

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Cu/SiC

Рогачев С.О.¹, Просвиряков А.С.¹, Сундеев Р.В.², Хаткевич В.М.¹

¹НИТУ «МИСус», г. Москва, Россия

²Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, Россия

E-mail: csaap@mail.ru

Введение. Разработке композиционных материалов на основе меди в мире уделяется большое внимание ввиду достижения высокой электропроводности, а также высоких прочностных свойств этих материалов, в том числе при повышенных температурах [1, 2]. Упрочнение медной матрицы возможно за счет внесения в нее дисперсных частиц, например, карбидов [3–5]. Уменьшение размера частиц от микронного до нанометрового диапазона приводит к значительному увеличению прочностных характеристик. Такие композиты обычно получают механическим легированием с последующим спеканием и прессованием [6, 7]. Однако полученные композиты характеризуются некоторой неоднородностью структуры, а также охрупченностью, ввиду чего требуется их дополнительная деформационная обработка. Для этой цели могут рассматриваться такие деформационные методы как экструзия, равноканальное угловое прессования (РКУП), кручение под высоким давлением (КВД) и т.д. [8]. В настоящей работе проведено исследование структуры и механических свойств (микротвердость) композита Cu/SiC, полученного механическим легированием и подвергнутого деформации методом КВД.

Материал и методики исследования. В качестве исходных материалов использовали измельченную медную стружку (99.95 мас. % Cu) размером менее 5 мм и частицы альфа-SiC размером 10 мкм. Содержание SiC составило 25 мас. %. (48 об. %). Механическое легирование порошковой смеси осуществляли в планетарной мельнице Gefest 11-3. Время обработки составило 40 мин. Механически легированные порошки прессовали в стальной матрице диаметром 15 мм при давлении 500 МПа. Далее прессованные образцы компактировали одноосным горячим прессованием в матрице при том же давлении и температуре 450 – 500 °С в печи сопротивления, установленной на 100 кН-прессе, в течение 30 мин. Для КВД из полученных прессовок вырезали образцы диаметром 8 мм и исходной толщиной 0.7 и 0.3 мм.

КВД образцов композита проводили при комнатной температуре и давлении 6 ГПа в условиях со стеснением (образец помещали в профилированное отверстие глубиной 0.3 мм в нижней вращающейся наковальне) и без стеснения (образец помещали между плоскими наковальнями). В условиях со стеснением осуществляли 1 оборот нижней наковальни (на образцах толщиной 0.7 мм), без стеснения – 1 и 5 оборотов (на образцах толщиной 0.3 мм). Следует отметить, что деформация в условиях без стеснения приводила к образованию трещин в композите.

Микроструктуру образцов композита до и после КВД исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JSM-IT500 JEOL в режиме отраженных электронов, а также методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100 JEOL с рентгеноспектральным микроанализатором. Подготовку образца для ПЭМ проводили методом фокусированного ионного пучка на сканирующем ионном микроскопе Strata 201 SIMSmapIII×P с помощью галлиевой жидкометаллической ионной пушки.

Измерения микротвердости по Виккерсу (нагрузка 0.5 Н, время выдержки 10 с) проводили на микротвердомере Micromet 5101 (Buehler).

Результаты исследования. Согласно данным просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, структура образцов композита после механического легирования и компактирования (до КВД) состояла из распределенных в медной матрице частиц SiC размером как свыше 3 мкм, так и менее 50 нм, а также участков чистой меди (без частиц SiC) с удельной площадью 16 – 22 %. Микротвердость основного объема композита составила 233±32 HV, а участков чистой меди – 96±9 HV. В результате механического легирования в основном объеме композита

сформировалась преимущественно нанокристаллическая структура с преобладающим размером структурных элементов 30 – 80 нм.

КВД привело к обогащению участков чистой меди частицами SiC, т.е. к формированию более однородной структуры. После КВД на поверхности образца наблюдалось характерное «закручивание» элементов структуры вокруг его центра. Микротвердость бывших участков чистой меди повысилась до 172 ± 16 HV, а микротвердость основного объема композита составила 210 – 380 HV. Существенной разницы в значениях микротвердости образцов после 1-го и 5-ти оборотов КВД не наблюдалось.

Деформация композита методом КВД (1 оборот в условиях со стеснением) привела к формированию в бывших участках чистой меди нано- и, преимущественно, субмикрокристаллической зеренной структуры. Преобладающий размер зерен составил 30 – 120 нм. В основном объеме композита сохранилась нанокристаллическая структура.

Acknowledgement: *The work was carried with financial support from the grant of President of the Russian Federation (No. МК-6239.2018.8). The SEM and TEM studies have been conducted with the use of the equipment of the Collective Use Center “Materials Science and Metallurgy” of NITU “MISIS”.*

Список литературы.

[1] Th. Schubert, B. Trindade, T. Weißgarber, B. Kieback. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications // *Materials Science and Engineering: A*. 475 (2008) 39-44.

[2] D.D.L. Chung. *Materials for Electronic Packaging* / Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995.

[3] Kuen-Ming Shu, G.C. Tu. The microstructure and the thermal expansion characteristics of Cu/SiCp composites // *Materials Science and Engineering: A*. 349 (2003) 236-247.

[4] G. Celebi Efe, S. Zeytin, C. Bindal. The effect of SiC particle size on the properties of Cu–SiC composites // *Materials & Design*. 36 (2012) 633-639.

[5] Prosviryakov A.S. SiC content effect on the properties of Cu-SiC composites produced by mechanical alloying // *Journal of Alloys and Compounds*. 632 (2015) 707-710.

[6] L. Lü, M.O. Lai. *Mechanical Alloying* / Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.

[7] A.S. Prosviryakov, A.A. Aksenov, M.E. Samoshina, M.G. Kovaleva, D.O. Ivanov. Mechanical alloying of Cu–SiC materials prepared with utilisation of copper waste chips // *Powder Metallurgy*. 54 (2011) 382 – 384.

[8] P. Chandran, A. Zafari, E.W. Lui, K. Xia. Processing and characterization of Al–Al₃Nb prepared by mechanical alloying and equal channel angular pressing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 194 (2017) 012008.