

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2022»**

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции
23– 25 ноября 2022 г.***

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

Библиографический список

1. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. No. 1-4. P. 893-901.
2. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 1. P. 5-12.
3. Tomczak, J., Pater, Z., Bulzak, T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 1. pp. 5-12.
4. Баранов, Н. А. Производство мелющих шаров из рельсовой стали / Н. А. Баранов, О. Н. Тулупов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 96-99.
5. Ефременко, В. Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц / В. Г. Ефременко // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2000. – №9. – С. 89-91.
6. Уманский, А.А. Исследование влияния макро- и микроструктуры стальных помольных шаров на их ударную стойкость / Уманский А. А., Головатенко А. В., Осколкова Т. Н. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 283-289.
7. Сталинский Д.В. Выбор материала и технологий термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа / Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк, В.К. Солёный // Сталь. 2017. №6. С. 64-69.

УДК 669.715.017

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА

**Хамид. Махан М.^{1,2}, Коновалов С.В.³, Куценко А.А.³,
Цветков А.В.³, Панченко И.А.³**

¹*Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С.П. Королева, г. Самара, Россия*

²*Средний технический университет, Технический институт Бакуба,
г. Дивала, Ирак*

³*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, konovalov@sibsiu.ru*

Аннотация. В данном исследовании мы упрочняли алюминиевый сплав 2024 различными массовыми долями наночастиц диоксида титана методом

литья с перемешиванием с последующей термической обработкой. Основная цель заключалась в изучении влияния добавки наночастиц TiO_2 на микроструктуру и механические свойства композита из алюминиевого сплава 2024. СЭМ, РСА, энергодисперсионный анализ позволили охарактеризовать микроструктуру, элементный и фазовый состав образцов.

Ключевые слова: Композиты с металлической матрицей, наночастицы, алюминиевая матрица, диоксид титана, закалка, старение.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN ALUMINUM ALLOY WITH TITANIUM DIOXIDE ADDITIVES

Hamid. M. Mahan^{1,2}, Konovalov S.V.³, Kutsenko A.A.³,
Tsvetkov A.V.³, Panchenko I.A.³

¹*Samara National Research University, Samara, Russia*

²*Middle Technical University, Baqubah Technical Institute,
Divala, Iraq.*

³*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, konovalov@sibsiu.ru*

Abstract. In this study, we strengthened 2024 aluminum alloy with various mass fractions of titanium dioxide nanoparticles by stir casting followed by heat treatment. The main goal was to study the effect of adding TiO_2 nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of a 2024 aluminum alloy composite. SEM, XRD, and energy dispersive analysis made it possible to characterize the microstructure, elemental, and phase composition of the samples.

Key words: Metal matrix composites, nanoparticles, aluminum matrix, titanium dioxide, quenching, aging.

Одним из наиболее сложных аспектов производства прочных, легких и недорогих инженерных материалов является получение высокого отношения прочности к весу, подходящего для транспортных средств [1]. Глобальная потребность в таких изделиях для автомобильной и аэрокосмической промышленности привлекла внимание исследователей в области композиционных материалов [2-3]. Благодаря превосходным механическим свойствам композиты с алюминиевой матрицей представляют собой передовые материалы, сочетающие в себе характеристики легкого и прочного матричного материала с твердым керамическим армированием [4]. Они удовлетворяют потребность рынка в легких, прочных и высокопроизводительных компонентах [5-6].

