

А. В. Алексеев¹, М. Р. Предтеченский²

¹ ООО «Международный научный центр по теплофизике и энергетике»
(группа компаний «ОКСиАл.ру»)
ул. Кутателадзе, 7/11, Новосибирск 630045, Россия

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск 630090, Россия

artjom@ngs.ru

АЛЮМИНИЕВАЯ ФОЛЬГА, УПРОЧНЕННАЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Опробован метод получения композита на основе алюминиевой матрицы, упрочненной углеродными нанотрубками, с помощью горячего прессования и холодной прокатки. Получен композит с прочностью на уровне среднепрочных алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, алюминий, композитный материал, горячее прессование, холодная прокатка.

Введение

Добавки углеродных нанотрубок позволяют значительно улучшить прочностные свойства алюминия и его сплавов [1–3].

На сегодняшний день для получения алюминиевого композита, упрочненного углеродными нанотрубками (УНТ), в большинстве работ используются методы порошковой металлургии, заключающиеся в получении брикета-компакта из порошка с последующей его горячей деформацией. Компакты получают с помощью электроискрового спекания (Spark Plasma Sintering SPS) [4], холодного прессования и спекания [5], взрывного компактирования [6], горячего изостатического прессования [7], горячего прессования [8]. В качестве финальной операции использовали горячую экструзию [4] или прокатку [9]. Есть публикации, в которых успешно совместили получение прессованного брикета из порошка с операцией экструзии, реализовав метод электроискро-

вой экструзии (Spark Plasma Extrusion) SPE [10].

В настоящей работе композит с УНТ получен методом холодной прокатки.

Экспериментальная часть

Методом высокоэнергетического помола в инертной атмосфере на мельнице АГО-2С получены порошковые смеси Al + 1 % масс УНТ. Для изготовления порошковых смесей использовались многостенные углеродные нанотрубки OCSiAl. На рис. 1 показаны фотографии исходных УНТ, сделанные на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ). Порошковые смеси компактировались на установке горячего прессования при температурах 600–670 °С и давлении 50 МПа в Ag. Холодная прокатка осуществлялась с деформацией не более 10 % за проход в 10–15 проходов.

