

3. Gurson, A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media / A. L. Gurson // *ASME J. Mech. Sci.*, 1977. – Vol. 99. – P. 2 – 15.
4. Tvergaard, V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions / V. Tvergaard // *Int. J. Fracture*, 1991. – Vol. 17. – P. 389 – 407.
5. Исследование особенностей структуры и физико-механических свойств двухслойных инфильтрованных материалов на основе железа / Л. Н. Дьячкова, И. И. Красняков // *Порошковая металлургия*, 1996. – Вып. 19. – С. 47 – 49.
6. Дьячкова, Л. Н. Исследование структуры и свойств двухслойных инфильтрованных материалов / Л. Н. Дьячкова // *Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии*. – Киев, 1997. – С. 13 – 15.
7. Дьячкова, Л. Н. Слоистые инфильтрованные материалы на железной основе, метод получения, структура, свойства / Л. Н. Дьячкова // *Слоистые композиционные материалы*. – Волгоград: Политехник, 1998. – С. 147 – 148.
8. Способ изготовления антифрикционного композиционного материала : пат. 4540 РБ МПК7 В22F 1/00 / Л. Н. Дьячкова, Е. В. Звонарев, Ю. В. Сериков, Е. П. Борисов, 1998.
9. Композиционный ферроабразивный порошок и способ его изготовления / Л. В. Судник [и др.] // *Машино-технологическая станция*, 2008. – № 1. – С. 30 – 34.
10. Оценка эффективности применения нанокристаллических оксидов и гидроксидов алюминия / Ю. А. Мазалов, А. В. Федотов, Е. О. Щеглов // *Машино-технологическая станция*, 2008. – № 2. – С. 39 – 43.
11. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков для газотермического напыления / А. Ф. Ильющенко [и др.] // *Сб. матер. докладов междунар. научно-технической конференции «Порошковая металлургия : достижения и проблемы»*, 22 – 23 сентября 2005 г. – Минск, Беларусь. – С. 134 – 137.

УДК 621.793.7:621.762

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ КЕРМЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НИКЕЛЬ-МОЛИБДЕНОВОЙ МАТРИЦЫ

**В. И. Калита, Д. И. Комлев, А. Г. Ткачев, В. В. Яркин**

*Институт металлургии и металловедения им. А. А. Байкова РАН*

**Введение.** Последние годы характеризуются повышенным вниманием к керметным материалам с наноразмерными упрочняющими фазами. Керметные материалы отличаются высокой твердостью и достаточными пластическими свойствами, необходимыми для получения из них компактов и покрытий.

**Материалы и методика исследования.** При синтезе порошков для напыления использовали углеродный материал в виде нанотрубок с объемной долей 30 % и 68 % и Ni-Mo матрицу (рис. 1, а). Углеродный материал, образец № 1, имел удельную поверхность 130,6 м<sup>2</sup>/г. Размер частиц порошков никеля и молибдена – 20 – 40 мкм. Для изготовления порошка для напыления приготовили смесь следующего состава: 30 об. % углеродного материала-52,5 об. % Ni-17,5 об. % Mo, образец № 2. Исходные порошки перемешивали в эксцентриковом шаровом смесителе в течение 8 часов, а затем подвергали механическому легированию (МЛ) в планетарной мельнице № 5 фирмы Фритч в течение 32 часов при 170 об/мин. Порошок после МЛ спекали в атмосфере аргона при температуре 1100 °С в течение 3 часов и затем дробили в порошок в планетарной мельнице на частицы размером 45 - 71 мкм для плазменного напыления. Микротвердость покрытий определяли на шлифах поперечных сечений при нагрузке 0,2 Н.

Плазменное напыление вели с местной защитой от атмосферы воздуха на универсальной плазменной установке УПУ-3д. Был проведен рентгеновский фазовый анализ порошка для напыления, покрытий из него и дополнительно порошка для напыления после его глубокого травления в растворе HCl-HNO<sub>3</sub> при соотношении 3:1, предполагая, что после такой обработки в твердом остатке останется фаза, более стойкая к травлению.

