

ВЗРЫВНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННОЙ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Чж. Чжао, С.-Ц. Ли, Х.-Х. Янь, Д.-Х. Лю

Отделение инженерной механики, Технологический университет Дайляна, Государственная лаборатория структурного анализа промышленного оборудования, 116024 Дайлян, КНР, zhaozheng@china.com.cn

Рассмотрено получение медного сплава, упрочненного наночастицами оксида алюминия; прочность и высокотемпературные свойства такого сплава выше, чем у чистой меди. Предложена новая технология получения образцов, включающая в себя три процесса: механическое сплавление, спекание в среде водорода и взрывное компактирование. Получены объемные образцы $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ плотностью 97.86 % от теоретически возможной и твердостью $H_V = 112$. Исследование микроструктуры показало, что частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ диспергированы в медной матрице и сохраняют наноразмерный масштаб.

Ключевые слова: взрывное компактирование, спекание в водороде, медный сплав, наночастицы оксида алюминия.

ВВЕДЕНИЕ

Медь, упрочненная наночастицами оксида алюминия, привлекает к себе большое внимание значительно улучшенными высокотемпературными свойствами по сравнению с чистой медью. Наночастицы оксида алюминия, диспергированные в медной матрице, повышают ее прочность благодаря препятствованию движению дислокаций. Упрочненная наночастицами оксида алюминия медь сохраняет хорошую электрическую проводимость и не размягчается даже при температуре, приближающейся к точке плавления меди. В настоящее время она широко используется в качестве электродов для точечной сварки, сопел для подачи кислорода, материала для контактов вместо меди и серебра.

Процесс получения меди, упрочненной наночастицами оксида алюминия, состоит из двух фаз.

1. Обработка порошков. Порошки меди наноразмерного оксида алюминия должны быть смешаны однородно. Эффективными методами получения однородных порошков являются механическое сплавление, термохимический процесс [1] и процесс внутреннего окисления [2].

2. Получение объемного материала высокой плотности. В настоящее время основные способы получения такого материала — литье

с постоянным перемешиванием, горячее изостатическое прессование и взрывное компактирование. Последнее заслуживает большего внимания из-за простоты оборудования, низкой стоимости и прекрасного качества продукции по сравнению с другими технологиями.

При взрывном компактировании ударная волна, генерируемая детонацией взрывчатого вещества (ВВ), создает в течение нескольких микросекунд высокое давление (1 ÷ 50 ГПа) в уплотняемом порошке. Длительность нагружающего давления настолько мала, что размер кристаллических частиц не успевает увеличиться, и соударение частиц приводит только к нагреву поверхности с последующим охлаждением со скоростью около 10^9 °C/с согласно оценке [3]. Деформация частиц, схлопывание пор, поверхностный нагрев и локальная сварка [4, 5], происходящие во время взрывного компактирования, уплотняют смешанные порошки, и в результате получается объемный образец с прекрасными свойствами.

ЭКСПЕРИМЕНТ

1. Экспериментальная сборка (рис. 1). Порошок помещался в стальную трубу, вокруг которой соосно располагалось насыпное ВВ, ограниченное снаружи трубой из поливинилхлорида (ПВХ). В качестве ВВ использовалась смесь пластического взрывчатого вещества С-4 со стеклянными микробаллонами, которые служили для уменьшения скорости детонации (массовая доля микробаллонов 20 %).

Li Xiao-jie, Zhao Zheng, Yan Hong-hao, Liu Da-hui.
Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, The State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China.

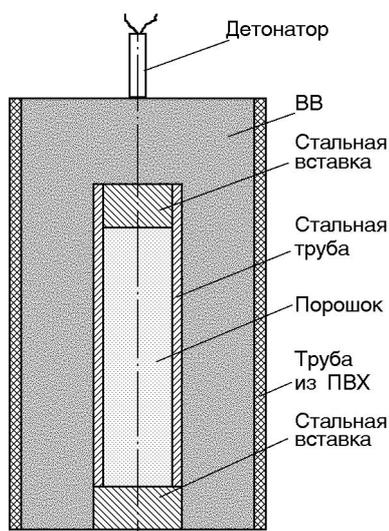


Рис. 1. Экспериментальная сборка

Скорость детонации такого композитного ВВ 4000 м/с, детонационное давление ≈ 4 ГПа.

2. Обработка смешанных порошков методом механического сплавления. Исходными материалами для обработки служили порошки электролитической меди и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с массовым соотношением 100 : 1. Диаметр частиц медного порошка 74 мкм, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ — 100 нм. Для получения однородной смеси выбран метод механического сплавления в шаровой мельнице в результате соударения стальных шаров с высокой энергией. В ходе перемешивания очень прочные частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ внедряются в мягкие частицы меди и постепенно диспергируют с одновременной деформацией частиц меди, разрушением и холодной сваркой.

Скорость вращения шаровой мельницы 400 об/мин, время работы 20 ч. Соотношение масс стальных шаров и смешиваемого порошка 7 : 1. Для предотвращения окисления медных частиц шаровая мельница заполнялась аргоном.

