

*The new method of a diamond grit modification for an abrasive wheel, by the instrumentality of coating in situ method of grits, was observed in the article. The consecutive coating synthesis based on polystyrene, polyphenylene and copper organic salt was realized.*

*The gel-penetrating chromatography's, NMR-, IR-spectroscopy data were present. The dependence between the thermal durability and copper concentration in hybrid covalent-coordination polymers was observed. The hypothesis of interaction between the metal nanoparticles and polymers was discussed. An optimal organic copper salt concentration for the modifier synthesis was indentified.*

**Key words:** diamond powder, coatings, polyphenylene.

### Литература

1. Бюллер К-У. Тепло- и термостойкие полимеры. – М.: Химия, 1984. – 1056 с.
2. Термомеханические и электрические свойства гибридных органо-неорганических полимерных систем на основе изоцианатсодержащих олигомеров./ Е. В. Мамуня, М. В. Юрженко, Е. В. Лебедев, С. С. Ищенко // Полимер. журн. – 2007. – **150**. – № 2. – С. 100–105.
3. Эмануэль Н. М., Бучаченко А. Л. Химическая физика молекулярного разрушения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1986. – 382 с.
4. Механохимический синтез полимеров, содержащих биядерные кластеры ниобия / А. И. Александров, А. Н. Зеленецкий, В. Г. Красовский и др. // Доклад РАН. – 2003. – **389**. – № 5. – С. 55.

Поступила 21.05.12

УДК 621.762.2

**О. П. Черногорова<sup>1</sup>, Е. И. Дроздова<sup>1</sup>**, кандидаты технических наук; **И. Н. Овчинникова<sup>1</sup>, А. В. Солдатов<sup>2</sup>**, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), г. Москва

<sup>2</sup>Факультет технических наук и математики, Технический университет Лулео, Швеция

### ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ИЗ СМЕСЕЙ «МЕТАЛЛ-ФУЛЛЕРЕН»

*Исследованы высокоизносостойкие металломатричные композиционные материалы с низким коэффициентом трения, армированные сверхупругими твердыми углеродными частицами, полученные из смесей металл–фуллерен под давлением 5 и 8 ГПа при температуре выше порога стабильности фуллереновой молекулы.*

**Ключевые слова:** фуллерены, фазы высокого давления, композиционные материалы, износостойкость, коэффициент трения

Сверхупругие твердые материалы, характеризующиеся высоким отношением твердости к модулю упругости, перспективны для работы в условиях трения и износа [1, 2]. Считается, что уникальные свойства сверхупругих твердых материалов на основе углерода, которые используются в виде тонких покрытий типа  $CN_x$ , C:H и др., обеспечиваются фуллереноподобной структурой, состоящей из изогнутых графеновых плоскостей [3]. Объемные образцы углеродной сверхупругой твердой фазы (СТФ) можно получить из фуллеренов при высокотемпературной обработке давлением. В частности, в смеси с

порошками металла фуллерены превращаются в частицы СТФ под давлением 3–8 ГПа при температуре выше 800 °С при одновременном компактировании композиционного материала. Указанная температура представляет собой температурный порог стабильности фуллереновой молекулы, выше которого атомарный углерод под давлением организуется в фазу высокого давления с трехмерным каркасом прочных связей [4], структура которой все еще остается предметом научных дискуссий. Металломатричные композиционные материалы (КМ), армированные частицами СТФ, полученными из фуллеренов под давлением [5], характеризуются высокой износостойкостью [6] и низким коэффициентом трения [7].

В данной работе исследована износостойкость КМ на основе железа в температурном интервале, включающем порог стабильности фуллереновой молекулы, а также рассмотрено влияние давления синтеза на особенности трения и износа КМ на основе кобальта с армирующими частицами, полученными из неразделенной смеси фуллеренов  $C_{60/70}$ .

Образцы КМ изготовили из смесей порошков металла (Fe, Co) и 5–10% неразделенной смеси фуллеренов  $C_{60/70}$ . Образцы синтезировали с использованием гидравлического прессы в стандартных камерах высокого квазигидростатического давления, используемых для синтеза сверхтвердых материалов, под давлением 5 и 8 ГПа при температуре 500–1200 °С (продолжительность изотермической выдержки 0,5 мин). Твердость и степень упругого восстановления при индентировании углеродных частиц измеряли твердомером Universal Tester UMT-3MO (фирмы CETR) под нагрузкой 50 г с регистрацией кривых нагружения–разгружения. Испытания на абразивное изнашивание проводили по абразивному кругу зернистостью 400 мкм со средней скоростью 1000 мм/мин (общий путь составлял 18,54 м; нагрузка 50 Н), а также на многофункциональной испытательной установке UMT-3MO фирмы CETR по абразиву зернистостью 18 мкм по свежему следу под нагрузкой 50 Н с линейной скоростью 1800 мм/мин (общий путь составлял 9 м). Трибологические испытания образцов

