Kakhidze N.I., Zhukov I.A., Vorozhtsov A.B. (2021) INFLUENCE OF TUNGSTEN NANOPARTICLES ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF THE 1550 ALUMINUM ALLOY UNDER QUASI-STATIC LOADING. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 74. pp. 141–153

DOI 10.17223/19988621/74/14

Keywords: dispersion-hardened alloys, nanosized particles, structure, mechanical properties, ductility.

Aluminum alloys are widely used in industry due to such parameters as low cost, high corrosion resistance, low density, and good weldability. In this regard, new aluminum alloys with improved strength and operational properties are needed. At present, it is important to increase strength properties of aluminum alloys by introducing into their melt high-melting high-modulus nano- and microparticles that can significantly refine the grain structure and contribute to the stress-strain state. As a rule, in works on the introduction of pre-synthesized refractory dispersed particles into aluminum melts, non-metallic materials, such as oxides, nitrides, carbides, and intermetallic compounds, are used. However, the effect of high-melting tungsten particles on the structure and physical and mechanical properties of aluminum alloys has been insufficiently studied.

The paper investigates the effect of tungsten nanoparticles on the structure and mechanical properties of an AA5056 alloy. The structures of the AA5056-W composite and initial alloy are studied by means of optical and scanning electron microscopy. Introduction of 0.5 wt% tungsten nanoparticles does not modify the structure of the aluminum alloy, but due to dispersed hardening, it increases the hardness, yield stress, ultimate strength, and maximum deformation before metal matrix destruction.

**Financial support.** This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-79-00060).

*Anton P.* KHRUSTALYOV (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tofik0014@gmail.com

*Vladimir V.* PLATOV (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vova.platov.85@mail.ru

*Nikolay I.* KAKHIDZE (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kakhidze.n@yandex.ru

*Il'ya A.* ZHUKOV (Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

*Aleksandr B.* VOROZHTSOV (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv1953@mail.ru

#### REFERENCES

1. Kawazoe M., Shibata T., Mukai T., Higashi K. (1997) Elevated temperature mechanical properties of a 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion. *Scripta Materialia*. 36(6). pp. 699–705. DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00446-0.
2. Jones R.H. (2003) The influence of hydrogen on the stress-corrosion cracking of low-strength Al-Mg alloys. *JOM*. 55(2). pp. 42–46. DOI: 10.1007/s11837-003-0225-5.
3. Kannan C., Ramanujam R. (2018) Advanced liquid state processing techniques for ex-situ discontinuous particle reinforced nanocomposites: a review. *Science and Technology of Materials*. 30(2). pp. 109–119. DOI: 10.1016/j.stmat.2018.05.005.

4. Meti V.K.V., Shirur S., Nampoothiri J., Ravi K.R., Siddhalingeswar I.G. (2018) Synthesis, characterization and mechanical properties of AA7075 based MMCs reinforced with TiB<sub>2</sub> particles processed through ultrasound assisted in-situ casting technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 71(4). pp. 841–848. DOI: 10.1007/s12666-017-1216-5.
5. Basak A.K., Pramanik A., Prakash C. (2019) Deformation and strengthening of SiC reinforced Al-MMCs during in-situ micro-pillar compression. *Materials Science and Engineering: A*. 763. Article 138141. pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138141.
6. Jafari H., Idris M.H., Ourdjini A., Abdul Kadir M.R. (2013) An investigation on interfacial reaction between in-situ melted AZ91D magnesium alloy and ceramic shell mold during investment casting process. *Materials Chemistry and Physics*. 138(2-3). pp. 672–681. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.12.037.
7. Tahamtan S., Halvae A., Emamy M., Zabihi M.S. (2013) Fabrication of Al/A206–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology. *Materials & Design*. 49. pp. 347–359. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.01.032.
8. Hosseini N., Karimzadeh F., Abbasi M.H., Enayati M.H. (2010) Tribological properties of Al6061–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite prepared by milling and hot pressing. *Materials & Design*. 31(10). pp. 4777–4785. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.001.
9. Adeosun S.O., Akpan E.I., Gbenedor O.P., Balogun S.A. (2016) Ductility and hardness of chloride cleaned AA6011/SiCp composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 26(2). pp. 339–347. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64124-9.
10. Goyal H., Mandal N., Roy H., Mitra S.K., Mondal B. (2015) Multi response optimization for processing Al–SiCp composites: An approach towards enhancement of mechanical properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 68(3). pp. 453–463. DOI: 10.1007/s12666-014-0476-6.
11. Abdizadeh H., Baghchesara M.A. (2018) Optimized parameters for enhanced properties in Al–B<sub>4</sub>C composite. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 43. pp. 4475–4485. DOI: 10.1007/s13369-017-2929-9.
12. Khademian M., Alizadeh A., Abdollahi A. (2017) Fabrication and characterization of hot rolled and hot extruded boron carbide (B<sub>4</sub>C) reinforced A356 aluminum alloy matrix composites produced by stir casting method. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 70(6). pp. 1635–1646. DOI: 10.1007/s12666-016-0962-0.
13. Sun Z., Hashimoto H., Wang Q., Park Y., Abe T. (2000) Synthesis of Al–Al<sub>3</sub>Ti composites using pulse discharge sintering process. *Materials Transactions, JIM*. 41(5). pp. 597–600. DOI: 10.2320/matertrans1989.41.597.
14. Akbari M.K., Baharvandi H.R., Shirvanimoghaddam K. (2015) Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB<sub>2</sub> particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites. *Materials and Design*. 66. pp. 150–161. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.048.
15. Katsarou L., Mounib M., Lefebvre W., Vorozhtsov S., Pavese M., Badini C., Molina-Aldareguia J.M., Jimenez C.C., Pérez Prado M.T., Dieringa H. (2016) Microstructure, mechanical properties and creep of magnesium alloy Elektron21 reinforced with AlN nanoparticles by ultrasound-assisted stirring. *Materials Science and Engineering: A*. 659. pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.msea.2016.02.042.
16. Sreekumar V.M., Babu N.H., Eskin D.G. (2017) Prospects of in-situ  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an inoculant in aluminum: a feasibility study. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 26(9). pp. 4166–4176. DOI: 10.1007/s11665-017-2853-x.
17. Dieringa H. (2011) Properties of magnesium alloys reinforced with nanoparticles and carbon nanotubes: a review. *Journal of Materials Science*. 46(2). pp. 289–306. DOI: 10.1007/s10853-010-5010-6.
18. Puga H., Costa S., Barbosa J., Ribeiro S., Prokic M. (2011) Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 211(11). pp. 1729–1735. DOI: 10.1016/j.jmatprot.2011.05.012.
19. Kudryashova O.B., Eskin D.G., Khrustalev A.P., Vorozhtsov S.A. (2017) Ultrasonic effect on the penetration of the metallic melt into submicron particles and their agglomerates. *Rus-*