**Результаты экспериментов и обсуждение.** Рентгеноструктурным анализом идентифицировали углеродный материал: 69,93 об. % С (карточка 26-1076)-21,68 об. % С (Сажа, карточка № 0-348)-8,39 об. % С (Chadite, карточка № 22-1069) (табл. 1). Покрытия напыляли при мощности дуги плазмотрона 21,8 кВт: ток 375А, напряжение 58 В. Коэффициент использования порошка (КИП) при напылении покрытия равен 58 %. Оптической микроскопией вторые фазы наблюдали в порошке № 2, *т* после механического легирования и термообработки 1100 °С 3 ч (рис. 1, б). Покрытие № 2, *с* имеет в своей микроструктуре вторую фазу темного цвета (рис. 1, в). Вторая фаза распределена по покрытию неравномерно, плотность этой фазы изменяется в структуре покрытия плавно («перламутр»). Размер частиц второй фазы при анализе растровой микроскопией 100 - 250 нм (рис. 1, з). Макроструктура этого покрытия имеет малое количество пор и традиционно состоит из напыленных частиц в виде дисков (рис. 1, в).

Исходный фазовый состав смеси порошков 30 об.% углеродный материал-52,5 % Ni-17,5 % Mo трансформируются при механическом легировании, последующей термообработке и плазменном напылении в керметный материал (табл.). Новые фазы активно формируются в кермете уже на стадии МЛ, в результате взаимодействия исходных металлических фаз с углеродным материалом 27,5 % Ni<sub>3</sub>C-9,8 % Mo<sub>2</sub>C, № 2, *р*. На стадии МЛ

остается около 50 % металлических фаз. После термообработки МЛ материала в нем фиксируется максимальное содержание карбидных фаз и небольшое свободного углерода: 1,6 об. % C-4,9 об.% NiC-23,6 об.% Mo<sub>2</sub>C, №2, *г*. При плазменном напылении происходит изменение фазового состава напыляемого порошка и в покрытии фиксируется следующий фазовый состав: 1,4 об. % C-32,1 об. % Ni<sub>3</sub>C-47,2 об. % NiC-11,8 об. % Mo<sub>2</sub>C-7,5 об. % MoC, № 2, *с*. Содержание в покрытии 10,2 об.% C может быть и большим, чем зафиксировано, с учетом большой разницы коэффициентов отражения при рентгеновских исследованиях: углерода, карбидов и металлов. После травления порошка для напыления, образцы № 2, *г-з* в нем фиксируется 97,3 – 92,2 об. % углеродных фаз, причем (84,8 – 88,5) об. % это углеродная фаза, карточка № 26-1076 по международной классификации, которая была в исходном углеродном материале. Более того, содержание этой углеродной фазы в вытравленном порошке выше, чем в исходных исходном углеродном материале, 69,9 об.%.