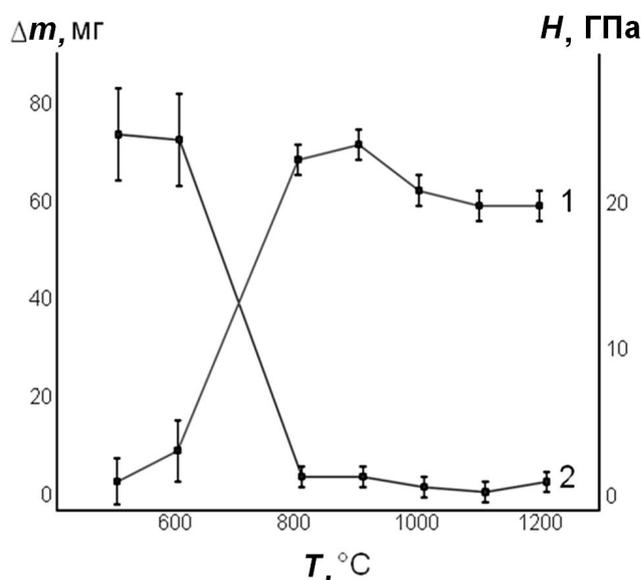


Рис. 1. Влияние температуры синтеза на твердость углеродных частиц (1) и абразивное изнашивание (потерю веса при испытании по абразивному кругу зернистостью 400 мкм) (2) КМ, изготовленного из смеси Fe – 5%  $C_{60/70}$

также проводили на установке UMT-3MO по схеме палец–диск по диску из высокоуглеродистой стали твердостью 62 HRC под нагрузкой 5–50 кг в условиях сухого трения на воздухе.

В результате испытаний пришли к выводу, что термобарическая обработка порошковой смеси металл–фуллерен приводит к ее консолидации в металломатричный композиционный материал (КМ), армированный углеродными частицами. При повышении температуры обработки выше порога стабильности фуллереновой молекулы (~600–800 °С) происходит ее коллапс с образованием сверхупругой твердой фазы высокого давления. Приобретенные при этом свойства углеродных частиц обеспечивают значительное повышение абразивной

износостойкости КМ, что показано на рис. 1 на примере серии образцов, полученных из смеси Fe + 5 масс. %  $C_{60/70}$  под давлением 5 ГПа при температуре 500–1200 °С.

При повышении давления синтеза КМ с 5 до 8 ГПа твердость армирующих частиц повышается с 18 до 35 ГПа при сохранении высокой степени упругого восстановления при индентировании (соответственно 96 и 90%).

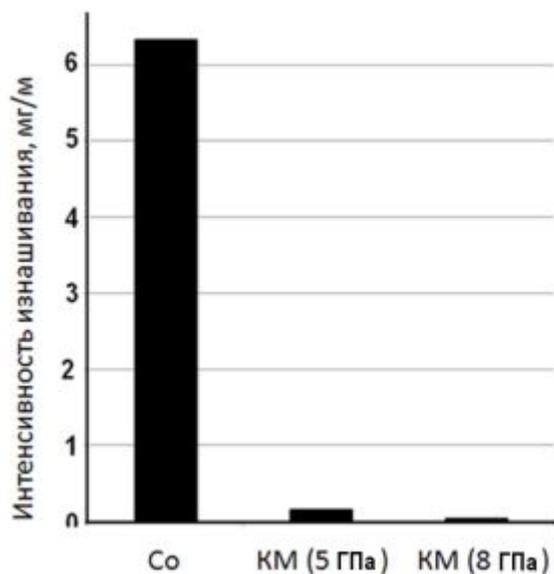


Рис. 2. Интенсивность изнашивания Co и КМ изготовленных из Co + 10% C<sub>60/70</sub> под давлением 5 и 8 ГПа (1000 °С)

Благодаря повышению твердости частиц возрастает сопротивляемость изнашиванию армированного ими КМ. Диаграмма, показанная на рис. 2, свидетельствует о том, что по сравнению с матричным кобальтом интенсивность изнашивания КМ, полученных из смеси Co + 10% C<sub>60/70</sub> при давлении 5 и 8 ГПа (1000 °С) снижается соответственно в 40 и 140 раз.

