

УДК

Скворцова А.Н.  
(НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург, Россия)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНОЛЕГИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА СИСТЕМЫ AL-УГЛЕРОДНЫЕ НАНОВОЛОКНА**

Множество работ [1, 2] посвящено получению композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными наноструктурами (УНС), выполнены различными методами порошковой металлургии. Основными методами являются: смешение УНС с порошком матрицы путем совместного помола, компактирование путем прессования и спекания, горячего изостатического прессования, холодного изостатического прессования, спекания в плазменном разряде, предварительное механолегирование, экструзия и прокатка.

В работе [3] приведены данные по механическим свойствам металлических материалов, упрочненных УНВ. Например, для композитов алюминий – 2 об.% УНТ, предел прочности композитов варьируется от 150 до 520 МПа, в зависимости от метода приготовления образцов. Одной из причин такого разброса значений является то, что различные методы обработки приводят к изменению микроструктуры и равномерному распределению УНВ и, следовательно, различной степени упрочнения.

В представленной работе рассматриваются свойства и механизмы упрочнения композиционных материалов на основе алюминия в зависимости от методов обработки, в зависимости от состава, структуры углеродного материала (УНВ/графит).

Небольшие добавки углеродных нановолокон (порядка 1 масс.%) в различные металлические матрицы позволит значительно улучшить износостойкие, прочностные и коррозионностойкие свойства за счет увеличения микротвердости материала и сопротивления износу, а также уменьшения пористости.

Разработка математических моделей структуры композиционных материалов системы «алюминиевый сплав–углеродное нановолокно» позволит дать рекомендации по технологическим параметрам получения покрытий.

На рисунке 1 представлена микроструктура поверхности порошка алюминия до механолегирования и после.

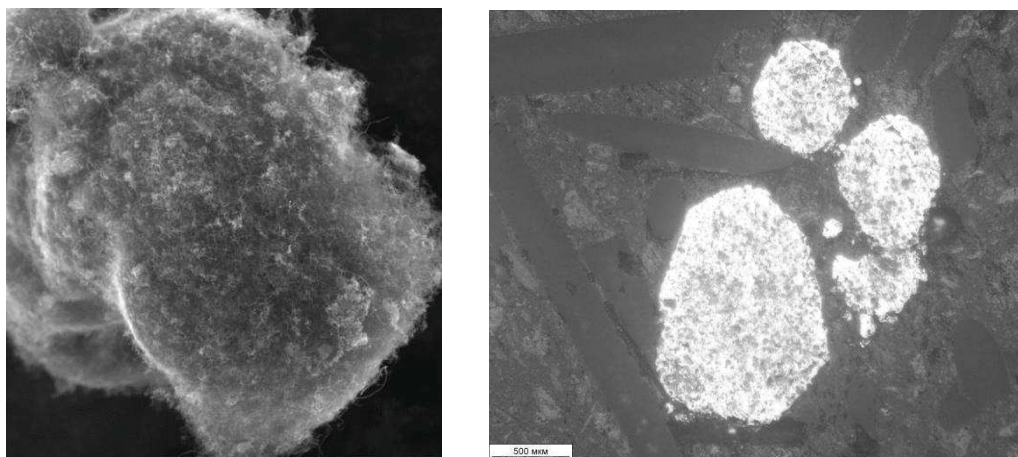


Рис 1. Микроструктура поверхности порошка системы Al-УНВ а) до механолегирования, б) после механолегирования.

На рисунке 1а видно множество углеродных нановолокон выращенных непосредственно на порошке алюминия.

В Таблице 1 приведены значения среднего размера зерна (по результатам металлографического анализа), твердости и теплопроводности компактов.