Для сравнения тем же методом были изготовлены образцы из порошковых смесей

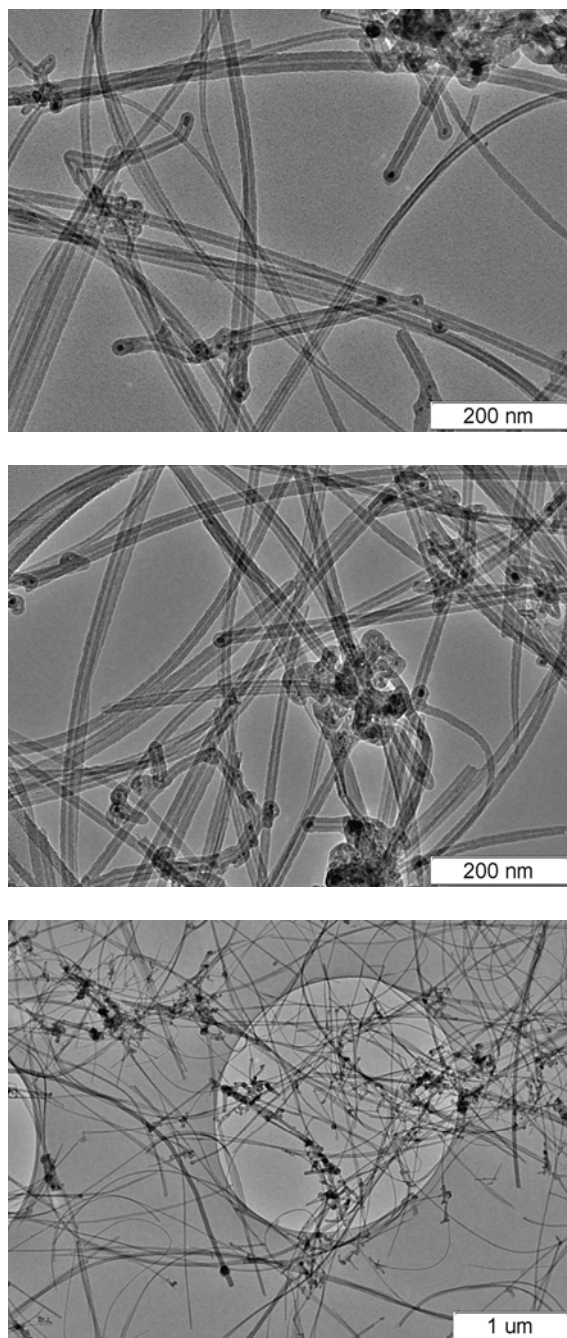


Рис. 1. Снимки ПЭМ исходных OCSiAl МУНТ

Al с 1 % масс. порошка углерода Volkan-XC72, полученной по тому же режиму помола, а также был изготовлен образец из порошка алюминия без добавок.

Контроль структуры материала осуществлялся на сканирующем электронном микроскопе LEO1430-VP, присутствие карбидов определялось рентгеноструктурным анализом на установке Bruker d8 Advance с параллельной геометрией и излучением $\text{Cu } K\alpha_1 = 1,5406\text{Å}$; $K\alpha_2 = 1,54439\text{Å}$.

Из полученной фольги толщиной 100 мкм, вырезались образцы для испытаний на разрыв. Испытания на разрыв проводились при комнатной температуре на разрывной машине РПМ-50У.

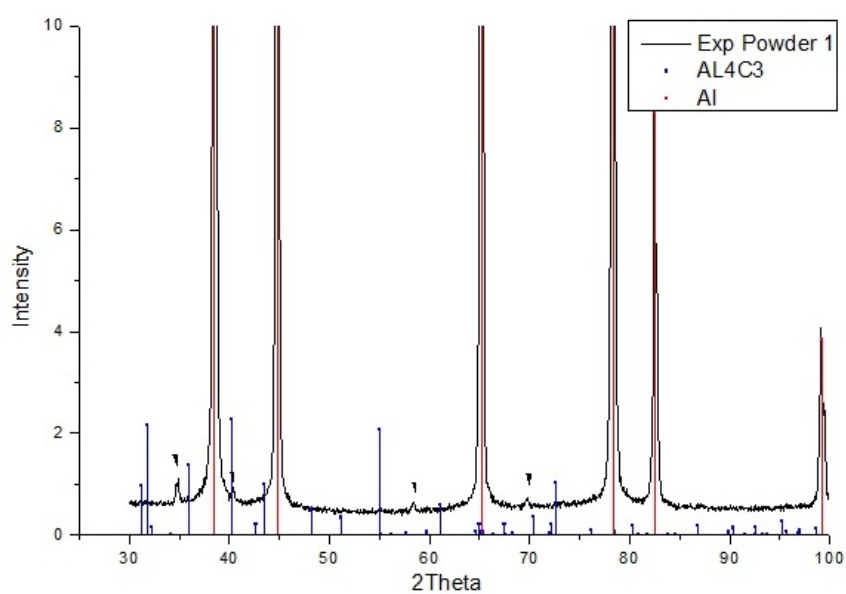
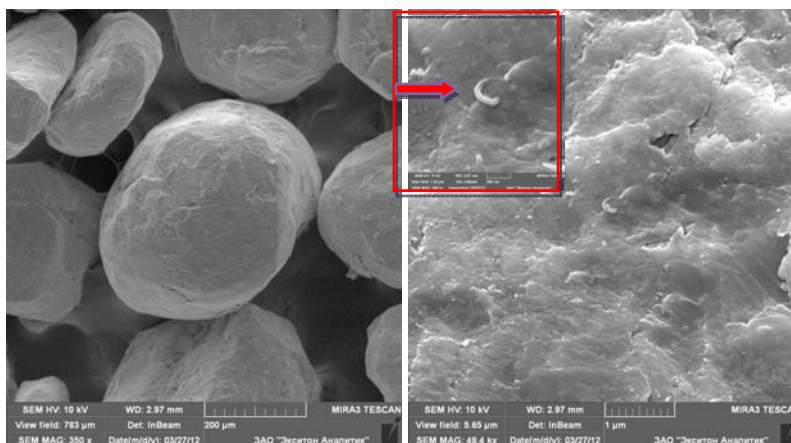
Результаты и обсуждение

Снимки SEM полученных порошков показаны на рис. 2. Порошковая смесь с УНТ состоит из частиц преимущественно сферической формы, диаметр частиц 250–750 мкм (отдельные частицы до 900 мкм). Детальное исследование поверхности порошка на высоком разрешении показало отсутствие агломератов УНТ, притом, что обнаруженные отдельные УНТ внедрены в металл.

