

УДК 534.222.2+621.7.044.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ ВОЛЬФРАМОМЕДНОГО НАНОКОМПОЗИТА

Чж.-Л. Ван, С.-Ц. Ли, Х.-Х. Янь и др.

Отделение машиностроения, Технологический университет Даляня, 116024 Далянь, Ляонин, Китай
wzldlut@sina.com

Методом взрывного компактирования получены W—Cu-наноконпозиты. Исходные нанокристаллические порошки W—Cu приготовлены путем механического сплавления и исследованы при помощи рентгенодифракционного анализа. Максимальная плотность компактированных образцов реализуется при скорости детонации 5 300 м/с. Установлено, что состав и распределение элементов в компактированных образцах однородны, твердость по Виккерсу составляет 320, плотность — 99.1 % от теоретически максимальной.

Ключевые слова: наноконпозит, W—Cu, взрывное компактирование, плотность.

ВВЕДЕНИЕ

Композиты состава вольфрам — медь в настоящее время широко используются в многочисленных приложениях, где необходимо сочетание высокой тепло- и электропроводности меди с высокой температурой плавления и низким коэффициентом расширения вольфрама. Сочетание этих двух элементов позволяет оптимизировать и другие свойства сплава, такие как пластичность, механическая прочность, сопротивление коррозии и износостойкость при повышенных температурах. Такие композитные материалы востребованы в первую очередь при производстве электрических контактов для высоких напряжений, сварочных электродов, электроразрядных машин [1, 2]. W—Cu-композиты, содержащие 5 ÷ 20 % меди (по массе), применяются для изготовления радиаторов, поскольку обладают высокой теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения, близкого к коэффициенту расширения керамики. W—Cu-композиты, содержащие 20 ÷ 40 % меди, служат материалом для электрических контактов и высокоплотных облицовок кумулятивных зарядов.

Растущий интерес к производству нанокристаллических и аморфных композитов вызван их прекрасными физическими и механическими свойствами по сравнению с крупнозернистыми материалами [3]. Обычно для получения плотных W—Cu-композитов используют-

ся пропитывание вольфрама медью или жидкофазное спекание порошковой смеси W—Cu [4]. Однако получить плотные композиты с однородной структурой трудно, поскольку вольфрам и медь не растворяются друг в друге. Кроме того, с ростом времени нахождения порошков при высокой температуре они рекристаллизуются и размеры их зерен увеличиваются. По мере развития процессов механического сплавления порошковых смесей W—Cu [5] стало возможным получение плотных композитов с однородной структурой.

При взрывном компактировании порошки уплотняются под действием ударной волны, генерируемой при детонации взрывчатого вещества (ВВ). Во время прохождения ударного фронта давление в контейнере превышает 1 ГПа, в результате чего происходит очень быстрая консолидация порошка. Высокое давление действует в течение короткого времени — порядка 1 мкс, скорость деформации достигает высоких значений — $10^7 \div 10^8 \text{ с}^{-1}$. Деформация частиц, схлопывание пор, поверхностный нагрев и локальная сварка [6–8] приводят к уплотнению порошковой смеси и в конечном итоге к образованию объемного материала высокой плотности с превосходными свойствами. Обзор литературы показал, что лишь небольшое число наноструктурированных систем получено путем динамической консолидации, но во всех случаях отмечалось, что сохранение наноструктуры в ходе консолидации возможно [9–13].