Известно, что трудно одновременно улучшить абразивную износостойкость и снизить коэффициент трения металлических материалов. Результаты исследования КМ показывают, что при армировании сверхупругими твердыми углеродными частицами повышение абразивной износостойкости КМ сопровождается снижением коэффициента трения. Трибологические испытания КМ

продолжительностью 6 ч показали, что частицы СТФ не изнашиваются, площадь контакта остается небольшой и фактическое давление на частицы оказывается очень высоким (до

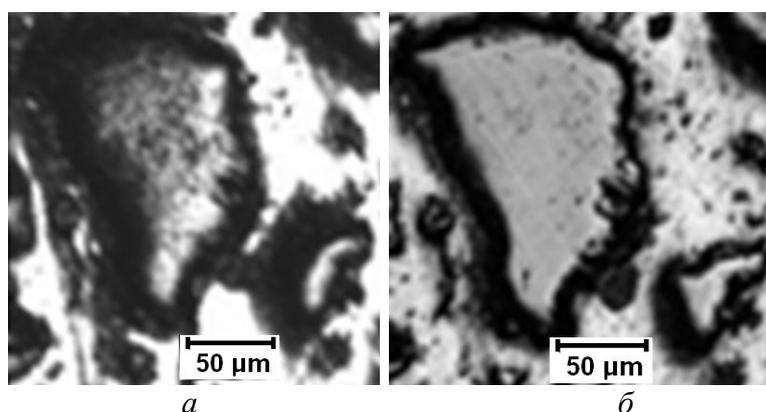


Рис. 3. Армирующие частицы в КМ на основе Co (5 ГПа) до (а) и после (б) трибологических испытаний

4000 МПа), при этом частицы не разрушаются (рис. 3).

По сравнению с чистым кобальтом, у которого при использованных условиях трибологических испытаний коэффициент трения составляет  $f_{тр} = 0,42$ , КМ, полученные из смеси Co + 10% C<sub>60/70</sub> под давлением 5 и 8 ГПа, в идентичных условиях соответственно имеют  $f_{тр} = 0,17$  и  $0,21$ . Таким образом, с повышением

твердости армирующих частиц сверхупругого твердого углерода повышается износостойкость КМ. Однако при этом также повышается коэффициент трения, что может быть связано со снижением степени упругого восстановления этих частиц. Коэффициент трения КМ на основе железа, полученного под давлением 5 ГПа (~1000 °С) из смеси Fe + 10% C<sub>60/70</sub>, в течение 2 ч испытаний остается стабильно низким – примерно в 5 раз ниже, чем этот показатель у эталонного образца из высокоуглеродистой стали (рис. 4).

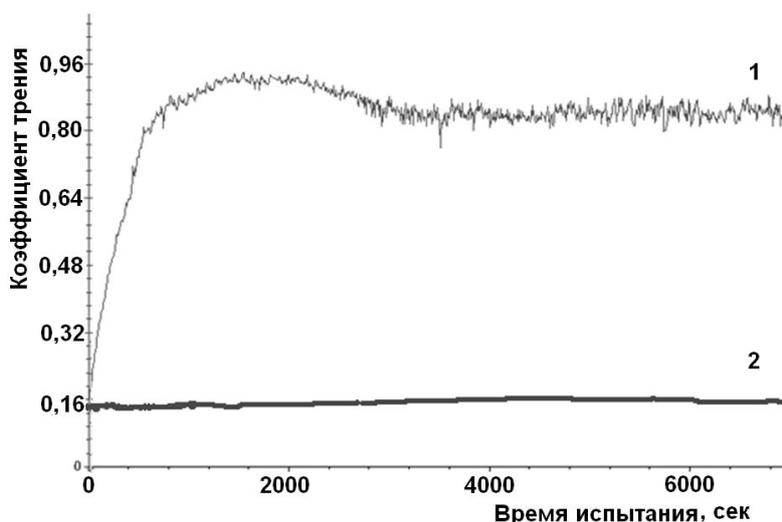


Рис. 4. Коэффициент трения (1) стали У8 и (2) КМ, полученного из смеси Fe + 10% C<sub>60/70</sub> под давлением 5 ГПа.

### Выводы

Проведен высокотемпературный синтез под давлением 5 и 8 ГПа КМ на основе железа и кобальта, армированных сверхупругими твердыми углеродными частицами, полученными из неразделенной смеси фуллеренов C<sub>60/70</sub>. Армирование кобальтовой матрицы частицами, полученными под давлением 5 и 8 ГПа, приводит к повышению абразивной износостойкости соответственно в 40 и 140 раз. Усиление эффекта армирования с повышением давления обусловлено повышением твердости армирующих частиц (с 18 до 35 ГПа). Коэффициент трения КМ ниже соответственно в 2,5 и 2 раза, чем кобальтовой матрицы.

