



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК

Сборник научных трудов
XVII Международной конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых

РОССИЯ, ТОМСК, 21 – 24 апреля 2020 г.

Том 2. Химия

PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT

Abstracts
XVII International Conference of Students
and Young Scientists

RUSSIA, TOMSK, April 21 – 24, 2020

Volume 2. Chemistry

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВА АК7-TiB₂ НА ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЮ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

М.Г. Хмелева, А.Е. Матвеев, Н.И. Кахидзе

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.Б. Ворожцов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: khmelmg@gmail.com

**INFLUENCE OF AK7-TiB₂ ALLOY STRUCTURE ON ITS RESISTANCE TO DEFORMATION
IN QUASISTATIC AND DYNAMIC LOADING**

M.G. Khmeleva, A.E. Matveev, N.I. Kahidze

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.B. Vorozhtsov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: khmelmg@gmail.com

Abstract. *Experiments were carried out with AK7 aluminum alloy under quasistatic and plane shock-wave loading at normal temperatures. The strain rate and shock compression pressure were varied during the experiments. Alloy modification was carried out by introducing of titanium diboride particles in combination with vibration treatment of the melt.*

Введение. Эффективными методами модифицирования структуры литых алюминиевых сплавов и увеличения их механических свойств являются методы легирования тугоплавкими частицами, которые становятся центрами зародкообразования при кристаллизации расплава. Наиболее широко применяемыми лигатурами в алюминиевых сплавах является система Al-Ti-B [1, 2]. Композиты Al-TiB₂, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) из порошковой смеси Al-Ti-B, имеют большой потенциал применения в качестве лигатур для алюминиевых сплавов [3]. Для равномерного распределения тугоплавких частиц в расплаве применяются внешние физические воздействия (ультразвук, вибрация) [4, 5]. При этом к наиболее экономически выгодному способу относится вибрационная обработка расплава при кристаллизации.

В литературе накоплен значительный опыт исследований управления структурообразованием, в том числе при вводе модификаторов [6, 7]. Однако, вопросы закономерностей изменения структуры и механических свойств алюминиевых сплавов за счет ввода инокуляторов с одновременным воздействием вибрации изучены недостаточно. Целью настоящей работы являлось исследование влияния частиц TiB₂ и вибрационной обработки расплава алюминия на структуру и механические характеристики получаемых сплавов на основе АК7 при квазистатическом и плоском ударно-волновом нагружении.

Экспериментальная часть. В качестве базового материала использовался сплав алюминия марки АК7. Введение и распределение частиц в расплав осуществлялось с использованием лигатур системы 60 масс.% Al и 40 масс.% TiB₂, полученных в режиме безгазового горения порошковых смесей Al-Ti-B [3].

Методика эксперимента по вибрационной обработке и введению лигатур заключалась в следующем: 1 кг сплава АК7 помещали в тигель, находящийся в печи закрытого типа, (температура в

печи составила 750 °С) и выдерживали не менее 4-х часов. Затем тигель извлекли из печи и вводили лигатуру. Для равномерного распределения лигатуры, уменьшения пористости в объеме расплава применяли вибрационную обработку расплава (частота вибрации составляла 60 Гц, амплитуда 0.5 мм) при разливке расплава. Расплав металла выливали при температуре 700 °С в предварительно нагретый кристаллизатор. Для сравнительного анализа был получен сплав, не содержащий частиц TiB_2 при аналогичных условиях. В результате получены плоские отливки двух типов. Была проведена термообработка полученных отливок путем нагревания их до 370°С и выдержки в течение 2 часов с последующим охлаждением в воде. Температура воды составляла 60°С. После закалки отливки подвергались старению при 170°С в течение 4 часов с последующим охлаждением в печи.

Исследование структуры полученных материалов осуществлялось с использованием оптической микроскопии на микроскопе Olympus GX-71. Твердость по Бринеллю измеряли внедрением стального сферического индентора диаметром 5 мм с усилием 250 кг и выдержкой 30 сек [8]. Испытания на одноосное растяжение проводили с помощью машины Instron 3369 при скоростях деформации 0.001 с^{-1} , 0.01 с^{-1} , 0.1 с^{-1} . Для получения информации о количественных характеристиках процессов высокоскоростного деформирования и разрушения исследуемых образцов была проведена серия ударно-волновых экспериментов с непрерывной регистрацией профилей скорости свободной поверхности при помощи лазерного интерферометра VISAR [9]. Плоское ударное сжатие образцов диаметром 50 мм и толщиной 2.1 ± 0.05 мм и 8 ± 0.05 мм осуществляли путем прямого соударения с плоскими алюминиевыми (2 ± 0.05 мм) или медными (1.45 ± 0.05 мм) ударниками, метаемых в диапазоне скоростей от 270 м/с до 350 м/с, при этом давление ударного сжатия составляло от 1.3 ГПа до 3.5 ГПа. Эксперименты проведены на газовой пушке с диаметром ствола 50 мм.