Традиционно наиболее распространенными керамическими армирующими элементами, используемыми в последние несколько десятилетий, являются карбиды (SiC , TiC), оксиды (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2) и нитриды (TiN , AlN) [7,8]. В работе [9] показано, что добавление 10 мас. % SiC и 5 мас. % наночастиц Al_2O_3 в алюминиевый сплав 7075-T651 увеличивает усталостную проч-

ность на 13 % по сравнению с основным металлом. Наличие наночастиц ZrO_2 в алюминиевой матрице значительно повышает износостойкость и твердость алюминиевого сплава А356 [10]. Алюминиевый сплав 6063-Т6, армированный наночастицами TiO_2 в количестве 7 мас. %, имеет на 13 % более высокую усталостную прочность, чем основной металл [11]. Добавление 2 мас. % наночастиц TiN в Al2024 с последующим старением увеличивает предел прочности на разрыв на 38 %, а предел текучести и относительное удлинение снижаются с 376,5 МПа и 12,7 % до 359,1 МПа и 9,4 % соответственно [12].

Алюминиевый сплав 2024 (АА2024) содержит медь, магний, марганец и некоторые другие второстепенные легирующие элементы и обладает отличным соотношением предела прочности при растяжении к пределу текучести при повышенных температурах, высокой пластичностью, усталостной прочностью и сопротивлением разрушению [13]. Эти свойства, а также способность образовывать выделения второй фазы для повышения прочности (старение) определяют высокий спрос на АА2024 в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Добавление 10 мас. % наночастиц TiO_2 со средним размером 50 нм в матрицу АА2024 путем механического измельчения и горячего прессования увеличивает твердость по Виккерсу на 54 % и прочность на 13 % [14]. Хотя свойства композита улучшаются по сравнению с монолитным сплавом, недостатком этой технологии может быть низкая величина удлинения, что может негативно сказаться на надежности сплава при приложении внешних напряжений. Сопротивление ползучести также повышается за счет включения в алюминиевую матрицу 3 об. % наночастиц TiO_2 (размером 15 нм), поскольку поведение ползучести в основном зависит от диффузионных потоков матрицы, которые строго ограничены наночастицами [15].

Поскольку АА2024 обладает перспективными свойствами в различных областях, а сплавы Al-Cu-Mg могут быть упрочнены путем старения за счет введения в матрицу выделений частиц второй фазы, а также за счет добавления твердых частиц при производстве материала, в данном исследовании мы стремимся исследовать механические свойства сплава АА2024, полученного методом обычного литья с перемешиванием с последующим старением раствора с добавлением различных массовых долей наночастиц TiO_2 .

Анализ испытаний на растяжение и твердость полученных образцов с различной массовой долей армирующих частиц TiO_2 показал, что в целом образцы вели себя хрупко, о чем свидетельствуют низкие значения относительного удлинения при разрыве (не более 6 %). Исходный образец имеет предел прочности при растяжении (UTS) 208 МПа и относительное удлинение до разрушения 3,5 %. Добавление 2,5 мас. % частиц TiO_2 увеличили ВПР на 43 % до 299 МПа и относительное удлинение на 18 % до 4 %. Дальнейшее увеличение содержания TiO_2 до 5 мас. % незначительно снизило ВТС с 299 МПа до 273 МПа и практически не изменило относительное удлинение. По балансу между прочностью и пластичностью сплав, полученный добавкой 7,5 мас. % TiO_2 показал оптимальные свойства по сравнению с другими благодаря относительно высокому пределу текучести 286 МПа и относительному

удлинению 6 %. Предел текучести полученных композитов достигает максимального значения 240 МПа при содержании TiO_2 2,5 мас. %, что выше, чем в исходном материале, на 20 %.

Добавление 2,5 мас.% и 5 мас. % TiO_2 повышает твердость до 13 % и 40 % соответственно, а при 7,5 мас. % TiO_2 значение уменьшается на 14 %. Такой рост можно объяснить присутствием в алюминиевой матрице частиц TiO_2 , которые препятствуют движению дислокаций (упрочнение раствора).

