

Научная статья

УДК 621.2.082.18

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>



Ф.А. Юнусов ✉, Т.В. Ларионова, О.В. Толочко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [yunusov.firuz@mail.ru](mailto:yunusov.firuz@mail.ru)

## **ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

*Аннотация.* С помощью механического размола с последующим компактированием методом горячего прессования были получены композиционные материалы – алюминий-фуллереновая сажа с последующим легированием. Показано влияние легирования на структуру и свойства композиционных материалов. Добавление меди и никеля привело к формированию более плотной структуры и увеличению твердости, а добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита. Трибологические свойства композиционных материалов алюминий-фуллереновой сажи с легирующим элементом исследуются и сравниваются с результатами композитов алюминий-фуллереновой сажи, полученных при аналогичных условиях. Морфология поверхностей износа была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием.

*Ключевые слова:* механический размол, композиционный материал, легирующий элемент, механические свойства, трибология, механизм трения.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90079.

*Для цитирования:*

Юнусов Ф.А., Ларионова Т.В., Толочко О.В. Влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>



F.A. Yunusov ✉, T.V. Larionova, O.V. Tolochko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia

✉ [yunusov.firuz@mail.ru](mailto:yunusov.firuz@mail.ru)

## INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM-BASED COMPOSITES WITH CARBON NANOPARTICLES

*Abstract.* Aluminum–fullerene soot composite materials with subsequent alloying were obtained by mechanical milling followed by hot press compacting. The influence of the alloying on the structure and properties of the composite materials is shown. The addition of copper and nickel led to denser structure and increased hardness, and the addition of titanium and zinc had almost no effect on the structure and hardness of the composite. The tribological properties of the aluminum–fullerene soot composites with alloying are investigated and compared with the results of the aluminum–fullerene soot composites obtained under similar conditions. The morphology of the wear surfaces was examined using scanning electron microscopy (SEM). The addition of copper and nickel resulted in a change in the friction mechanism from oxidation–adhesion with micro-cutting to oxidation with micro-cutting.

*Keywords:* mechanical milling, composite material, alloying element, mechanical properties, tribology, friction mechanism.

*Acknowledgements:* The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-33-90079.

*Citation:*

F.A. Yunusov, T.V. Larionova, O.V. Tolochko, Influence of alloying elements on the structure and properties of aluminum-based composites with carbon nanoparticles, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 75–84, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>

**Введение.** Создание легких материалов с улучшенными механическими и физическими свойствами на сегодняшний день является актуальной задачей. Добавление углеродных наноструктур, таких как: графены [1–2], углеродные нанотрубки [3–6], фуллерены [7–8] и углеродные нановолокны [9] в металлы может значительно повысить их механические характеристики за счет дисперсного упрочнения, при этом не приводя к увеличению удельной массы и сохраняя тепло- и электропроводность на высоком уровне [10]. В работах [11–12] рассматривают влияние углеродных нанотрубок на физико-механические свойства сплава Al–Cu. Добавление углеродных нанотрубок привело к повышению твердости за счет уменьшения размера зерен и частично из-за образования карбида алюминия. Авторы работы [13] подробно изучали влияние углеродных нанотрубок на структуру и свойства сплава системы Al–Zn–Mg–Cu. В качестве исходного материала в одном случае был использован распыленный порошок сплава AA7075, а в другом – чистые металлические порошки. Показано, что при добавлении УНТ в распыленный порошковый сплав они были серьезно повреждены из-за его высокой твердости. При использовании чистых металлических порошков структурная целостность УНТ сохранилась, что привело к повышению прочности без значительной потери пластичности. В работе [14] введение легирующих происходило на предварительном этапе путем смешивания на молекулярном уровне; таким образом был получен композиционный порошок углеродные нанотрубки–медь и углеродные нанотрубки–никель. Затем полученный композиционный порошок методом размла смешивали с алюминии-

