

УДК 669.2+544+539.4

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ  $ZrO_2$ В. В. Миронов<sup>1</sup>, Л. Е. Агуреев<sup>1</sup>, Ж. В. Еремеева<sup>2</sup>, член-корреспондент РАН В. И. Костиков<sup>2,\*</sup>

Поступило 21.11.2018 г.

Получены новые данные о влиянии малых добавок наночастиц оксида циркония на прочностные свойства порошковых матриц на основе чистого алюминия, в том числе с добавками 1,5% меди, холодно-прессованных и спечённых в форвакууме. Показано, что даже при незначительной концентрации нанодобавок происходит ощутимый рост механических свойств материалов: пределов прочности на растяжение, изгиб, сжатие и предела текучести.

*Ключевые слова:* алюмокомпозит, наночастицы, оксид циркония, порошковая металлургия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856704-707>

## ВВЕДЕНИЕ

Применение тугоплавких наночастиц для модификации порошковых или литых металлов и сплавов открывает новые возможности по значительному увеличению их прочностных и функциональных характеристик [1, 2].

Наночастицы оказывают различное воздействие на характеристики спечённых композитов в зависимости от своего расположения (на границах зёрен или внутри зёрен).

Согласно теории межфазного слоя [3], вокруг наночастицы, находящейся в материале матрицы, формируется зона упрочнения, которая в идеальном случае должна иметь сферическую форму. С повышением концентрации нанодобавок увеличивается вероятность их агрегирования за счёт высокой поверхностной энергии, что может ухудшить свойства материала из-за появления дополнительной пористости и снижения адгезии между зёрнами матрицы. Эти явления приводят к вырождению формы межфазной зоны упрочнения и не позволяют достичь максимального прироста прочностных свойств [4]. Поэтому целесообразно применять наночастицы тугоплавких соединений при модификации металлов в ультрамалых концентрациях (менее 0,15 об.%) для их лучшего распределения и формирования по всей матрице зон упрочнения более правильной формы. Максимальное значение свойств при малых концентрациях нанодобавок с последующим снижением связано с существованием адгезионной по-

вреждённости при повышении концентрации добавок и развитием межфазных границ. Кроме того, существует некая золотая середина между концентрациями наночастиц, их формой и размерами и формой зон упрочнения, которые они вокруг себя образуют. “Насыщение” в композите наступает, когда упрочнённые зоны перекрывают друг друга. Ранее было показано влияние наночастиц оксида алюминия на механические свойства чистого алюминия и алюминия с 1,5 об.% меди [5].

В настоящей работе изучено влияние микродобавок наночастиц оксида циркония на прочностные свойства алюминиевых материалов.

Авторами выявлены закономерности влияния малых концентраций наночастиц  $ZrO_2$  на прочностные характеристики алюминиевых материалов. В частности, обнаружено повышение механических свойств спечённого алюминия на 13–84%, как чистого, так и с добавкой 1,5 об.% меди, при вводе малого количества (0,01–0,15 об.%) наночастиц оксида циркония.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве метода создания алюмокомпозитов выбрана технология порошковой металлургии, поскольку в этом случае достигаются сохранение низкого размера зерна матрицы, низкая сегрегация примесей, высокий коэффициент использования материала по сравнению с технологией литья.

Основным компонентом опытных образцов был выбран порошок алюминия АСД-4 (ТУ 48-5-226-87) (средний диаметр ~4 мкм, чистота 99,7%), полученный методом распыления расплава; в виде легирующего компонента вводилась медь (порошок марки

<sup>1</sup> Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”, Москва

\*E-mail: vikost@bk.ru

ПМУ). Нанодисперсный порошок оксида циркония (рис. 1) получен на установке для плазмохимического синтеза ПУ 2-16/10.03-004 в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показана микроструктура композита Al + 0,15 об.% ZrO<sub>2</sub>, полученная на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 600 FEG. Видны скопления наночастиц оксида циркония, равномерно распределённые по границам зёрен.

На рис. 3 представлены зависимости механических свойств полученных композитов от концентраций наночастиц ZrO<sub>2</sub> по сравнению с материалами матрицы.

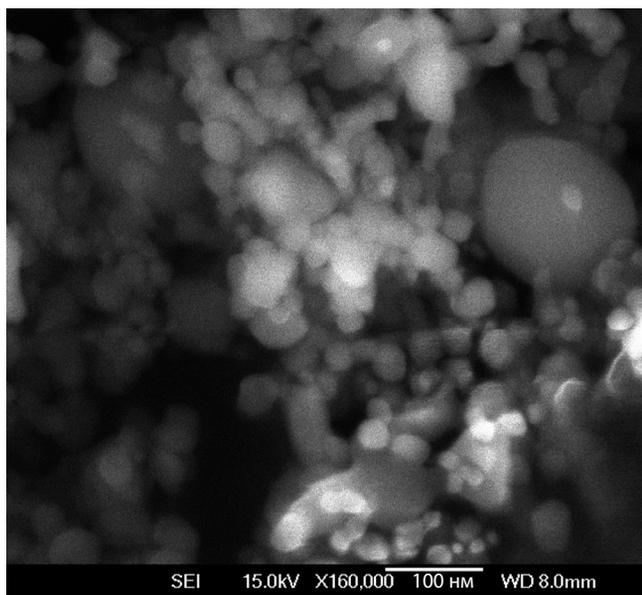


Рис. 1. Наночастицы оксида циркония.