В данной работе W—Cu-композит получен при взрывном компактировании смеси порош-

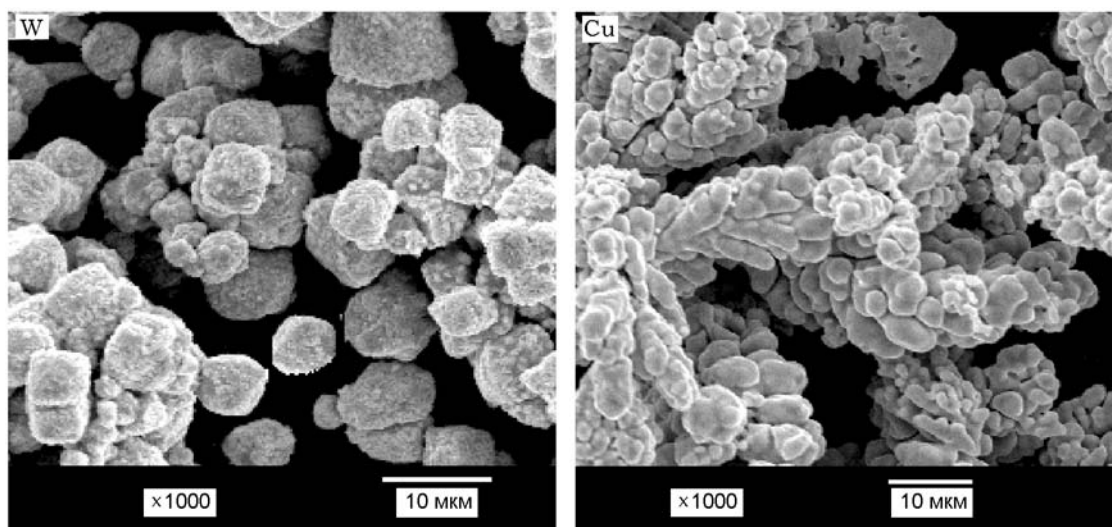


Рис. 1. Морфология исходного порошка

ков (25 % W, остальное Cu), предварительно сплавленной механическим путем. Исследована микроструктура этого композита и определены некоторые его физические характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве исходных использованы порошки W (чистота 99.8 %, размер зерна ≤ 10 мкм) и Cu (чистота 99.9 %, размер зерна ≤ 75 мкм). Морфология этих порошков показана на рис. 1. Смесь порошков (25 % W, остальное Cu) механически сплавлялась в планетарной шаровой мельнице. Порошки помещали в герметичные контейнеры из нержавеющей стали объемом 300 см³, туда же загружали смесь шаров из нержавеющей стали ($\varnothing 20$, 10 и 5 мм). Отношение массы шаров к массе порошка составляло примерно 4 : 1. Контейнеры вращались со скоростью 350 об/мин в течение различного времени: 10, 30 и 50 ч.

Порошковая смесь W—Cu, размолотая в течение 50 ч, предварительно уплотнялась в контейнере путем одноосного прессования до ≈ 56 % от теоретической плотности (16.73 г/см³) и восстанавливалась в среде водорода при температуре 850 °С в течение 5 ч. Взрывное компактирование этой смеси проводили в цилиндрической сборке [14, 15]. В качестве контейнера для порошка использовали металлическую трубу из низкоуглеродистой стали внутреннего диаметра 18 мм, длиной 80 мм, с толщиной стенки 2 мм, закрытую с двух сторон вставками. Металлическая труба с по-

рошком помещалась внутри полихлорвиниловой (ПХВ) трубы, а кольцевой зазор между этими трубами заполнялся насыпным ВВ. В качестве ВВ использовали гексоген или ANFO (смесь аммиачной селитры с жидким топливом). Этот заполненный кольцевой зазор далее называется толщиной слоя ВВ. Насыпная плотность ВВ составляла ≈ 1.0 г/см³, толщина слоя — 18 мм. Скорость детонации варьировали, изменяя соотношение компонентов.

После инициирования ВВ кольцевой детонационный фронт, распространяющийся в аксиальном направлении, разгонял стенку кон-

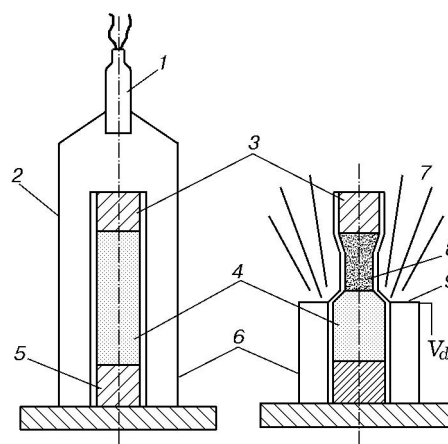


Рис. 2. Экспериментальная сборка:

1 — детонатор, 2 — ПХВ, 3 — верхняя вставка, 4 — порошок, 5 — нижняя вставка, 6 — ВВ, 7 — продукты детонации, 8 — компактированный порошок, 9 — фронт детонации