ем. Было высказано предположение, что наличие фазы  $Al_4C_3$  на границе раздела Al-УНТ способствует лучшей передаче нагрузки между матрицей и упрочняющей углеродной фазой. Добавление Ni в композиты Al/Ni-УНТ привело к стабилизации и равномерному распределению УНТ в матрице, что оказалась причиной улучшения трибологических характеристик. Значение твердости для композитов, легированных никелем, оказалось на 27% выше, чем у композитов Al-УНТ. В композитах Al/Cu-УНТ вдоль границ зерен выделилась упрочняющая фаза  $Al_2Cu$ . Соответственно, композиты из УНТ с добавлением Cu и Ni обладают лучшими механическими свойствами, чем композиты Al-УНТ. В [15] композиты на основе алюминиевой матрицы, упрочненные углеродными нанотрубками и дополнительно легированные титаном, были получены методом порошковой металлургии путем введения в систему УНТ/Al порошков Ti. Оказалось, что добавление Ti в композит УНТ/Al привело к росту прочности (~51% UTS) по сравнению с композитом без добавления Ti, что являлось результатом комплексного эффекта УНТ, наноразмерных частиц  $TiAl_3$  и уменьшения размера зерна.

Таким образом дополнительное добавление некоторых металлов в качестве легирующего элемента приводит к повышению физико-механических свойств металло-матричных композиционных материалов алюминий-углеродные наночастицы.

*Целью данной работы* является изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами.

#### Материалы и методы исследования

Методом порошковой металлургии были получены композиционные материалы алюминий-фуллереновая сажа-легирующий элемент. Для этой цели сначала методом механического размолла были получены композиционные порошки. В качестве исходных материалов были использованы: порошок алюминия марки ПА-4 ГОСТ 6058-73 с размером частиц до 125 мкм, фуллереновая сажа (ФС), содержащая до 30% фуллерена  $C_{60}$ , порошок никеля с размером частиц 80-100 мкм, порошок титана 80-100 и порошок цинка 80-100 мкм. В качестве поверхностно-активного вещества 1 масс.% стеариновой кислоты для предотвращения агломерации фуллереновой сажи, 3 масс.% смеси  $CaCl_2$ , NaCl, KCl в соотношении 2:1:1 в качестве флюса для улучшения контакта между частицами Al.

Механический размол проводился с помощью шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 7 premium line в стальных нержавеющих стаканах объемом 80 мл. Первоначально проводили смешивание порошков со скоростью вращения 200 об/мин в течение одного часа, затем помол при 600 об/мин в течение двух часов в инертной среде. Соотношение массы размольных шаров к массе порошка составляло 10:1. Для предотвращения чрезмерного нагрева порошка измельчение проводилось с 20-минутными перерывами после каждых 15 мин измельчения.

Рентгенофазовый анализ композиционного порошкового и компактного материала проводился на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE в  $CuK\alpha$  при напряжении 30 кВ и силе тока 30 мА.

Композиционные порошки подвергали холодному прессованию при давлении 400 МПа, далее после нагрева пресс-формы до температуры 480°C и выдержки проводили горячее прессование при давлении 200 МПа.

Микротвердость по Виккерсу проверялась на приборе ZWICK ZHU 250 при нагрузке 100 Н и времени выдержки 10 с.

Металлографический анализ микроструктуры производился на оптическом микроскопе Carl Zeiss Observer D1m в диапазоне увеличений X50–1000. Микроскопические исследования проводились на сканирующем микроскопе PhenomProX.

Изучение трения проводилось на реометре DHR-2 при комнатной температуре и постоянной нагрузке 20 Н. Использовалась схема трения «кольцо-плоскость», обеспечивающая постоянство контактного давления в течение всего эксперимента. В качестве контртела было использовано

кольцо из нержавеющей стали. Были проведены ряд испытаний при скоростях скольжения 0,015, 0,03, 0,06, 0,12, 0,18, 0,24, 0,3 м/с.

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведена краткая характеристика легирующих элементов с точки зрения их взаимодействия с элементами композита.

Таблица 1

#### Характеристика легирующих элементов

Table 1

#### Characteristics of alloying elements

Легирующий элемент	Характер взаимодействия с матрицей (Al)	Характер взаимодействия с углеродом
Cu	Входит в твердый раствор (до 5%), образует интерметаллид $Al_2Cu$	Не взаимодействует
Ni	Не входит в твердый раствор, образует интерметаллид $Al_3Ni$	Не образует карбидов, углерод растворяется в твердом растворе до 0.8%
Zn	Входит в твердый раствор (до 82%), не образует интерметаллидов	Не взаимодействует
Ti	Входит в твердый раствор (до 2%), образует интерметаллид $Al_3Ti$	Образует карбид $TiC$ , углерод растворяется в твердом растворе до 2%

На рис. 1 приведена зависимость твердости композита от концентрации легирующих компонентов и микрофотографии поверхностей материалов. Чтобы оценить пористость образцов, приведены изображения нетравленных поверхностей.