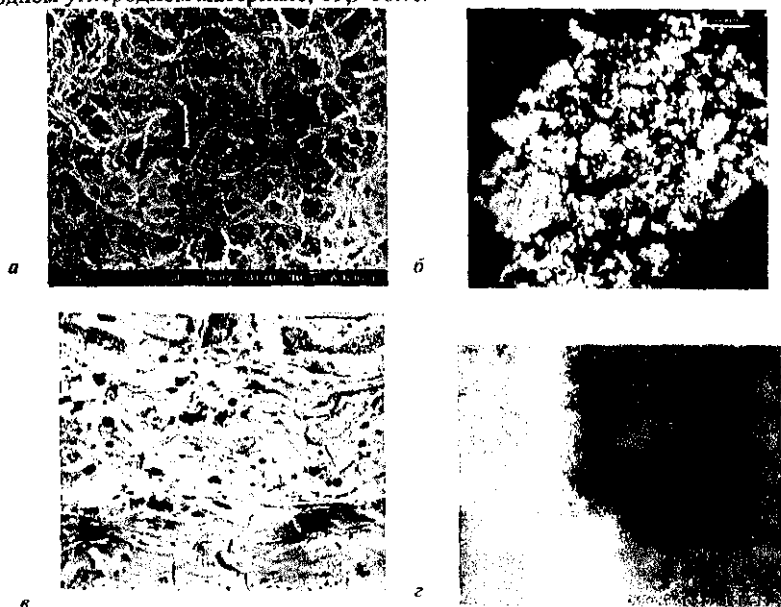


Рис. 1. Микро- и субструктура: исходных нанотрубок(*а*), порошка № 2 (*б*), покрытия № 2, (*в* и *г*) исходного состава 30 об.% углеродного материала - 52,5 % Ni-17,5 % Mo: (*а*) растровая микроскопия, увеличение 40000; (*б*, *в*) оптическая микроскопия, увеличение 1000; (*г*) растровая микроскопия – увеличение 37000. Порошок после механического легирования и термообработки 1100°C, 3 ч в атмосфере аргона № 2, *р* - (*б*).

### Фазовый состав исследуемых порошков и плазменного покрытия

Дополнительно приведен фазовый состав исходного углеродного материала, № 1,  $n$ , и порошка для напыления (после термообработки при 1100°C) после травления, № 2,  $t-z$

Образцы	C 26-1076 %	C Сажа 0-348 %	C Chadite 22-1069 %	C 26-1082 %	Ni %	Ni <sub>3</sub> C 6-697 %	NiC 0-594 %	Mo %	Mo <sub>2</sub> C 31-871 %	MoC 8-384 %
2, $m^1$	21	6,5	2,5	-	52,5	-	-	17,5	-	-
2, $p^2$	-	-	-	8,4	28,1	27,5	-	26,1	9,8	-
2, $r^3$	0,8	-	0,8	-	-	-	74,9	-	23,6	-
2, $c^4$	1,4	-	-	-	-	32,1	47,2	-	11,8	7,6
2, $t-z^5$	84,8	5,9	5,9	1,7	-	0,9	-	-	0,9	-
1, $n^6$	69,93	21,68	8,39	-	-	-	-	-	-	-

Примечание.  $m^1$  – механическая смесь,  $p^2$  – обработка в планетарной мельнице,  $r^3$  – термическая обработка порошка после планетарной мельницы,  $c^4$  – плазменное покрытие,  $t-z^5$  – порошок после травления в царской водке (порошок после термической обработки и обработки в планетарной мельнице),  $n^6$  – исходный углеродный материал.

Покрытие, сформированное из материала, содержащего в исходном составе 30 об.% углеродного материала, имеет высокую микротвердость,  $9,83 \pm 1,71$  ГПа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 09-03-00287-а, № 08-08-12070-офи и гранта поддержки ведущих школ НШ-2991.208.3.*

**Выводы.** В результате взаимодействия фаз в исходной смеси 30 об.% углеродного материала-52,5 об.% Ni-17,5 об.% Mo при механическом легировании, термической обработке и плазменной обработке получены покрытия с микротвердостью  $9,83 \pm 1,71$  ГПа с равномерно распределенными упрочняющими фазами.

УДК 629.114.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КУРСОВОГО ДВИЖЕНИЯ ТРЕХОСНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ НА УПРУГИХ ПНЕВМАТИКАХ

И. С. Сазонов, Э. И. Ясюкович, В.А. Ким  
Белорусско-Российский университет, Могилев

**Введение.** Безопасность движения многоосных колесных машин зависит от совокупности многих взаимосвязанных факторов и свойств. Такими свойствами являются курсовая устойчивость и управляемость, которые в значительной степени определяются массогеометрическими пара-