- sian Journal of Non-Ferrous Metals*. 58(4). pp. 427–433. DOI: 10.3103/S1067821217040101.
20. Zhang F., Jacobi A.M. (2016) Aluminum surface wettability changes by pool boiling of nanofluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 506. pp. 438–444. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2016.07.026.
  21. Lee S., Utsunomiya A., Akamatsu H., Neishi K., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. (2002) Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al–Mg alloys. *Acta Materialia*. 50(3). pp. 553–564. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00368-8.
  22. Filatov Y.A., Yelagin V.I., Zakharov V.V. (2000) New Al–Mg–Sc alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 280(1). pp. 97–101. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00673-5.
  23. Ahmad Z. (2003) The properties and application of scandium-reinforced aluminum. *JOM*. 55(2). pp 35–39. DOI: 10.1007/s11837-003-0224-6.
  24. Krishnan B.P., Surappa M.K., Rohatgi P.K. (1981) The UPAL process: A direct method of preparing cast aluminium alloy-graphite particle composites. *Journal of Materials Science*. 16. pp. 1209–1216. DOI: 10.1007/BF01033834.
  25. Javdani A., Pouyafar V., Ameli A., Volinsky A.A. (2016) Blended powder semisolid forming of Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites: Investigation of microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 109. pp. 57–67. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.042.
  26. Cao X., Shi Q., Liu D., Feng Z., Liu Q., Chen G. (2018) Fabrication of in situ carbon fiber/aluminum composites via friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and tribological behaviors. *Composites Part B*. 139. pp. 97–105. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.001.
  27. Singh R., Singh R., Dureja J.S., Farina I., Fabbrocino F. (2017) Investigations for dimensional accuracy of Al alloy/Al-MMC developed by combining stir casting and ABS replica based investment casting. *Composites Part B: Engineering*. 115. pp. 203–208. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.008.
  28. Philofsky E. (1970) Intermetallic formation in gold-aluminum systems. *Solid-State Electron*. 13(10). pp. 1391–1394 DOI: 10.1016/0038-1101(70)90172-3.
  29. Dixit S., Kashyap S., Kailas S.V. Chattopadhyaya K. (2018) Manufacturing of high strength aluminium composites reinforced with nano tungsten particles for electrical application and investigation on in-situ reaction during processing. *Journal of Alloys and Compounds*. 767. pp. 1072–1082. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.110.
  30. Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Zhukov I.A., Platov V.V., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov A.B. (2019) Influence of vibration treatment and modification of A356 aluminum alloy on its structure and mechanical properties. *Metals*. 9(1). Article 87. pp. 1–9. DOI: 10.3390/met9010087.
  31. Dieringa H., Katsarou L., Buzolin R., Szakács G., Horstmann M., Wolff M., Mendis C., Vorozhtsov S., StJohn D. (2017) Ultrasound assisted casting of an AM60 based metal matrix nanocomposite, its properties, and recyclability. *Metals*. 7(10). Article 388. pp. 1–13. DOI: 10.3390/met7100388.
  32. Belov N.A. (1995) Effect of eutectic phases on the fracture behavior of high-strength castable aluminum alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 37(5-6). pp. 237–242. DOI: 10.1007/BF01152226.
  33. Zhang Z., Chen D.L. (2008) Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*. 483–484. pp. 148–152. DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.184.
  34. Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M. (2020) Recent progress in aluminum metal matrix composites: a review on 1055 processing, mechanical and wear properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 59. pp. 131–152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010.
  35. Sreekumar V.M., Babu N.H., Eskin D.G., Fan Z. (2015) Structure–property analysis of in-situ Al–MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> metal matrix composites synthesized using ultrasonic cavitation. *Materials Science and Engineering: A*. 628. pp. 30–40. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.029.

36. Ramakrishnan N. (1996) An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites. *Acta Materialia*. 44(1). pp. 69–77. DOI: 10.1016/1359-6454(95)00150-9.
37. Khrustalyov A.P., Kozulin A.A., Zhukov I.A., Khmeleva M.G., Vorozhtsov A.B., Eskin D., Chankitmongkong S., Platov V.V., Vasilyev S.V. (2019) Influence of titanium diboride particle size on structure and mechanical properties of an Al-Mg alloy. *Metals*. 9(10). Article 1030. pp. 1–14. DOI: 10.3390/met9101030.

Received: May 05, 2021