Без добавления металлического легирующего композит Al-2%С имеет пористую структуру: пористость составляет около 5% со средним размером пор около 5 мкм. Но тем не менее твердость композита почти в три раза превышает твердость образца, полученного по аналогичной технологии из алюминия без добавления углерода. Упрочнение алюминиевой матрицы обусловлено образованием сложной структуры, в которой углеродные частицы оказываются связаны с матрицей когерентным карбидом. Помимо дисперсного упрочнения матрицы такая структура препятствует процессам возврата и рекристаллизации наклепанных алюминиевых частиц при компактировании.

Наиболее высокая твердость получена на материале Al-2%С с добавлением меди, и как видно на рис. 1, этот материал обладает наиболее плотной и однородной структурой. Добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита. Структура образца с добавлением цинка наиболее близка к структуре образцов Al-С без добавления легирующих. Добавление никеля привело к некоторому уплотнению структуры и незначительному увеличению твердости (на 18%). Можно предположить, что одной из причин образования более плотной структуры при добавлении элементов, образующих интерметаллические соединения с алюминием, является локальный разогрев вследствие экзотермического эффекта.

На рис. 2 приведены результаты рентгенофазового анализа. Видно, что взаимодействие алюминия с углеродом и легирующими с образованием  $Al_4C_3$  и интерметаллидов, происходит только на стадии компактирования.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения. Для всех образцов зависимость имеет единый характер: при увеличении скорости сила трения сначала убывает, а потом, достигнув минимального значения, начинает возрастать. В соответствие с этим

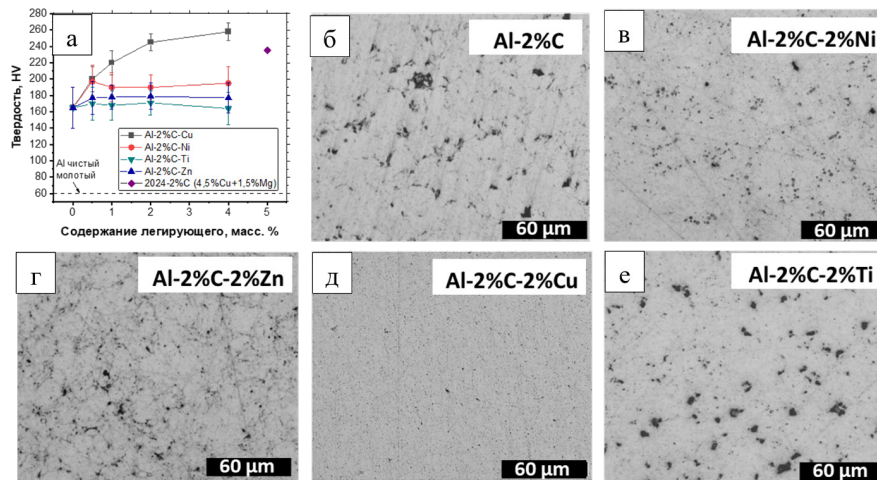


Рис. 1. Зависимость твердости композитов от концентрации легирующих (а), микроструктуры композитов с добавлением Ni (в), Zn (г), Cu (д) и Ti (е) (без травления)

Fig. 1. The dependence of hardness of composites on the concentration of alloying agents (a), microstructure of composites with the addition of Ni (c), Zn (d), Cu (e) and Ti (f) (without etching)