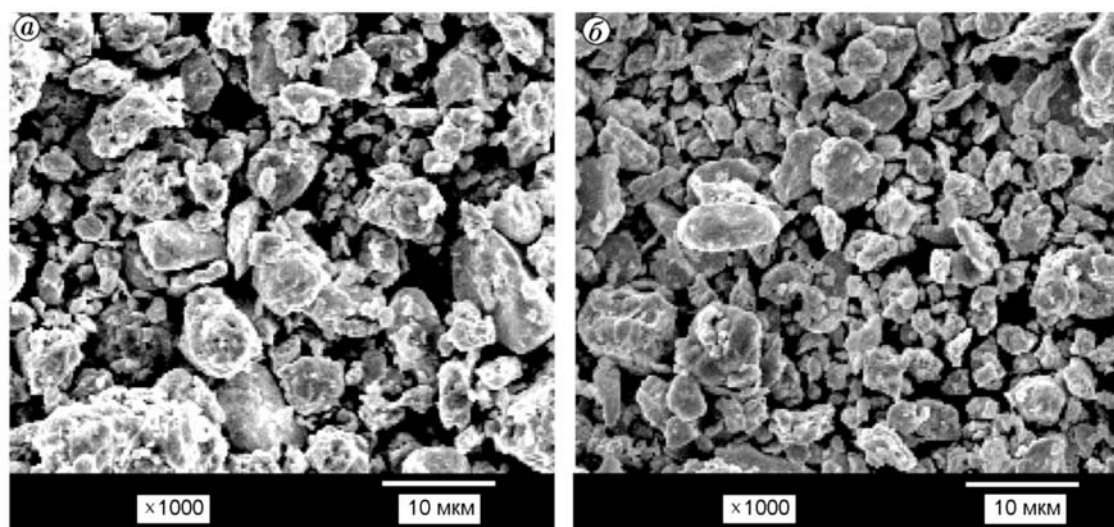


Рис. 3. Микрофотографии порошков W—Cu, полученных при времени помола 10 (а) и 50 ч (б) (сканирующий электронный микроскоп)

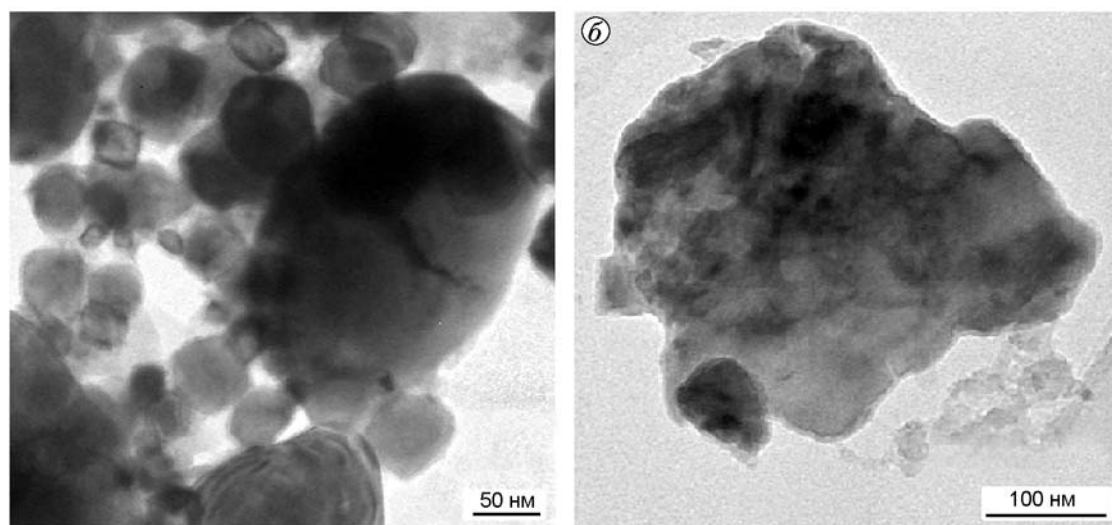


Рис. 4. Микрофотографии отдельных кристаллов W (а) и порошковой смеси W—Cu (б) (просвечивающий электронный микроскоп)

тейнера внутрь, возникшая ударная волна двигалась вглубь и приводила к компактированию и/или консолидации порошка (рис. 2). Макроструктура полученных компактов была очень хорошей, без каких-либо признаков образования в них маховского отверстия.