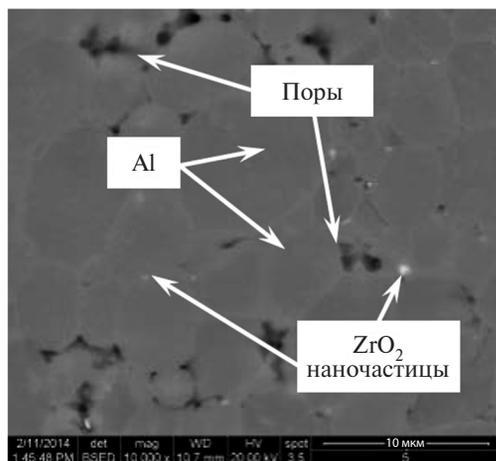


Рис. 2. Микроструктура образца алюмокомпозита с 0,15 об.% ZrO<sub>2</sub>.

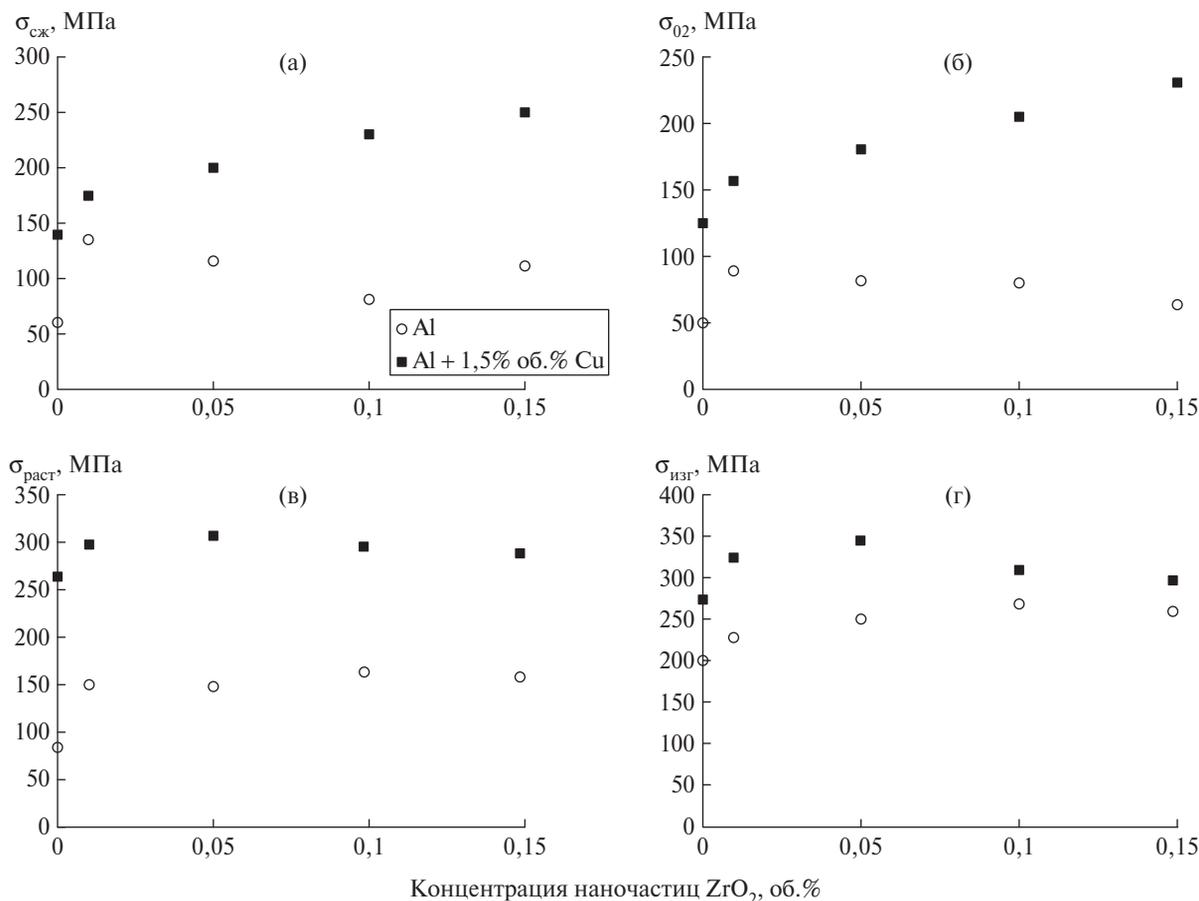
Для матрицы без меди экстремальный характер зависимостей указанных механических свойств от концентрации наночастиц проявляется для упрочняемого материала в случае условного предела текучести в районе концентрации 0,01 об.%, предела прочности на сжатие — 0,01 об.%. Зависимость предела прочности на растяжение и изгиб спечённого алюминия от содержания наночастиц не имеет чёткого экстремального характера. Экстремум предела прочности на изгиб проявляется для материала с 1,5 об.% меди с 0,05 об.% наночастиц оксида циркония.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показал, что в диапазоне исследуемых концентраций наночастиц максимальные значения механических свойств композитов с матрицей из алюминия были следующими: предел прочности на сжатие 130 МПа (0,01 об.% ZrO<sub>2</sub>), условный предел текучести 75 МПа (0,01 об.% ZrO<sub>2</sub>), предел прочности на растяжение 165 МПа (0,1 об.% ZrO<sub>2</sub>), предел прочности на изгиб 265 МПа (0,1 об.% ZrO<sub>2</sub>). Для композитов с добавками 1,5 об.% меди предел прочности на сжатие 250 МПа (0,15 об.% ZrO<sub>2</sub>), условный предел текучести 232 МПа (0,15 об.% ZrO<sub>2</sub>), предел прочности на растяжение 310 МПа (0,05 об.% ZrO<sub>2</sub>), предел прочности на изгиб 343 МПа (0,05 об.% ZrO<sub>2</sub>).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при модификации порошкового алюминия малым количеством нанодобавок ZrO<sub>2</sub> происходит заметный рост механических характеристик как для чистого алюминия, так и для алюминия с 1,5 об.% меди (значения прироста указаны в среднем в процентах — чистый алюминий/алюминий с медью): условного предела текучести на 55/55%, предела прочности на сжатие на 83/53%, предела прочности на растяжение на 84/13%, предела прочности на изгиб на 26/16%.