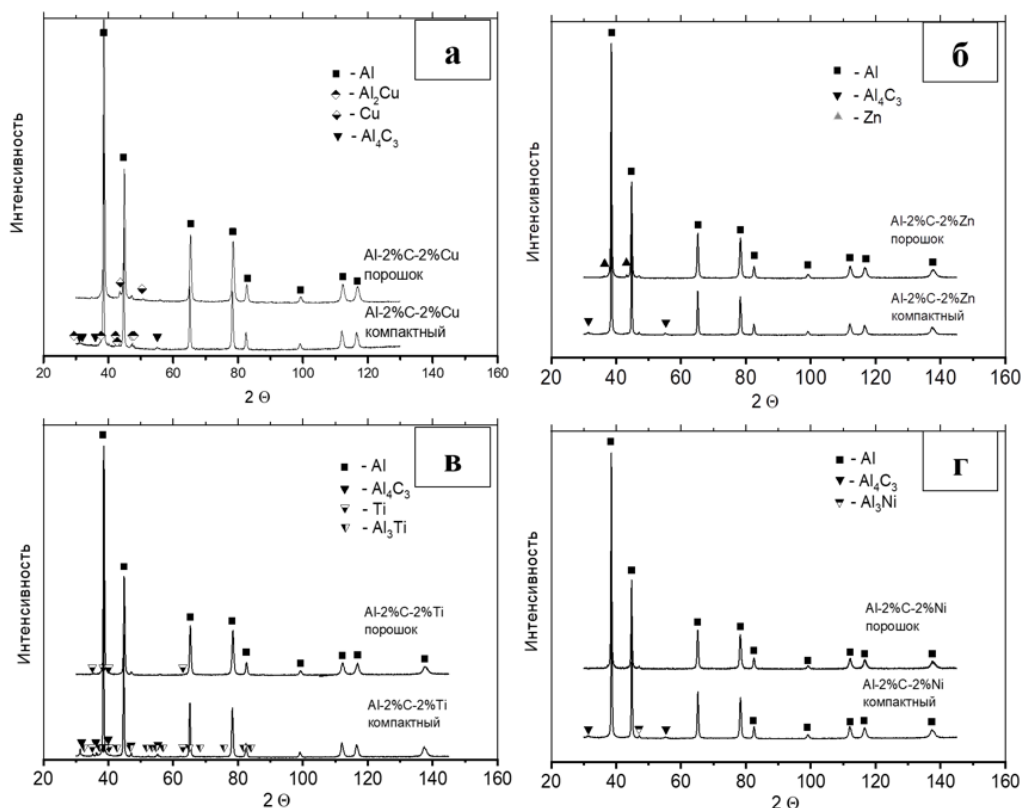


Рис. 2. Рентгенограммы порошковых и компактных композитных материалов Al-2%C-2%Me с добавлением легирующих элементов: а – Cu, б – Ni, в – Zn, г – Ti

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of powder and compact Al-2%C-2%Me composites with alloying elements: a – Cu, b – Ni, c – Zn, d – Ti

