

УДК 620.1:621.762

В. Н. ПАСОВЕЦ^{1,2}, В. А. КОВТУН¹, Й. МИРЧЕВ³, В. А. ЛОДНЯ⁴

¹*Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

²*ГНПО порошковой металлургии, Минск, Беларусь*

³*Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария*

⁴*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Представлено влияние углеродного наноструктурного наполнителя на прочностные свойства композиционных материалов на основе медной матрицы. Установлено, что введение 0,06–0,07 мас. % УНТ в медную матрицу позволяет повысить предел прочности при сжатии композита на 6–8% по сравнению с материалами на основе спеченной меди, не содержащими в своем составе наноразмерного наполнителя. Показано, что к механизмам упрочнения при введении УНТ в металлическую матрицу относятся: механизм передачи нагрузки от матрицы к упрочняющим элементам, механизм образования дислокаций за счет различия коэффициентов теплового расширения матрицы и упрочняющей фазы, механизм образования петель Орована.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, металлическая матрица, композиционные материалы, медь, предел прочности при сжатии.

Введение. Композиты на основе медной матрицы применяются в различных отраслях экономики, однако дальнейшее развитие техники предъявляет все более высокие требования к их характеристикам [1]. Одним из перспективных путей улучшения физико-механических характеристик композиционных материалов на основе медной матрицы является введение в их состав наноразмерных наполнителей [2].

К наиболее изученным наноразмерным наполнителям металлических матриц относятся наноструктуры углерода: фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ) и луковичные наноструктуры. При этом высокие прочностные характеристики наноструктур углерода обуславливают возможность создания композитов с повышенными характеристиками прочности по сравнению с существующими материалами [3], а технологии порошковой металлургии позволяют получать указанные композиты.

Повышение прочностных характеристик порошковых композитов на основе порошковых систем «медь – УНТ» по сравнению с медной спеченной матрицей связано как с высокими механическими свойствами наноструктур углерода, так и с особенностями взаимодействия таких наноструктур с материалом матрицы при их контактном взаимодействии [4].

Обзор литературных источников свидетельствует о постоянном росте интереса к работам по введению УНТ в металлические матрицы. Так, поисковый запрос «Carbon nanotube copper composite», сформированный на поиско-

вой платформе Web of Science, которая объединяет реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентных изданиях, в 2010 году выдавал около 100 публикаций, а в 2020 году – 850.

Таким образом, композиционные материалы, получаемые с использованием УНТ, представляют значительный теоретический интерес, а их практическое применение требует проведения дальнейших исследований их прочностных свойств, что и стало предметом данной работы.

Основная часть. К механизмам упрочнения при введении УНТ в медную матрицу относятся следующие механизмы:

1 Передачи нагрузки от матрицы к упрочняющим элементам, основанный на модели сдвигового «запаздывания» [5], которая предполагает идеальное сопряжение упрочняющей фазы и матрицы, что обеспечивает передачу напряжений от матрицы к упрочняющим компонентам только через сдвиговые напряжения [6].

2 Образования дислокаций за счет различия коэффициентов теплового расширения матрицы и упрочняющей фазы, основанный на локальном образовании дислокаций из-за различия параметров кристаллических решеток УНТ и медной матрицы. В опубликованных работах указывается на увеличение прочности композитов из-за несоответствия коэффициентов термического расширения исходных компонентов, например [8]. При этом можно сделать вывод о том, что чем выше разница коэффициентов теплового расширения матрицы и упрочняющей фазы, тем большее увеличение прочности может быть получено.

3 Образования петель Орована, основанный на формировании дислокационных петель. Реализация данного механизма обеспечивается различием кристаллических решеток упрочняющей наноразмерной фазы и металлической матрицы, а также невозможностью пересечения УНТ дислокациями, что в свою очередь препятствуют движению дислокаций в матрице [9] и повышает прочностные свойства композитов с металлической матрицей, наполненных УНТ [10]. Расчеты предела прочности при сжатии порошковых композиционных материалов на основе систем «медь – УНТ» были опубликованы в [11]. В работе [12] впервые предложена аналитическая модель для прогнозирования предела прочности нанокompозитов с металлической матрицей. В рассматриваемой работе также отмечается хорошая согласованность прогнозируемых характеристик с экспериментальными данными [13, 14].