Полученные образцы разрезали для исследования микроструктуры и определения твердости. Плотность образцов после взрывного компактирования измеряли по методу Архимеда, состав и распределение элементов в образце определяли при помощи электронно-зондового

микроанализа. Поверхность излома анализировали на сканирующем электронном микроскопе, твердость по Виккерсу измеряли микротвердомером.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики размолотых порошков

Морфология порошка после 10 и 50 ч помола представлена на рис. 3. Микрофотоснимки,

сделанные сканирующим электронным микроскопом, показывают, что частицы после 10-часового помола (рис. 3, *a*) имеют неопределенную форму, но после 50 ч их размер становится более однородным (рис. 3, *b*). При этом все частицы представляют собой агломераты более мелких частиц.

Для того чтобы выделить кристаллы вольфрама, порошковую смесь W—Cu, размолотую в течение 50 ч, обрабатывали концентрированной серной кислотой при повышенной температуре. Медь растворялась, а вольфрам не взаимодействовал с кислотой. На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры отдельного кристалла вольфрама и исходной порошковой смеси, сделанные просвечивающим электронным микроскопом.

На рис. 5 показаны рентгенодифрактограммы порошковой смеси W—Cu после 10, 30 и 50 ч помола. Видно, что с ростом времени помола происходит уширение пиков меди, свидетельствующее об уменьшении размеров кристаллитов. Уширение пиков связано с деформацией кристаллов во время помола.

Влияние скорости детонации на плотность компактов

На основе гексогена и ANFO были подготовлены ВВ четырех различных составов со скоростью детонации, меняющейся в диапазоне $D = 4100 \div 5300$ м/с. На рис. 6 видно, что в указанном диапазоне скоростей плотность образцов ρ возрастает от 91.3 до 99.1 % от теоретически возможной. Это можно объяснить

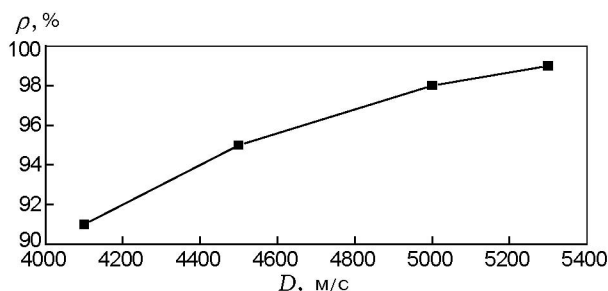


Рис. 6. Влияние скорости детонации на плотность W—Cu-компактов

различием давлений, генерируемых взрывчатым веществом в порошке, поскольку давление, действующее на стенку контейнера, пропорционально квадрату скорости детонации и плотности ВВ [16].

Микроструктура компакта

Поверхности образцов W—Cu-композитов (99.1 % теоретической плотности), полученных взрывным компактированием, механически полировались сначала наждачной бумагой, а затем алмазными пастами. Электронно-зондовый микроанализ W—Cu-композитов показал, что образцы состоят главным образом из элементарных вольфрама и меди и их распределение в образцах однородно.

На рис. 7 представлены рентгенограммы дифракционных полос компактированного образца и исходной смеси, восстановленной при 850°C в среде водорода. Симметрия дифракци-

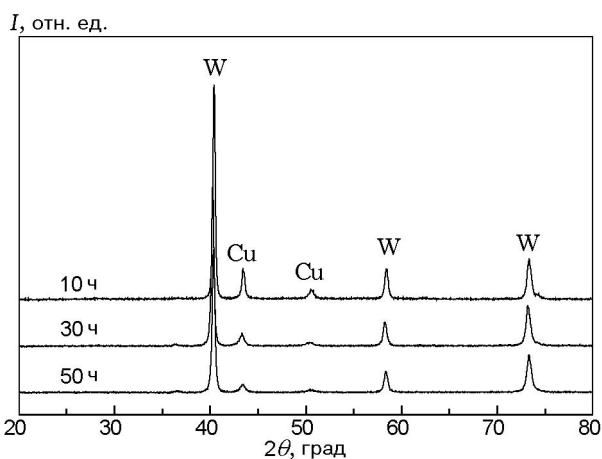


Рис. 5. Рентгенодифрактограммы смесей W—Cu, полученных при различном времени помола