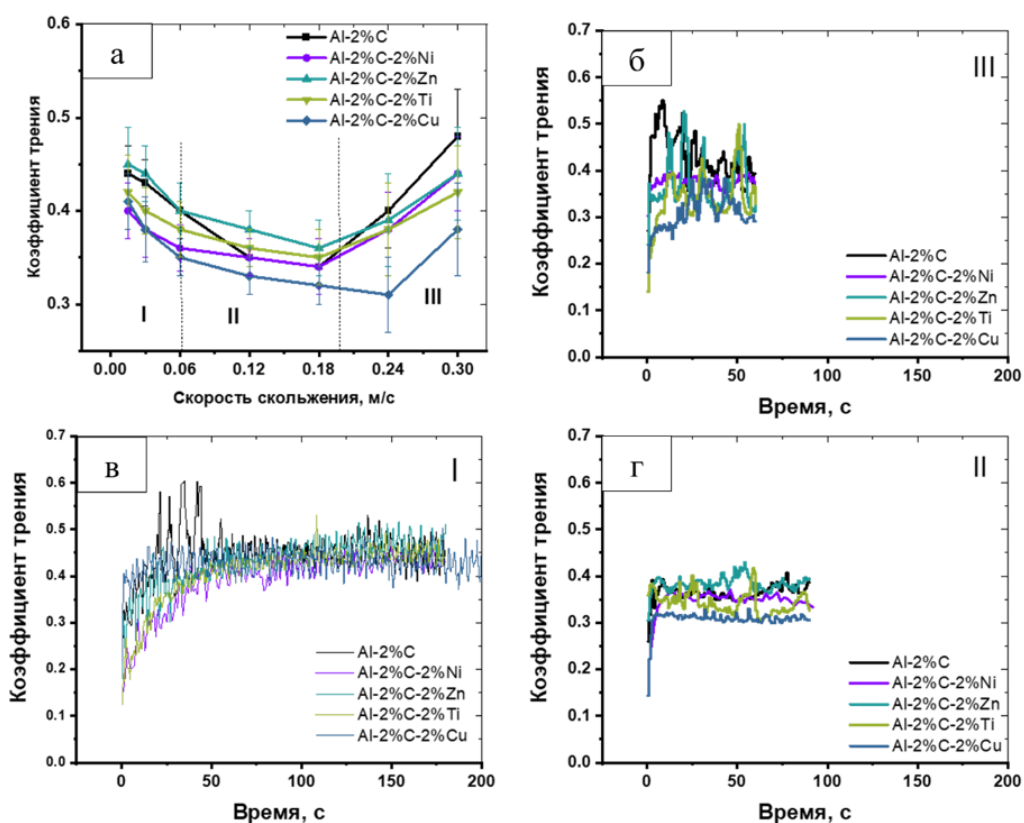


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости и осциллограммы изменения силы трения от времени (а), полученные при скоростях, соответствующих различным участкам для различных режимов для композиционных материалов Al-C-легирующий элемент: 0,015 м/с (б), 0,12 м/с (в) и 0,24 м/с (г)

Fig. 3. The dependence of friction coefficient on speed and oscillograms of friction force change with time (а) obtained at speeds corresponding to different sections for different modes for composite materials Al-C-alloying element: 0.015 m/s (б), 0.12 m/s (с) and 0.24 m/s (д)

можно выделить три участка трения (рис. 3 а). На рис. 3 б-г приведены осциллограммы зависимости силы трения от времени для трех участков: II – стационарный участок соответствует нормальному режиму трения с минимальным значением силы трения и минимальными флуктуациями; I и III – участки патологических процессов, развивающихся при схватывании первого и второго рода, соответственно<sup>1</sup>. Участок нормального режима характеризуется устойчивым значением силы трения, обусловленным минимизацией толщины деформированного слоя и образованием на трущейся поверхности защитных структур, в частности, оксидных пленок<sup>2</sup>.

Устойчивые значения коэффициента трения на втором участке наблюдаются у композиционных материалов Al-2%C-2%Cu и Al-2%C-2%Ni, трение остальных материалов сопровождается значительными флуктуациями. Одна из причин наблюдаемого эффекта связана с механизмом трения.

На рис. 4 приведены СЭМ-изображения дорожек износа композиционных материалов.

На дорожке трения композита без добавления легирующих ясно видны ямки, рытвины и поперечные полосы, что является следствием окислительно-адгезионного износа с микрорезанием. Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием. А добавление цинка и титана суще-

<sup>1</sup> Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев.: «Техника».1970. – С. 396.

<sup>2</sup> Крагельский И.В. Трение и износ. М.: «Машиностроение». 1968. – С. 475.

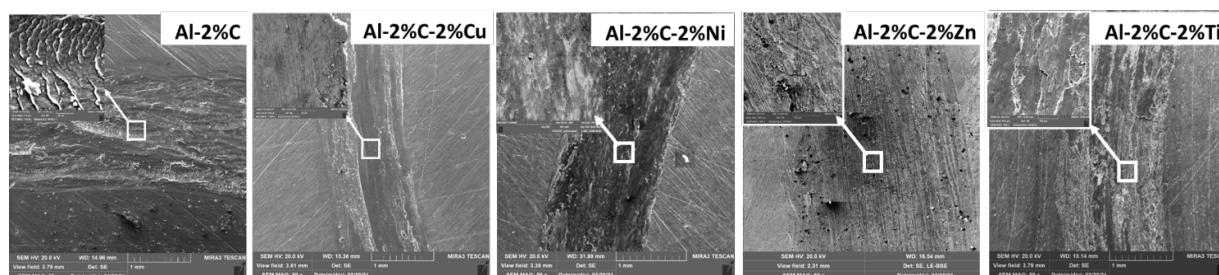


Рис. 4. СЭМ-анализ дорожки износа металло-матричных композиционных материалов Al-C-легирующий элемент  
Fig. 4. SEM analysis of the wear track of metal-matrix composites Al-C-alloy element