Для достижения цели работы композиционные порошковые материалы получали методом электроконтактного спекания с использованием опытно-промышленной установки на базе машины шовной сварки МШ-3207 (давление прессования 500 МПа, плотность тока 400 А/мм², время спекания 1,4–1,5 с). В работе использовались медный порошок ПМС-1 ГОСТ 4960-2009 и многослойные УНТ со средним наружным диаметром 10–20 нм и средней длиной 850–950 нм. Диспергирование УНТ в металлической медной матрице осуществлялись в процессе механоактивации в течение 60 мин. [15].

На рисунке 1 представлены значения предела прочности при сжатии композитов «медь – УНТ», определенные экспериментальным путем. Предел прочности при сжатии определяли по ГОСТ 25.503-97 на универсальной испытательной машине типа Instron 5567 (США). Испытания проводили при скорости нагружения 5 мм/с. В качестве результата измерения принимали среднее значение, полученное при пяти параллельных испытаниях.

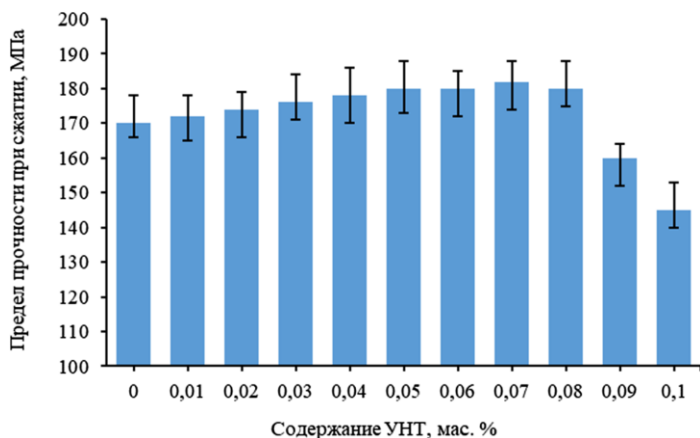


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности при сжатии композитов «медь – УНТ» от содержания УНТ

Значительное снижение предела прочности при сжатии при содержании УНТ свыше 0,07 мас. % связано с разупрочнением металлической матрицы, которое объясняется ухудшением консолидации металлических частиц матрицы вследствие увеличения количества УНТ по границам частиц и образования агломератов УНТ.

На реализацию указанных механизмов упрочнения композиционных материалов при введении нанотрубок в металлическую матрицу указывается в работах [16–19]. Наибольший рост предела прочности при сжатии композиционного материала «медь – УНТ» обеспечивается за счет реализации механизма образования петель Орована [11]. Для подтверждения данного утверждения проведены микроструктурные исследования порошковых композиционных материалов «медь – УНТ» при содержании УНТ 0,07 мас. %.

Межфазное взаимодействие компонентов композиционных материалов «медь – УНТ» оказывает значительное влияние на прочностные свойства композитов. На рисунке 2 представлено ТЭМ-изображение границы раздела исходных компонентов данных композитов, полученное с использованием «JEOL JEM-1011» (Япония). Его анализ показывает, что УНТ механически связаны с медной матрицей без значительных физических зазоров и образования промежуточных соединений. Также просматриваются искажения по-

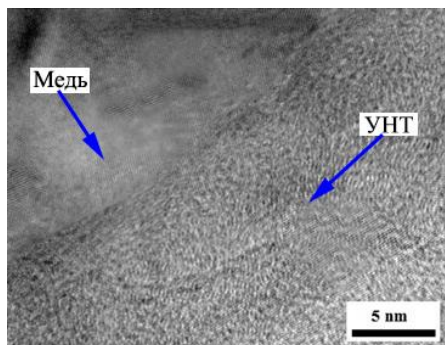


Рисунок 2 – Морфология композиционного материала «медь – УНТ»

муаровых полос на изображениях, полученных с использованием электронных микроскопов.