3. Спекание в среде водорода. После измельчения порошок $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ помещался в стальную трубу, прессовался до 60 % от теоретической плотности и затем спекался при температуре 800 °С в течение 30 мин с одновременной подачей водорода в стальную трубу. Спекание происходит при температуре, меньшей температуры плавления меди, т. е. в твердой фазе, что способствует повышению плотности материала, уменьшению остаточных напряжений и, кроме того, препятствует росту кристалличе-

Рис. 2. Образец $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ после взрывного компактирования

ских частиц. Инжекция водорода во время спекания необходима для устранения кислорода в меди, поскольку образование оксида меди может сильно уменьшить плотность, прочность и электрическую проводимость объемного образца $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

4. Взрывное компактирование и окончательная обработка. После спекания стальная труба с порошком вакуумировалась, герметизировалась и в таком состоянии подвергалась взрывному компактированию. После компактирования длина и диаметр стальной трубы уменьшались почти на 2 мм. Затем порошок в стальной трубе вновь спекался в течение 1 ч при температуре 800 °С, чтобы устранить микротрещины и микропоры, а также повысить плотность. По окончании стальную трубу удаляли на токарном станке. Полученный объемный образец показан на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На оси полученного образца имеется небольшое «маховское» отверстие диаметром менее 0.5 мм, образованное вследствие отражения ударной волны на оси и растяжения в ней скомпактированного материала. «Маховское» отверстие уменьшает плотность материала. Плотность данного образца, измеренная методом Архимеда в толуоле, составила 97.86 % от теоретической. После удаления маховской зоны плотность возросла до 98.61 % от теоретической. Следовательно, наличие «маховского» отверстия уменьшает плотность пример-

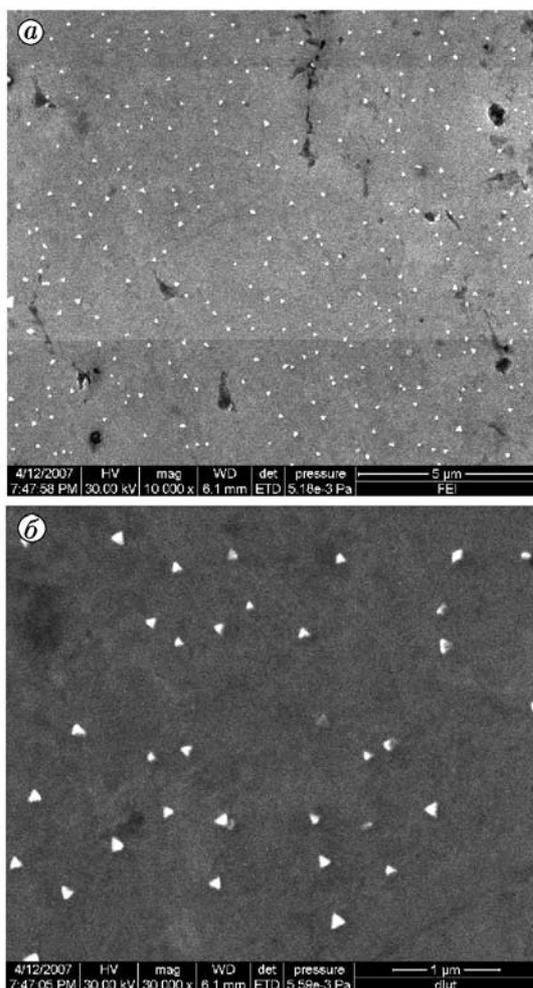


Рис. 3. Микроструктура $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ после взрывного компактирования:

a — увеличение $\times 10\,000$, *b* — $\times 30\,000$

но на 0.8 %.

Микроструктура образца исследовалась при помощи сканирующего электронного микроскопа. Как видно на рис. 3, *a*, частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ однородно распределены в медной матрице, в которой много микротрещин и микропор. Почти каждая частица $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ имеет форму тетраэдра, боковая сторона которого равна ≈ 100 нм (рис. 3, *b*). Частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

не агломерированы и сохраняют нанометрический масштаб. Прочность объемного образца составила $H_V = 112$ при нагрузке 5 кг. Прочность чистой меди всего лишь $H_V = 80$. Следовательно, упрочнение при помощи $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ дает хороший результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный объемный образец состава $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ характеризуется высокой плотностью, прочностью и однородной микроструктурой. Это указывает на эффективность технологии его получения, включающей в себя три процесса: механическое сплавление, спекание в среде водорода и взрывное компактирование. Оптимизация технических параметров и использование горячего прессования могут улучшить характеристики получаемого материала. Работа в этом направлении будет продолжена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee D. W., Kim B. K. Nanostructured $\text{Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite produced by thermochemical process for electrode application // *Materials Lett.* 2004. V. 58. P. 378–383.
2. Shi Z.-Y., Yan M.-F. The preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Cu}$ composite by internal oxidation // *Appl. Surface Sci.* 1998. V. 134. P. 103–106.
3. Benson D. J., Nellis W. J. Dynamic compaction of copper powder: Computation and experiment // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65, N 4. P. 418–420.
4. Mamalis A. G., Vottea I. N., Manolacos D. E. On the modeling of the compaction mechanism of shock compacted powders // *J. Materials Processing Technol.* 2001. V. 108. P. 165–178.
5. Shao B.-H., Gao J.-H., Li G.-H. The mechanism of energy deposition at the interface of metal powder in explosive consolidation // *Explosion and Shock Waves.* 1989. V. 9, N 1. P. 17–27.

Поступила в редакцию 15/XII 2006 г.,
в окончательном варианте — 13/VII 2007 г.