Результаты работы подтверждают идею о существовании межфазных зон упрочнения в материале на основе спечённого алюминия (в том числе с добавками меди), формирующихся вокруг нерастворимых наночастиц оксида циркония, концентрация которых составила 0,01–0,15 об.%. Поэтому можно сделать вывод о высоком потенциале данного подхода для повышения механических свойств алюминия и различных металлов за счёт применения наночастиц оксидов в малых количествах. Полученные в работе композиты будут использованы для изготовления различных узлов турбонасосных агрегатов ракетных двигателей, работающих при умеренных механических и температурных нагрузках, например, крыльчаток, втулок, бугелей и др.



**Рис. 3.** Механические свойства алюмокомпозиатов, армированных наночастицами оксида циркония: а — предел прочности на сжатие, б — условный предел текучести, в — предел прочности на растяжение, г — предел прочности на изгиб.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность коллективам отдела нанотехнологий ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” и кафедры ПМиФП НИТУ “МИСиС” за помощь в проведении исследований.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16–38–00774 “Исследование закономерностей влияния микродобавок оксидных наночастиц на структуру, фазообразование, механические свойства и жаростойкость порошковых алюмокомпозиатов, в том числе с добавками порошков меди или магния” и при финансовой поддержке гранта Президента РФ молодым учёным МК-5901.2018.3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kostikov V.I., Agureev L.E., Ereemeeva Zh.V. // *Rus. J. Nonferrous Metals*. 2015. V. 56. № 3. P. 325–328.
2. Костиков В.И., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В., Ситников Н.Н., Казаков В.А. // *Перспективные материалы*. 2014. № 7. С. 13–20.
3. Образцов И.Ф., Лурье С.А., Белов П.А. и др. // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2004. Т. 10. № 3. С. 596–612.
4. Lurie S., Volkov-Bogorodskiy D., Solyaev Y., Rizahapov R., Agureev L. // *Comput. Materials Sci*. 2016. V. 116. P. 62–73.
5. Миронов В.В., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В., Костиков В.И. // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 5. С. 510–512.

**THE STRENGTH PROPERTIES DEPENDENCE OF ALUMINUM MATERIALS ON THE ZrO<sub>2</sub> NANOPARTICLES CONCENTRATION****V. V. Mironov<sup>1</sup>, L. E. Agureev<sup>1</sup>, Zh. V. Eremeeva<sup>2</sup>,  
Corresponding Member of the RAS V. I. Kostikov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Keldysh Research Center, Moscow, Russian Federation*<sup>2</sup>*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation*

Received November 21, 2018

New data were obtained on the effect of small additions of zirconium oxide nanoparticles on the strength properties of powder matrices based on pure aluminum, including those with the addition of 1.5% copper cold pressed and sintered in forevacuum. It is shown that even with an insignificant concentration of nano-additives, there is a noticeable increase in the mechanical properties of materials: tensile strength, bending, compression, and yield strength.

*Keywords:* aluminum composites, nanoparticles, zirconium oxide, powder metallurgy.