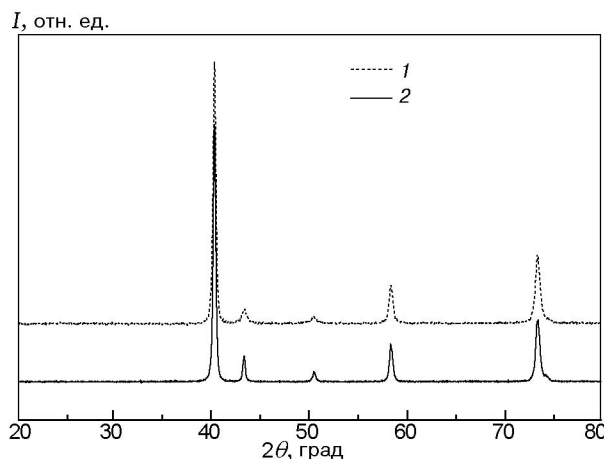


Рис. 7. Рентгенодифрактограммы исходного (1) и компактированного (2) образцов

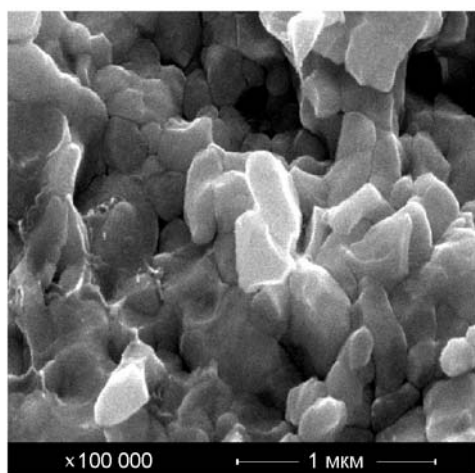


Рис. 8. Поверхность излома образца (сканирующий электронный микроскоп)

онных пиков образцов до и после компактирования подтверждает, что в ходе взрывного компактирования никаких твердофазных реакций не происходит. Размер кристаллов вольфрама в компактированном образце, рассчитанный по формуле Шеррера, составляет 29 нм, а в исходной смеси — 27 нм. Хотя размер кристаллов в компактированном образце несколько больше, этот результат, тем не менее, свидетельствует о возможности сохранения наноструктуры после взрывного компактирования образцов.

На рис. 8 показана типичная поверхность излома образца, представляющая собой внутрискристаллическое (внутризеренное) разрушение. Разлом проходил через межзеренную зону. Такое распространение трещины характерно для области, где адгезия между исходными металлическими частицами слабая, т. е. не произошло полного образования металлургической связи в результате плавления на границе раздела зерен. Микроструктура цилиндрического объемного образца превосходная, трещины отсутствуют. Средний размер частиц компактированного образца <math>< 500\text{ нм}</math>.

С ростом плотности твердость образца возрастает: при $\rho = 91.3\%$ (от теоретической) твердость равна по Виккерсу 230 ± 15 , а при $\rho = 99.1\%$ возрастает до 320 ± 15 . По сравнению с обычными W—Cu-композитами с размером зерна 9 мкм [17, 18] твердость почти в два раза выше. Этот результат показывает, что повышение твердости связано с наличием нанокристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