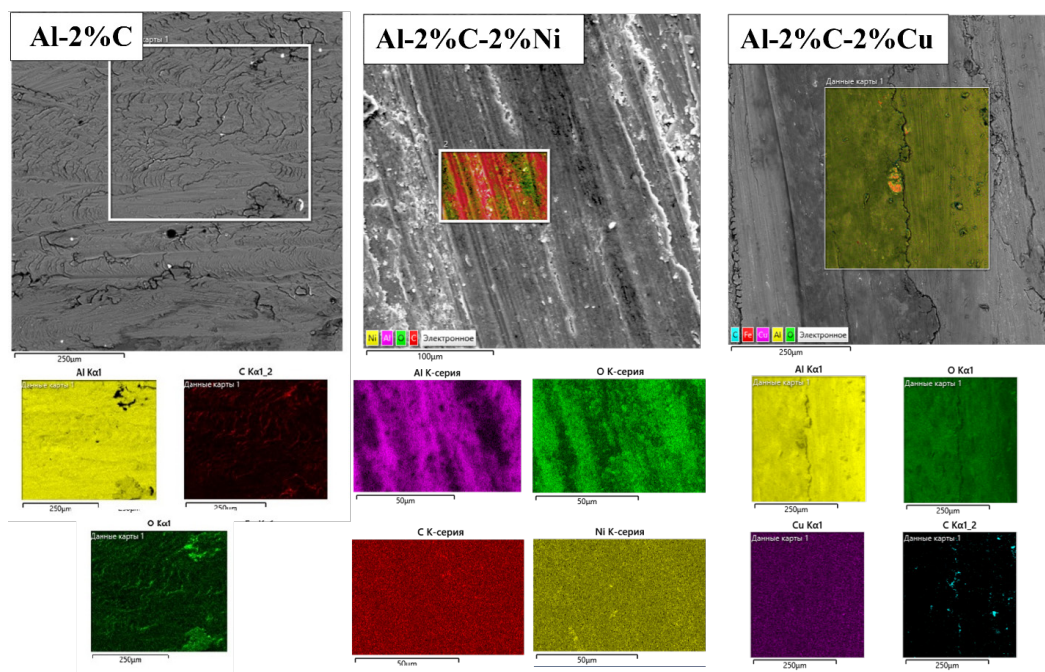


Рис. 5. ЭДС анализ изношенных поверхностей композиционных материалов  
Fig. 5. EDS analysis of worn surfaces of composite materials

ственно не изменило механизма трения. Наблюдаемые большие флуктуации на втором участке на осциллограммах этих материалов (рис. 3) косвенно подтверждают наличие адгезионной составляющей износа. Изменение механизма трения на окислительный свидетельствует о том, что скорость разрушения оксидной пленки стала ниже, чем скорость ее образования. Скорость разрушения оксидной пленки связана с пористостью и твердостью материала: чем больше пор и ниже твердость, тем выше скорость разрушения. Поэтому, добавление меди привело к очевидному расширению стационарного участка трения, что обусловлено как более высокой твердостью образца, так и более плотной (беспористой) структурой.

На рис. 5 показаны результаты энергодисперсионного анализа изношенных поверхностей.

На поверхности композита Al-2%C-2%Cu наблюдается высокая концентрация и равномерное распределение кислорода, что подтверждает, предположение, что при такой нагрузке и скорости вращения скорость разрушения оксидной пленки ниже, чем скорость ее образования. На поверх-

ностях образцов Al-2%С и Al-2%С-2%Ni кислород распределен неравномерно, что говорит о более активном разрушении оксидной пленки при этих же нагрузках.

### **Выводы**

1. Добавление меди и никеля привело к формированию более плотной структуры и увеличению твердости, а добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита.

2. Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием.

3. Добавление меди привело к очевидному расширению стационарного участка трения, что в первую очередь обусловлено низкой пористостью и более высокой твердостью образца по сравнению с другими.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

[1] **Wang J., Li Z., Fan G., Pan H., Chen Z., Zhang D.** Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix, *Composites. Scripta Materialia* (66) (2012) 594–597.