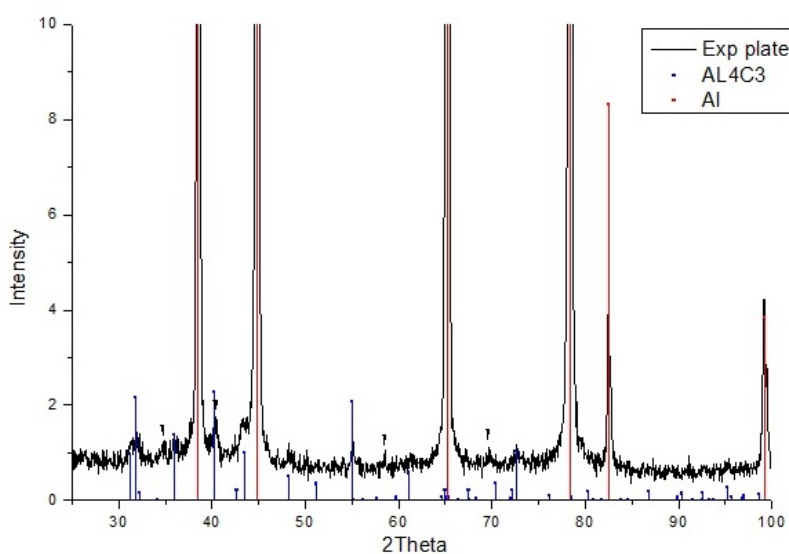
Видно, что дифракционные пики фазы Al_4C_3 отсутствуют (порог обнаружения рентгеновского анализа 0,1 %), следовательно, можно с достаточной точностью сказать, что карбиды в процессе помола на выбранных режимах не образуются (рис. 3, а). Контроль наличия карбидов в исходной порошковой смеси необходим по причине того, что в процессе высокоэнергетического помола при деформации металлических частиц, температура локально может достигать весьма больших значений [11], что в свою очередь может инициировать химическую реакцию образования карбида алюминия в процессе получения смеси металла с УНТ; при этом известно, что образование большого количества карбидов алюминия приводит к снижению механических свойств композита с УНТ [12]. Таким образом, для получения композита с высокими прочностными свойствами следует свести к минимуму количество карбидов алюминия, образующихся в процессе изготовления композита. Следовательно, образование их в ходе получения исходных порошковых смесей крайне нежелательно.

Поскольку карбиды алюминия могут образовываться не только на этапе изготовления порошковой смеси УНТ с металлом, но и на этапе горячего прессования, необходимо контролировать их количество на каждом этапе изготовления композита (в ходе приготовления порошковых смесей и после горячего прессования и холодной прокатки). Заметим, что в ходе холодной прокатки горячепрессованных заготовок карбиды алюминия образоваться не могут.

Рис. 2. Микроснимки
порошковой смеси с УНТ



a



б

Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа порошковой смеси с УНТ (а) и холоднокатаной фольги с УНТ (б) (черный контур – экспериментальные данные, цветными линиями отмечены места положения дифракционных пиков Al и Al_4C_3 по базе данных)