По сравнению с результатами предыдущих исследований композиты, полученные в данном исследовании, имеют меньшую твердость по UTS, YS и по Виккерсу, но лучшее удлинение до разрушения [14]. Это может быть связано с различными способами изготовления материалов. Маршрут в [14] состоял из механического фрезерования с последующим горячим прессованием. Внешнее напряжение при изготовлении приводило к более высокой плотности композита и, следовательно, к более высоким значениям твердости. Литье с перемешиванием с последующим старением раствора, используемое в этом исследовании, вероятно, привело к менее плотным композитам, но также и к более подвижным дислокациям, которые способствуют пластической деформации [16]. Поэтому максимальное удлинение было значительно выше (на 3 %).

Анализ микроструктуры изготовленных образцов после литья и термической обработки показал, что вторичные фазы, состоящие из легирующих элементов, распределяются по границам зерен и в виде отдельных частиц внутри границ. Доли площадей интерметаллидов (белые области), полученные с помощью программы анализа изображений ImageJ, показали следующие результаты: исходный образец содержит 4,4 % интерметаллидов, при 2,5 мас. % TiO_2 – 7,3 %, при 5 мас. % TiO_2 – 3,5 % и при 7,5 мас. % TiO_2 – 5 %.

Отжиг на твердый раствор и старение алюминиевого сплава 2024 приводят к образованию выделений CuAl_2Mg и CuAl_2 . Добавление частиц TiO_2 может увеличить количество осадков после гомогенизации и обработки старением [17]. Однако на рисунке 4 видно, что частицы Ti равномерно распределены в микроструктуре сплава 2024 без образования выделений даже по границам зерен, где обычно происходит скопление частиц и выделений. Это может быть связано с высокой растворимостью наночастиц TiO_2 в структуре матрицы.

Согласно рентгенограммам алюминиевого композита 2024 интенсивность пиков постепенно возрастает с увеличением количества TiO_2 за счет эффекта уширения [18]. Пики Al наблюдаются при $38,50^\circ$, $44,64^\circ$, $65,14^\circ$, $78,18^\circ$ и $82,5^\circ$. Основные пики выделения вторых фаз относятся к Al_2Cu , MgCuAl_2 . Пики, относящиеся к наночастицам TiO_2 , имеют низкую интенсивность даже при увеличении массовой доли. В литературе есть сообщения о реакциях между Al и TiO_2 , которые дают Al_3Ti и Al_2O_3 в качестве конечных продуктов [19-20]. Однако в этом исследовании явного прореагировавшего продукта не наблюдается, что хорошо согласуется с результатами анализа SEM-EDS.

Таким образом, технология литья с перемешиванием с последующим

старением раствора является подходящей технологией для производства композитов AA2024-TiO₂. Механические свойства этих композитов несколько ниже, чем у получаемых при механическом измельчении, но из-за более низкой стоимости в ряде случаев эта технология может оказаться более экономически эффективной. Дальнейшие исследования должны быть проведены для оценки других свойств композитов AA2024-TiO₂, изготовленных этим методом, таких как износостойкость и коррозионная стойкость, усталостная прочность и др.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0809-2021-0013.