Результаты. Проведено исследование микроструктуры сплава в литом состоянии, а также образцов после обработки вибрацией без частиц и с частицами TiB_2 . В процессе вибрационной обработки расплава произошли значительные структурные изменения, выраженные в уменьшении среднего размера зерна до 180 мкм по сравнению с исходным сплавом АК7 (449 мкм). Воздействие частиц TiB_2 и вибрационной обработки расплава привело к снижению зерна до 140 мкм.

Результаты измерения твердости образцов по Бринеллю до/после вибрационной обработки показали, что обработка расплава вибрацией привела к росту твердости сплава АК7 с 33 до 87 НВ. Введение частиц TiB_2 в сочетании с вибрационной обработкой не приводит к изменениям твердости сплава, которая составила 86 НВ.

Результаты испытаний на одноосное растяжение образцов показали, что с увеличением скорости деформации с 0.001 с^{-1} до 0.1 с^{-1} произошло увеличение условного предела текучести со 133 до 212 МПа, предела прочности с 207 до 235 МПа и снижение пластичности с 0.011 до 0.007 у сплава без частиц после вибрационной обработки. Модифицирование сплава АК7 диборидом титана позволило увеличить предел текучести, предел прочности и пластичность сплава при скорости деформации 0.001 с^{-1} с 133 до 150 МПа, с 207 до 265 МПа и с 0.011 до 0.016, соответственно.

Результаты исследования динамических свойств сплава АК7 при скоростях деформирования свыше 10^4 с^{-1} продемонстрировали, что наибольшее значение динамического предела упругости (σ_{HEL}) ~391 МПа и откольной прочности (σ_{sp}) ~878 МПа достигалось в образцах сплава без частиц, обработанного только путем вибрационного воздействия. Эти значения практически в 7 раз больше по

сравнению с исходными литыми образцами, у которых $\sigma_{\text{НВ}} \sim 55$ МПа и $\sigma_{\text{сп}} \sim 129$ МПа. Введение частиц в расплав и его вибрационная обработка привели к уменьшению динамического предела упругости до 279 МПа по сравнению со сплавом без частиц. Также необходимо отметить общее снижение откольной прочности, которая составила 570 МПа.

Заключение. Установлено, что обработка расплава вибрацией привела к снижению среднего размера зерна со 449 мкм до 180 мкм. Введение СВС-лигатур с частицами диборида титана в расплав совместно с вибрационной обработкой расплава привело к снижению зерна до 140 мкм. Установлено, что вибрационная обработка расплава привела к увеличению твердости сплава с 33 до 87 НВ. Введение частиц диборида титана с последующей вибрационной обработкой расплава не приводит к изменениям твердости сплава. Наибольшие прочностные характеристики при плоском ударно-волновом деформировании получены на образцах сплава, обработанного с помощью вибрации: динамический предел упругости и откольная прочность достигали 878 и 391 МПа, соответственно. Введение частиц диборида титана в расплав совместно с вибрационной обработкой расплава привело к уменьшению динамического предела упругости до 279 МПа и откольной прочности до 570 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-38-50066/19 мол_нр с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН. Матвеев А.Е. выражает благодарность за финансовую поддержку гранта Президента РФ (№ МК-506.2019.8) для изучения влияния TiB_2 на свойства сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greer A.L., Cooper P.S., Meredith M.W., Schneider W., Schumacher P., Spittle J.A., Tronche A. Grain refinement of aluminum alloys inoculation // *Advanced Engineering Materials*. – 2003. – Т. 5(1□2). – С. 81–91.
2. Fan Z. et al. Grain refining mechanism in the Al/Al–Ti–B system // *Acta Materialia*. – 2015. – Т. 84. – С. 292–304.
3. Zhukov I.A., Promakhov V.V., Matveev A.E., Platov V.V., Khurstalev A.P., Dubkova Y.A., Vorozhtsov S.A., Potekaev A.I. Principles of structure and phase composition formation in composite master alloys of the Al-Ti-B/B4C systems used for aluminum alloy modification // *Russ. Phys. J.* – 2018. – Т. 60. – С. 2025–2031.
4. Kotadia H.R., Qian M., Eskin D.G., Das A. On the microstructural refinement in commercial purity Al and Al-10 wt % Cu alloy under ultrasonication during solidification // *Materials & Design*. – 2017. Т. 132. – С. 266–274.
5. Vorozhtsov S., Kudryashova O., Promakhov V., Dammer V., Vorozhtsov A. Theoretical and Experimental Investigations of the Process of Vibration Treatment of Liquid Metals Containing Nanoparticles // *JOM*. – 2016. – Т. 68., № 12. – С. 3094–3100.
6. Sritharan T., Li H. Influence of titanium to boron ratio on the ability to grain refine aluminium-silicon alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – Т. 63. – С. 585–589.
7. Casari D., Merlin M., Garagnani G.L. A comparative study on the effects of three commercial Ti–B-based grain refiners on the impact properties of A356 cast aluminium alloy // *Journal of Materials Science*. 2013. – Т. 48., № 12. – С. 4365–4377.
8. ASTM E10:2017 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
9. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface // *J. Appl. Phys.* – 1972. – Т. 43. – С. 4669.