[2] **Bhagya Lakshmi Dasari, Muhammad Morshed, Jamshid M. Nouri, Dermot Brabazon, Sumsun Naher.** Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B*, (145) (2018) 136–144.

[3] **Xu R., Tan Z., Xiong D., Fan G., Jie Zhang Q-G., Su Y., Li Z., Zhang D.** Balanced Strength and Ductility in CNT/Al Composites Achieved by Flake Powder Metallurgy via Shift-Speed Ball Milling, *Compos. Part A*, (96) (2017) 57–66.

[4] **Shin S.E., Ko Y.J., Bae D.H.** Mechanical and thermal properties of nanocarbon-reinforced aluminum matrix composites at elevated temperatures, *Composites Part B*, (106) (2016), 66–73.

[5] **Nam D.H., Cha S.I., Lim B.K., Park H.M., Han D.S., Hong S.H.** Synergistic Strengthening by Load Transfer Mechanism and Grain Refinement of CNT/Al–Cu Composites, *Carbon* (50) (2012) 2417–2423.

[6] **Miranda A., Varekar N., McKay B.J.** MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications, *Journal of Alloys and Compounds*, (774) (2019) 820–840.

[7] **Tokunaga T., Kaneko K., Sato L., Horita Z.** Microstructure and mechanical properties of aluminum–fullerene composite fabricated by high pressure torsion, *Scripta Materialia*, (58) (2008) 735–738.

[8] **Larionova T.V., Yunusov F.A., Bobrynina E.V., Koltsova T.S., Tolochko O.V.** Fullerene Soot-Reinforced Al-Based Composites and Their Densification Via Copper Addition, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (29) (2020) 5195–5202.

[9] **Рудской А.И., Толочко О.В., Кольцова Т.С., Насибулин А.Г.** Синтез углеродных нановолокон на поверхности частиц порошка алюминия // *Металловедение и термическая обработка*. 2013. № 10. С. 53–57.

[10] **Юнусов Ф.А., Кузьменко Е.А., Новиков Е.В., Толочко О.В., Кондратьев С.Ю.** // *Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19–24 ноября 2018г.* Институт металлургии машиностроения и транспорта. Ч. 1. СПб:Технология получения композитных материалов алюминий – углерод и изучение их структуры и свойств. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 3–5.

[11] **Chunhong Li, Risheng Qiu, Baifeng Luan, Zhiqiang Li.** Effect of Carbon Nanotubes and high temperature extrusion on the microstructure evolution of Al–Cu alloy, *Materials science and engineering*, (704) (2017) 38–44

[12] **Xin Meng, Tao Liu, Chunsheng Shi n, Enzuo Liu, Chunnian He, Naiqin Zhao.** *Materials Science & Engineering A*, (633) (2015) 103–111.



[13] **Run Xu, Zhanqiu Tan, Genlian Fan, Gang Ji, Ding-Bang Xiong, Qiang Guo, Yishi Su, Zhiqiang Li, Di Zhang.** High-strength CNT/Al-Zn-Mg-Cu composites with improved ductility achieved by flake powder metallurgy via elemental alloying, *Composites*, (111) (2018) 1-11.

[14] **Murugesan R., Gopal M., Murali G.** Effect of Cu, Ni addition on the CNTs dispersion, wear and thermal expansion behavior of Al-CNT composites by molecular mixing and mechanical alloying, *Applied Surface Science* (495) (2019).

[15] **Liu X.Q., Li C.J., You X., Xu Z.Y., Li X., Bao R., Ta J.M., Yi J.H.** Size-dependent effects of Ti powders in the pure aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes, *Journal of Alloys and Compounds*, (823) (2020) 1–9.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЮНУСОВ Фируз Абдукадимович** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: yunusov.firuz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-4467>

**ЛАРИОНОВА Татьяна Васильевна** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: larionova@hotmail.com

**ТОЛОЧКО Олег Викторович** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ol\_tol@hotmail.com

### REFERENCES

[1] **J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, D. Zhang,** Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix, *Composites. Scripta Materialia* (66) (2012) 594–597.

[2] **Bhagya Lakshmi Dasari, Muhammad Morshed, Jamshid M. Nouri, Dermot Brabazon, Sumsun Naher,** Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B*, (145) (2018) 136–144.