Библиографический список

1. D. Yang, F. Qiu, Q. Zhao, Q. Jiang, J. of Alloys and Comp. 698 (2017). DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.12.169.
2. A.S. Walia, V. Srivastava, V. Jain, S.A. Bansal. Lect. Notes in Mech. Eng, 2020. DOI:10.1007/978-981-15-4059-2_10.
3. G. Singh, S. Goyal. Part. Sci. and Tech. 36 (2018). DOI:10.1080/02726351.2016.1227410.
4. S.Y. Duan, C.L. Wu, Z. Gao, L.M. Cha, T.W. Fan, J.H. Chen. Acta Materialia. 129 (2017). DOI:10.1016/j.actamat.2017.03.018.
5. V. Khanna, V. Kumar, S.A. Bansal. Mat. Today: Proceedings. 38 (2021). DOI:10.1016/j.matpr.2020.07.221.
6. R. Chandel, N. Sharma, S.A. Bansal. Emerg. Mat. 4 (2021). DOI:10.1007/s42247-021-00186-6.
7. J. Lan, X. Shen, J. Liu, L. Hua. Mat. Sci. and Eng. A. 745 (2019). DOI:10.1016/j.msea.2018.12.051.
8. S.V. Konovalov, V.I. Danilov, L.B. Zuev, R.A. Filip'ev, V.E. Gromov. Physics of the Solid State. 49 (8). 2007. DOI: 10.1134/S1063783407080094
9. S. Divagar, M. Vigneshwar, S.T. Selvamani, Mat. Today: Proceed. 3 (2016) DOI:10.1016/j.matpr.2016.11.021.
10. M. Karbalaei Akbari, O. Mirzaee, H.R. Baharvandi, Mat. and Design. 46 (2013). DOI:10.1016/j.matdes.2012.10.008.
11. M.H. Jaber, G.A. Aziz, A.J. Mohammed, H.J. AL-AIKawi. Nanocomp. 6 (2020). DOI:10.1080/20550324.2020.1769976.
12. J. Cheng, B. Li, Q. Cai, B. Zhao, C. Xu, Z. Chen. Mat. Charact. 181 (2021). DOI:10.1016/j.matchar.2021.111497.
13. J. Ahn, L. Chen, E. He, J.P. Dear, C.M. Davies. J. of Manuf. Proc. 34 (2018). DOI:10.1016/j.jmapro.2018.05.028.
14. J.H. Shin, H.J. Choi, D.H. Bae. Mat. Sci. and Eng.: A. 607 (2014). DOI:10.1016/j.msea.2014.04.038.
15. J. Shin, D. Bae. Adv. Eng. Mat. 15 (2013). DOI:10.1002/adem.201300099.

16. E.J. Mittemeijer, Fundamentals of Materials Science, Berlin, Heidelberg (2011) 594 p.
17. M.S. Ahmadvand, A. Azarniya, H.R. Madaah Hosseini. J. of Alloys and Comp. 789 (2019). DOI:10.1016/j.jallcom.2019.03.054.
18. D. Chu, J. Zhang, J. Yao, Y. Han, C. Wu. Trans. of Nonferr. Met. Society of China. 27 (2017). DOI:10.1016/S1003-6326(17)60279-6.
19. G.P. Zhang, Q.S. Mei, F. Chen, Y. Ma, X.M. Mei, J.Y. Li, X.F. Ruan, L. Wan. Mat. Sci. and Eng.: A. 752 (2019). DOI:10.1016/j.msea.2019.03.012.
20. C.F. Feng, L. Froyen. Compos. Part A: Applied Science and Manuf. 31 (2000). DOI:10.1016/S1359-835X(99)00041-X.

УДК 669.15-194.2

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Васильев А.А., Колбасников Н.Г.

*Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия, nikolay.kolbasnikov@gmail.com*

Аннотация. *Описана общая структура интегральной математической модели формирования структуры и механических свойств низкоуглеродистых низколегированных сталей при горячей пластической деформации и фазовых превращениях. В совокупности с решением температурно-деформационной задачи, учитывающей особенности оборудования и технологии, например, листовой прокатки, интегральная модель структурообразования представляет собой цифровой аналог (цифровой двойник) промышленной технологии термомеханической обработки. Для описания процессов структурообразования в основном используются физически обоснованные математические модели. Калибровка математических моделей выполняется при помощи физического моделирования и заводских данных.*

Ключевые слова: *горячая деформация, математическое моделирование, формирование структуры, фазовые превращения, механические свойства сталей, низколегированные стали.*

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES FOR CONTROLLING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEELS IN THERMOMECHANICAL PROCESSING PROCESSES

Vasiliev A.A., Kolbasnikov N.G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2022»

Труды XXIII Международной научно-практической конференции

Часть 1

Под общей редакцией А.Б. Юрьева

Технический редактор	Г.А. Морина
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 16.11.2022 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 22,8 Уч.-изд. л. 25,2 Тираж 300 экз. Заказ № 295

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