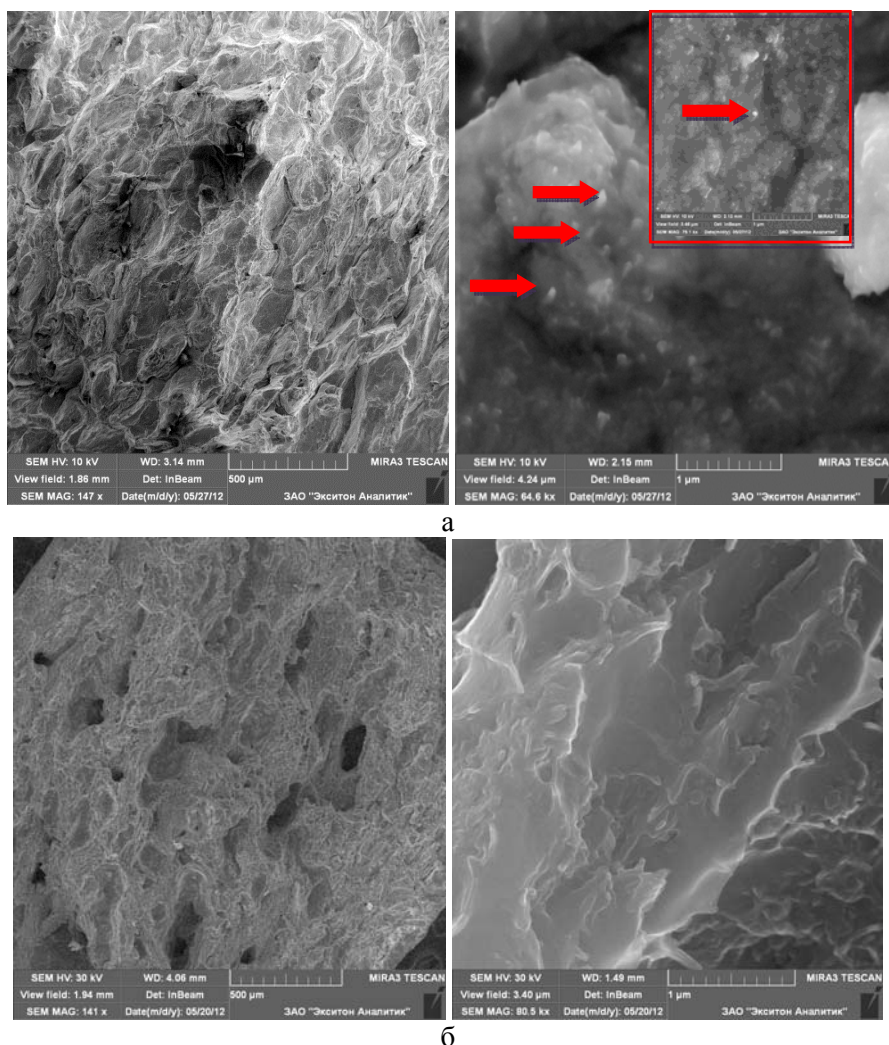


Рис. 4. Заготовки: *а* – с УНТ № 1 (нанотрубки отмечены стрелками); *б* – с сажей № 2

Исследование холоднокатаной фольги с УНТ показало присутствие незначительного количества карбидов в материале (рис. 3, *б*), оценить их точное количество не представлялось возможным так как оно находится на уровне предельной чувствительности используемого нами прибора.

В некоторых работах говорится о том, что небольшие количества карбида алюминия, находящиеся в виде наноразмерных образований на границе УНТ с матрицей, напротив, могут способствовать улучшению адгезии нанотрубок к алюминию [1; 2; 13].

На рис. 4 показаны снимки фрактографической поверхности горячепрессованных заготовок. Структура обоих компактов однородная. Видно, что длина выступающих из матрицы частей УНТ небольшая и составляет не более $1/10$ от длины исходных

УНТ. Это свидетельствует о хорошей адгезии их к металлу.

Результаты испытаний холоднокатаной фольги на прочность оказались следующими:

№ образца	Тип смеси	Предел прочности на разрыв, МПа
1	Al + 1 % УНТ	441
2	Al + 1 % сажа	360
3	Al	357

Поскольку увеличение прочности композита может быть обусловлено не только влиянием УНТ, но и, при их частичном разрушении в процессе помола, влиянием аморфного углерода, для определения влияния углеродных нанотрубок на прочность

композита именно УНТ правильное проводить сравнение с контрольными образцами, содержащими в качестве добавок аморфный углерод. Поэтому, помимо контрольного образца из алюминия без добавок, нами были изготовлены образцы с добавками сажи.

Образцы холоднокатаной фольги с добавкой порошка углерода VolkanXC72 по прочности незначительно отличаются от фольги из алюминия без добавок, в то время как добавка УНТ увеличила прочность композита на 22 %. Следовательно, увеличение прочности композита обусловлено именно влиянием УНТ.