Для подтверждения представленных результатов повышения предела прочности за счет механизма образования петель Орована были проведены дополнительные микроструктурные исследования, которые показали наличие четких муаровых полос, указывающих на распределение дислокаций в виде петель Орована, образующихся за счет значительных сжимающих напряжений и деформаций сдвига, которые создаются в местах взаимодействия медной матрицы и УНТ при деформировании в процессе приложения давления при электроконтактном спекании (рисунок 3). Также необходимо обратить внимание на расстояние между муаровыми полосами, которое составляет $\approx 1,13$ нм, что согласуется с расчетными значениями расстояний между муаровыми полосами, представленными в работе [20].

Заключение. Таким образом, показано влияние углеродного наноструктурного наполнителя на прочностные свойства композиционных материалов на основе медной матрицы. На основании анализа результатов исследований установлено, что введение 0,06–0,07 мас. % УНТ в медную матрицу позволяет повысить предел прочности при сжатии композита, определенный экспериментальным путем, на 6–8 % по сравнению с материалами на основе спеченной меди, не содержащими в своем составе наноразмерного наполнителя [8, 21, 22].

Авторы выражают признательность коллегам из Института механики Болгарской академии наук за помощь, оказанную при проведении исследований.

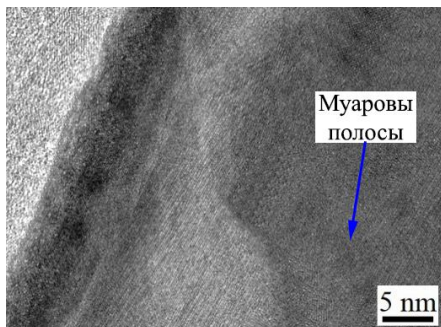


Рисунок 3 – Изображение области межфазного взаимодействия, полученное с использованием ТЭМ высокого разрешения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Investigation on microstructure, mechanical, and tribological performance of Cu base hybrid composite materials / S. Sap [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 6990–7003.

2 Potential and challenges of metal-matrix-composites reinforced with carbon nanofibers and carbon nanotubes / E. Neubauer [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70, is. 16. – P. 2228–2236.

3 **Perez-Aranda, C.** Electromechanical properties of carbon-nanostructured elastomeric composites measured by digital image correlation / C. Perez-Aranda, F. Aviles // *Composites Part C: Open Access*. – 2021. – Vol. 5. – Article 100161. – 10 p.

4 Thermal properties of composite materials based on the powder systems «copper-CNTs» / V. N. Pasovets [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – Vol. 92, is. 5. – P. 1267–1275.

5 **Kelly, A.** Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum / A. Kelly, W. R. Tyson, J. Mech // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1965. – Vol. 13, is. 6. – P. 329–350.

6 Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy reinforced by carbon nanotubes coated with MgO / Q. H. Yuan [et al.] // *Carbon*. – 2016. – Vol. 96. – P. 843–855.

7 The effects of carbon nanotubes on the mechanical and wear properties of AZ31 alloy / Zh. Mingyang [et al.] // *Materials*. – 2017. – Vol. 10, is. 12. – Article 1385. – 17 p.

8 **Miller, W. S.** Strengthening mechanisms in particulate metal-matrix composites: Reply to comments by Arsenault / W. S. Miller, F. J. Humphreys // *Scripta Metallurgica et Materialia*. – 1991. – Vol. 25, is. 11. – P. 2623–2626.

9 **Губенко, С. И.** Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров. – Киев : Наукова думка, 2016. – 528 с.