[3] **R. Xu, Z. Tan, D. Xiong, G. Fan, Q-G. Jie Zhang, Y. Su, Z. Li, D. Zhang,** Balanced Strength and Ductility in CNT/Al Composites Achieved by Flake Powder Metallurgy via Shift-Speed Ball Milling, *Compos. Part A*, (96) (2017) 57–66.

[4] **S.E. Shin, Y.J. Ko, D.H. Bae,** Mechanical and thermal properties of nanocarbon-reinforced aluminum matrix composites at elevated temperatures, *Composites Part B*, (106) (2016) 66–73.

[5] **D.H. Nam, S.I. Cha, B.K. Lim, H.M. Park, D.S. Han, S.H. Hong,** Synergistic Strengthening by Load Transfer Mechanism and Grain Refinement of CNT/Al–Cu Composites, *Carbon* (50) (2012) 2417–2423.

[6] **A. Miranda, N. Varekar, B.J. McKay,** MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications, *Journal of Alloys and Compounds*, (774) (2019) 820–840.

[7] **T. Tokunaga, K. Kaneko, L. Sato, Z. Horita,** Microstructure and mechanical properties of aluminum–fullerene composite fabricated by high pressure torsion, *Scripta Materialia*, (58) (2008) 735–738.

[8] **T.V. Larionova, F.A. Yunusov, E.V. Bobrynina, T.S. Koltsova, O.V. Tolochko,** Fullerene Soot-Reinforced Al-Based Composites and Their Densification Via Copper Addition, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (29) (2020) 5195–5202.

- [9] **A.I. Rudskoy, O.V. Tolochko, O.V. Koltsova, A.G. Nasibulin**, Sintez uglerodnykh nanovolokon na pov-  
erkhnosti chastits poroshka alyuminiya // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. 2013. № 10. С. 53–57.
- [10] **F.A. Yunusov, Ye.A. Kuzmenko, Ye.V. Novikov, O.V. Tolochko, S.Yu. Kondratyev**, // Nedelya nauki SP-  
bPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, 19–24 noyabrya 2018 g. Institut met-  
allurgii mashinostroyeniya i transporta. Ch. 1. SPb:Tekhnologiya polucheniya kompozitnykh materialov aly-  
uminiy – uglerod i izucheniye ikh struktury i svoystv. POLITEKKh-PRESS, 2018. S. 3–5.
- [11] **Chunhong Li, Risheng Qiu, Baifeng Luan, Zhiqiang Li**, Effect of Carbon Nanotubes and high tempera-  
ture extrusion on the microstructure evolution of Al-Cu alloy, Materials science and engineering, (704) (2017)  
38-44
- [12] **Xin Meng, Tao Liu, Chunsheng Shi n, Enzuo Liu, Chunnian He, Naiqin Zhao**, Materials Science & En-  
gineering A, (633) (2015) 103–111.
- [13] **Run Xu, Zhanqiu Tan, Genlian Fan, Gang Ji, Ding-Bang Xiong, Qiang Guo, Yishi Su, Zhiqiang Li, Di  
Zhang**, High-strength CNT/Al-Zn-Mg-Cu composites with improved ductility achieved by flake powder met-  
allurgy via elemental alloying, Composites, (111) (2018) 1–11.
- [14] **R. Murugesan, M. Gopal, G. Murali**, Effect of Cu, Ni addition on the CNTs dispersion, wear and ther-  
mal expansion behavior of Al-CNT composites by molecular mixing and mechanical alloying, Applied Surface  
Science (495) (2019).
- [15] **X.Q. Liu, C.J. Li, X. You, Z.Y. Xu, X. Li, R. Bao, J.M. Ta, J.H. Yi**, Size-dependent effects of Ti powders  
in the pure aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes, Journal of Alloys and Compounds,  
(823) (2020) 1–9.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Firuz A. YUNUSOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: yunusov.firuz@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-4467>

**Tatiana V. LARIONOVA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: larionova@hotmail.com

**Oleg V. TOLOCHKO** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: ol\_tol@hotmail.com

Поступила: 06.09.2022; Одобрена: 09.09.2022; Принята: 16.09.2022.  
Submitted: 06.09.2022; Approved: 09.09.2022; Accepted: 16.09.2022.