Таблица 1 – Компактирование композиционного материала при различных температурах

Состав	Компактирование	Твердость, НВ	Средний размер зерна, мкм
Al	Горячее прессование (5ГПа, 720 °С)	30	49,0
Al – 1%УНВ	Холодное прессование 400МПа, спекание при 600 °С	35	45,5
Al – 1%УНВ	Горячее прессование (5ГПа, 720 °С)	55	35,0
Al – 1%УНВ	Горячее прессование (5ГПа, 980 °С)	53	34,0

Готовый порошок после механолегирования подвергался компактированию. Композиционный материал на основе алюминия компактировали методом холодного одноосного прессования при давлении 750 МПа с последующим спеканием в среде водорода при температурах 480, 720 и 950 °С в течение 1 часа. Компакты алюминий – 1 масс.% УНВ получали методом холодного одноосного прессования при давлении 600 МПа. Часть полученных образцов спекали в среде аргона при температуре 550 °С в течение 1 часа.

Другую часть подвергали дополнительному горячему прессованию в контейнере высокого давления.

В работе были рассчитаны прочностные свойства по трем разным моделям: по модели «замедления сдвига», по соотношению Холла-Петча, по механизму образования новой фазы с химическим исследованием методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Исследовано несколько вариантов компактирования армированного порошка при разной температуре (таблица 1, рис.2). Во всех режимах отмечается уменьшение среднего размера зерна и увеличение твердости по сравнению с контрольным образцом из чистого порошка алюминия. Углеродная фаза препятствует росту зерна в процессе спекания, что является первоочередной причиной упрочнения. Наибольшую твердость имеет Al – 1 % УНВ с горячим прессованием при 720 °С.

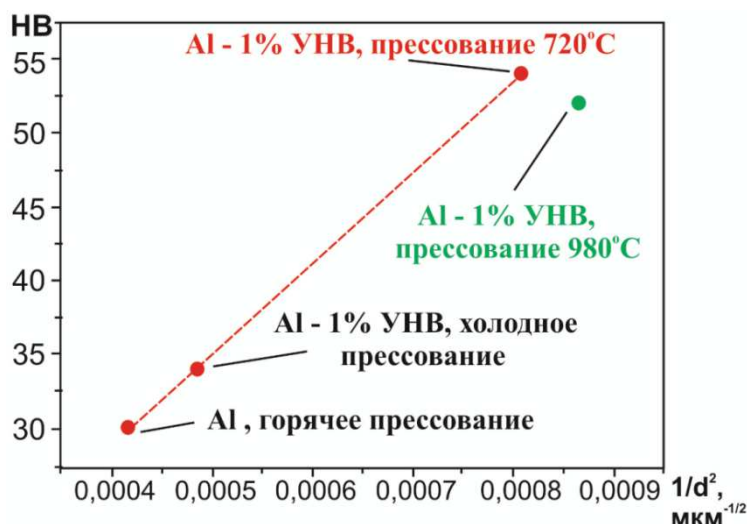


Рис 2. Зависимость твердости от размера зерна.

При рассмотрении различия структуры и свойств материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными нановолокнами, показано, что при передаче нагрузки через межфазные напряжения сдвига от матрицы к волокнам позволяют качественно повысить прочность алюминиевого композита. Она составит 30%, что соответствует значениям, полученным при холодном прессовании композита с последующим спеканием. Как для холодного, так и горячего прессования алюминиевых образцов, при условии отсутствия карбидной фазы, упрочненных углеродом, результаты хорошо описываются соотношением Холла-Петча, что позволяет сделать предположение о преимущественном влиянии размера зерна

на твердость исследованных материалов. Компактирование материала Al-УНВ при 980 °С приводит к разрушению углеродных волокон и образованию карбидных связей, что подтверждено данными РФЭС. При образовании карбида на поверхности раздела фаз, упрочнение происходит за счет образования новой фазы  $Al_4C_3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Rudskoy. Effect of hot pressing modes on the structure and properties of an aluminum –carbon nanofibers composite material / T.S. Koltsova, F.M. Shakhov, O.V. Tolochko, V.G. Mikhailov // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – 56(9-10). – С. 525–530.
2. А.Д. Бреки. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х / Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова, О.В. Толочко, С.Е. Александров, А.А. Лисенков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий, А.Н. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 4 (21). – С. 11–23.
3. А.Н. Скворцова. Механизмы упрочнения и свойства композиционных материалов с углеродными нановолокнами / К.А.Лычева, А.А. Возняковский, Т.С.Кольцова, Т.В.Ларионова // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – 25. – С. 30–36.