*Досліджено металоматрічні композиційні матеріали з високою зносостійкістю та низьким коефіцієнтом тертя, армовані надпружними твердими вуглецевими частинками, отриманими з сумішшю метал-фулерен під тиском 5 і 8 ГПа при температурі вище порога стабільності фулеренової молекули.*

**Ключові слова:** фулерени, фази високого тиску, композиційні матеріали, зносостійкість, коефіцієнт тертя

*Super wear-resistant low-friction metal-matrix composite materials reinforced by superelastic hard carbon particles are obtained from metal-fullerene mixtures at a pressure of 5 and 8 GPa at temperatures above the threshold of fullerene molecule stability.*

**Key words:** fullerenes, high-pressure phase, composite materials, wear resistance, friction coefficient

### Литература

1. Leyland A., Matthews A. Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings // Surface and Coatings Technology. – 2004. – **177–178**. – P. 317–324.
2. Growth mechanisms and structure of fullerene-like carbon-based thin films: superelastic materials for tribological applications / R. Gago, G. Abrasonis, I. Jimenez, W. Moller // Fullerene Research Advances. – N. Y.: Nova Sci. Publishers, Inc., 2008. – Chapter 7. – P. 145–181.
3. Broitman E., Neidhardt J., Hultman L. Fullerene-like Carbon Nitride: A New Carbon-based Tribological Coating // Tribology of Diamond-Like Carbon Films Fundamentals and Applications. – Springer US, 2008. – P. 620–653.

4. Transmission electron microscopy, electron diffraction and hardness studies of high-pressure and high-temperature treated C<sub>60</sub> / R. A. Wood, M. H. Lewis, G. West, et all // J. Phys.: Condens. Matter. – 2000. – N 12. – P. 10411–10421.
5. Структура и свойства сверхупругих и твердых углеродных частиц, армирующих износостойкие композиционные материалы, полученные из смеси порошков железа и фуллеренов под давлением / О. П. Черногорова, Е. И. Дроздова, В. М. Блинов, Н. А. Бульенков // Российские нанотехнологии. – 2008. – 3. – № 5–6. – С. 150–157.
6. Износостойкость металлических композиционных материалов, содержащих в объеме частицы алмазоподобного углерода / О. П. Черногорова, Е. И. Дроздова, О. А. Банных и др. // Металлы. – 2003. – № 3. – С. 97–104.
7. Трибологические свойства металлических композиционных материалов, армированных частицами сверхупругого твердого углерода / О. П. Черногорова, Е. И. Дроздова, И. Н. Овчинникова, Е. Е. Ашкинази // Изв. вузов. Сер. «Химия и химическая технология». – 2010. – 53. – № 10. – С. 118–121.

Поступила 22.06.12

УДК 539.89

**С. А. Ивахненко**, член-корр. НАН Украины, **С. А. Виноградов**, канд. техн. наук,  
**Я. А. Подоба**, **В. И. Винник**

### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ТАРИРОВКИ АППАРАТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Приведена система для тарировки аппарата высокого давления (АВД) на основе автономного мобильного устройства с использованием современных компьютерных технологий и программных средств обработки данных эксперимента. Такая система мониторинга в режиме реального времени позволяет получить информацию о зависимости снижения напряжения на датчике от усилия, действующего на АВД.*

**Ключевые слова:** аппарат высокого давления, тарировка, система мониторинга.

#### **Введение**

Знание технологических характеристик АВД является актуальной и необходимой частью его эксплуатации. Одним из параметров, который необходимо знать, является зависимость давления в реакционном объеме АВД от действующего на него усилия. Давление в реакционном объеме АВД определяют экспериментально. Процедуру определения зависимости давления в реакционном объеме от усилия, действующего на АВД, называют градуировкой, или тарировкой. В настоящее время для этой цели широко используют методику реперных точек. Суть этой методики заключается том, что в характерное место реакционного объема помещают датчик давления с чувствительным элементом, структура которого претерпевает фазовые превращения при высоком давлении – так называемый реперный материал. Давление фазовых переходов (реперных точек) постоянное и характерно для этого материала. Фазовый переход сопровождается резким изменением электрического сопротивления реперного материала. Процедура тарировки состоит в определении усилия пресса, при котором происходит фазовый переход в реперном материале. Для построения тарировочной зависимости в необходимом для исследования диапазоне значений давления обычно используют несколько реперных материалов, фазовые переходы в которых происходят при различном давлении в интересующем исследователей диапазоне. При давлении до 100 ГПа обычно применяют следующие материалы: висмут