10 **Li, Q .Q.** CNT reinforced light metal composites produced by melt stirring and by high pressure die casting / Q. Q. Li, C. A. Rottmair, R. F. Singer // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70, is. 16. – P. 2242–2247.

11 **Пасовец, В. Н.** Упрочнение композиционных материалов на основе металлической матрицы и углеродных нанотрубок / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // *Весті Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2019. – Т. 64, № 2. – С. 166–174.

12 **Zhang, Z.** Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength / Z. Zhang, D. L. Chen // *Scripta Materialia*. – 2006. – Vol. 54, is. 7. – P. 1321–1326.

13 Microstructure and strengthening mechanism of carbon nanotubes reinforced magnesium matrix composite / C. D. Li [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 597. – P. 264–269.

14 Deformation and strengthening mechanisms of a carbon nanotube reinforced aluminum composite / F. Mokdad [et al.] // *Carbon*. – 2016. – Vol. 104. – P. 64–77.

15 Research of the interaction energy of carbon nanotubes in the agglomeration process / V. Kovtun [et al.] // *International Journal «NDT Days»*. – 2020. – Vol. 3, is. 2. – P. 72–79.

16 **Vencl, A.** Friction and wear properties of copper-based composites reinforced with micro- and nano-sized Al₂O₃ particles / A. Vencl, V. Rajkovic, F. Zivic // *Balkantrib'2014 : Proceedings of 8th International conference on tribology, Sinaia, Romania, 30 October* –

1 November 2014. – Ploiesti : Petroleum-Gas University of Ploiesti Publishing House, 2014. – P. 357–364.

17 Strength and failure mechanisms of CNT-reinforced copper nanocomposite / B. Faria [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 145. – P. 108–120.

18 Effect of CNTs in copper matrix on mechanical characteristics and tribological behavior under dry sliding and boundary lubrication conditions / L. Zhao [et al.] // Materials. – 2019. – Vol. 12, is. 13. – Article 2203. – P. 1–13.

19 **Mirza, F. A.** A unified model for the prediction of yield strength in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites / F. A. Mirza, D. L. Chen // Materials. – 2015. – Vol. 8, is. 8. – P. 5138–5153.

20 **Лукьянович, В. М.** Электронная микроскопия в физико-химических исследованиях. Методика и применение / В. М. Лукьянович. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 274 с.

21 **Пасовец, В. Н.** Механизмы формирования структуры и свойств металлополимерных нанонаполненных износостойких композитов при высокоскоростном электроконтактном спекании / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Порошковая металлургия. – 2017. – Вып. 40. – С. 104–112.

22 **Пасовец, В. Н.** Исследование механизма повышения физико-механических характеристик композиционных материалов на основе порошковых систем медь – углеродные нанотрубки / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский // Наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. – Минск : Институт тепло- и массообмена, 2016. – С. 264–269.

V. N. PASOVETS^{1,2}, V. A. KOVTUN¹, Y. MIRCHEV³, V. A. LODNYA⁴

¹University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

²State research and production powder metallurgy association, Minsk, Belarus

³Institute of Mechanics of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

⁴Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CARBON NANOTUBES ON THE STRENGTH PROPERTIES OF COPPER-BASED COMPOSITE MATERIALS

This paper shows the effect of a carbon nanostructured filler on the strength properties of composite materials based on a copper matrix. Introduction 0.06–0.07 wt. % CNTs in a copper matrix makes it possible to increase the ultimate compressive strength of the composite by 6–8 % compared to materials based on sintered copper that do not contain a nano-sized filler in their composition. The mechanism of load transfer from the matrix to the strengthening elements, the mechanism of formation of dislocations due to the difference in the coefficients of thermal expansion of the matrix and the strengthening phase, the mechanism of the formation of Orowan loops constitute the general mechanism of strengthening when CNTs are introduced into the metal matrix.

Keywords: carbon nanotubes, metal matrix, composite materials, copper, ultimate compressive strength.

Получено 09.11.2022