Все полученные образцы имели весьма низкую пластичность, что можно объяснить высокой степенью нагартовки в результате значительной холодной деформации.

Заключение

Получен композит с УНТ методом холодной прокатки горячепрессованного брикета. Добавка 1 % масс. МУНТ OCSiAl в алюминий позволила увеличить прочность материала на 22 %. Полученный нами композит имеет прочность на уровне среднепрочных алюминиевых сплавов.

Список литературы

1. *Hansang Kwon, Dae Hoon Park, Jean Francois Silvain, Akira Kawasaki.* Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. Iss. 3. P. 546–550.
2. *Bakshi S. R., Agarwal A.* An Analysis of the Factors Affecting Strengthening in Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composites // *Carbon*. 2011. Vol. 49. Iss. 2. P. 533–544
3. *Choi H. J., Shin J. H., Bae D. H.* Grain Size Effect on the Strengthening Behavior of Aluminum-Based Composites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes // *Composites Science and Technology* 2011. Vol. 71. P. 1699–1705.
4. *Jin-zhi Liao, Ming-Jen Tan, Idapalapati Sridhar.* Spark Plasma Sintered Multi-Wall Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. Suppl. 1. P. 96–100
5. *Singhal S. K., Renu Pasricha, Mamta Jangra, Rajiv Chahal, Satish Teotia, Mathur R. B.* Carbon Nanotubes: Amino Function-

alization and Its Application in the Fabrication of Al-matrix Composites // *Powder Technology*. 2012. P. 215–216.

6. *Salas W., Alba-baena N. G., Murr L. E.* Explosive Shock-Wave Consolidation of Aluminium Powder // *Carbon Nanotube Aggregate Mixtures: Optical and Electron Metallography. Metallurgical and Materials Transactions*. 2007. 38A. 12; *Discovery*. P. 2928–2931.

7. *Deng C. F., Wang D. Z., Zhang X. X., Ma Y. X.* Damping Characteristics of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. Iss. 14–15. P. 3229–3231

8. *Jafari M., Abbasi M. H., Enayati M. H., Karimzadeh F.* Mechanical Properties of Nanostructured Al2024–MWCNT Composite Prepared by Optimized Mechanical Milling and Hot Pressing Methods // *Advanced Powder Technology*. 2012. Vol. 23. Iss. 2. P. 205–210.

9. *Esawi A. M. K., Borady M. A. El.* Carbon Nanotube-Reinforced Aluminium Strips // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. Iss. 2. P. 486–492.

10. *Morsi K., Esawi K., Borah P., Lanka S., Sayed A., Tahe M.* Properties of Single and Dual Matrix Aluminum – Carbon Nanotube Composites Processed via Spark Plasma Extrusion (SPE) // *Materials Science and Engineering. A*. 2010. Vol. 527. Iss. 21–22. P. 5686–5690

11. *Каминский Ю. Д.* Практика и перспективы использования процессов механоактивации в металлургии // *Наука – производству*. 2002. № 2.

12. *Yufeng Wu, Gap-Yong Kim.* Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite Fabricated by Semi-Solid Powder Processing // *Journal of Materials Processing Technology*. Available online 15 March 2011.

13. *He C. N., Zhao N. Q., Shi C. S., Song S. Z.* Mechanical Properties and Microstructures of Carbon Nanotube-Reinforced Al Matrix Composite Fabricated by in situ Chemical Vapor Deposition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 487. Iss. 1–2. P. 258–262.

A. V. Alekseev¹, M. R. Predtechensky²

¹ *International Scientific Center for Thermophysics and Energetics
(group of companies «OKSiAl.ru»)
7/11 Kutateladze Str., Novosibirsk, 630045, Russian Federation*

² *Institute of Thermophysics of SB RAS
1 Lavrentiev Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

artjom@ngs.ru

**MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIAL
MADE OF ALUMINUM MATRIX REINFORCED BY CARBON NANOTUBES
BY THE WAY OF HOT PRESSING FOLLOWING BY COLD ROLLING**

The method of manufacturing Al-CNT composite by hot pressing and cold rolling was tried out. Composite with a tensile strength as well as tensile strength of middle strength aluminum alloys was made

Keywords: carbon nanotubes, aluminum, composite material, hot pressing, cold rolling.