W—Cu-нанокompозиты могут быть получены путем взрывного компактирования. С ростом скорости детонации ВВ в диапазоне $4\,100 \div 5\,300\text{ м/с}$ плотность компактов возрастает. При толщине слоя ВВ 18 мм и скорости детонации 5 300 м/с плотность достигает почти 100 % от теоретической. Микроструктура цилиндрического объемного образца превосходная, трещины отсутствуют. Размер кристаллов вольфрама, рассчитанный по данным рентгеноструктурного анализа, — 29 нм. Образцы состоят главным образом из вольфрама и меди, и их распределение в образцах однородно. Средняя твердость образца составляет 320 (по Виккерсу).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tilliander U., Bergqvist H., Seetharaman S. Morphology studies of a W—Cu alloy synthesized by hydrogen reduction // *J. Mater Res.* — 2006. — V. 21, N 6. — P. 1467–1475.
2. Cheng J., Lei C., Xiong E., Jiang Y., Xia Y. Preparation and characterization of W—Cu nanopowders by a homogeneous precipitation process // *J. Alloys Comp.* — 2006. — V. 421. — P. 146–150.
3. Koch C. C. *Nanostructured Materials.* — North Carolina: North Carolina State University Raleigh, 2002.
4. Huppmann W. J., Rigger H. Modeling of rearrangement process in liquid phase sintering // *Acta Metall.* — 1975. — V. 23. — P. 965.
5. Kim J. C., Ryu S. S., Kim Y. D., Moon I. H. Densification behavior of mechanically alloyed W—Cu composite powders by the double rearrangement process // *Scripta Mater.* — 1998. — V. 39. — P. 669–676.
6. Mamalis A. G., Vottea I. N., Manolakos D. E. On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders // *J. Mater. Process. Technol.* — 2001. — V. 108. — P. 165–178.
7. Morris D. G. Bonding processes during the dynamic compaction of metallic powders // *Mater. Sci. Eng. A-Struct.* — 1983. — V. 57. — P. 187–195.
8. Shao B. H., Gao J. X., Li G. H. The mechanism of energy deposition at the interface of metal powder in explosive consolidation // *Explosion and Shock Waves.* — 1989. — V. 9. — P. 17–27.
9. Wei Q., Jiao T., Ramesh K. T., Ma E. Nanostructured vanadium: processing and mechanical properties under quasi-static and dynamic compression // *Scripta Mater.* — 2004. — V. 50, N 3. — P. 359–364.

10. **Chen T., Hampikian J. M., Thadhani N. N.** Synthesis and characterization of mechanically alloyed and shock-consolidated nanocrystalline NiAl inter-metallic // *Acta Mater.* — 1999. — V. 47, N 8. — P. 2567–2579.
11. **Jin Z. Q., Chen K. H., Li J., Zeng H., Cheng S.-F., Liu J. P., Wang Z. L., Thadhani N. N.** Shock compression response of magnetic nanocomposite powders // *Acta Mater.* — 2004. — V. 52. — P. 2147–2154.
12. **Korth G. E., Williamson R. L.** Dynamic consolidation of metastable nanocrystalline powders // *Metallurg. Mater. Trans. A.* — 1995. — V. 26. — P. 2571–2578.
13. **Dogan C. P., Rawers J. C., Govier R. D., Korth G.** Mechanical processing, compaction, and thermal processing of α -Fe powder // *Nanostruct. Mater.* — 1994. — V. 4, N 6. — P. 631–644.
14. **Prummer R.** // *Proc. of the 4th Intern. Conf. on Center for High Energy Forming, Colorado, USA.* — 1973. — P. 9.2.1–9.2.27.
15. **Plaksin I., Campos J., Ribeiro J., Mendes R., Direito J., Braga D., Prummer R.** Novelties in physics of explosive welding and powder compaction // *J. Phys. IV.* — 2003. — V. 110. — P. 797–802.
16. **Hoening C. L., Yust C. S.** Explosive compaction of AlN, amorphous Si₃N₄, boron and Al₂O₃ ceramics [J] // *Ceram. Bull.* — 1981. — V. 60, N 11. — P. 1175–1224.
17. **Huang Youting, Chen Wenzhe, Tang De-ping.** Study on microstructure and properties of CuW70 alloy under dynamic and static deformation // *Heat Treatment of Metals.* — 2007. — V. 32. — P. 258–262.
18. **Chen Wenge, Liu Rongbin.** Comparison analysis of microstructures and properties of W/Cu and Mo/Cu composites // *Electr. Eng. Alloy.* — 2001. — V. 4. — P. 3–5.

Поступила в редакцию 27/X 2010 г.