

своим практическим воплощением ранжировку мер по величинам коэффициентов a_i и разработку данного измерения. Таким шагом является изменение только технологии ЭЛС (многопроходность, дискретность) при сохранении прочих условий процесса.

В работе исследован подход к разработке общей концепции устранения коробления пластины ЭЛС, вызванного механическими явлениями, причиной которых, в свою очередь является термический режим ЭЛС. Показано, что практически все (или в большинстве из них) коробление можно устранить путем сохранения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры в заданных пределах, определяемых на основе условий, типа «Сила Эйлера» или его аналога для вертикального градиента. В общем случае, для этого необходима разработка автоматизированной системы управлением ЭЛС. В которой, посредством решения уравнений термоупругости, представленных в дифференциальном (уравнения типа Кармана) или в интегральном виде, программным (в ряде случаев и аппаратным – путем прошивки ПЗУ) способом (ЛИУС-ЧПУ) для различных типов изделий, производится выбор оптимального режима в виде динамики амплитуды термонагрева по траектории луча – задача оптимального управления распределенными системами.

Библиографические ссылки

1. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии ЭЛС алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин, В. Д. Лаптенко, Н. В. Успенский, В. П. Ниткин // Технологии и оборудование ЭЛС : материалы конф. 2011. С. 71–80.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев : Наукова думка, 1976. 320 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1972. 740 с.
4. Савельев И. В. Курс физики. М. : Наука, 1973. 420 с.
5. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. М. : Наука, 1965. 480 с.
6. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения : пер. с англ. М. : Мир, 1980. 612 с.
7. Писаренко Г. С. Соппротивление материалов. Киев : Высш. школа, 1979. 696 с.
8. Половинкин А. П. Теория изобретательства. М. : Высш. школа, 1975. 340 с.

References

1. Seregin Y. N, Laptenok V. D. Uspenskiy N. V, Nitkin V. P. *Materialy konferencii "Texnologii i oborudovanie dlya E'LS"* (Materials Conf. "Technology and Equipment ELS"). 2011, p. 71–80.
2. Maxnenko V. I. *Raschetnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh napryazhenij i deformacij* (Calculation methods of studying the kinetics of welding stresses and strains). Kiev, Naukova dumka, 1976, 320 p.
3. Tixonov A. N. Samarskiy A. A. *Uraveniya matematicheskoy fiziki* (The equations of mathematical physics). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
4. Savel'ev I. V. *Kurs fiziki* (Physics course). Moscow, Nauka, 1973, 420 p.
5. Timoshenko S. P. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
6. Poston T., Stuart I. *Teoriya katastrof i eyo prilozheniya* (Catastrophe theory and its applications). Moscow, Mir, 1980, 612 p.
7. Pisarenko G. S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Kiev, Vysshaya shkola, 1979, 696 p.
8. Polovinkin A. P. *Teoriya izobretatel'sva* (The theory of invention). Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 340 p.

© Гайденок Н. Д., Серегин Н. Ю., Савенков Д. П., Майтакова А. В., 2013

УДК 621.762

Ю. И. Гордеев¹, А. К. Абкарян¹, Г. М. Зеер¹, А. А. Лепешев²

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛЕГИРУЮЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ*

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: aaa@mail.sibsau.ru

Получены новые данные о влиянии добавок керамических наночастиц на свойства твердых сплавов WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo с использованием расчетных и экспериментальных методов. Конечные физико-механические и эксплуатационные свойства твердосплавных композитов модифицированных наночастицами находятся в прямой зависимости от параметров их микроструктуры, соотношения объемных долей и размеров карбидных и сверхтвердых частиц.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0039 от 20.03.2013 г.

Наночастицы введенные в связку снижают толщину металлической прослойки и, как результат, обеспечивают увеличение прочности связки и композита в целом. Обнаружено стабильное снижение среднего размера карбидного зерна (благодаря блокирующему влиянию добавок на процессы рекристаллизации). Результаты испытаний показывают что модифицирование наночастицами обеспечивает повышение следующих основных свойств: эксплуатационная стойкость в 1,3–4 раза; износостойкость 1,6–2 раза; трещиностойкость 1,8–2 раза; прочность на изгиб на 25–50 %.

Ключевые слова: твердосплавные композиты, наночастицы, микроструктурные параметры, размер зерна, прочность, эксплуатационная стойкость.

EFFECT OF ALLOYING ADDITIVES OF THE CERAMIC NANOPARTICLES ON THE STRUCTURAL PARAMETERS AND PROPERTIES OF HARD ALLOYS

Yu. I. Gordeev¹, A. K. Abkaryan¹, G. M. Zeer¹, A. A. Lepeshev²

¹Siberian Federal University

79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: aaa@sibsau.ru

New data about influence of ceramic nanoparticles additives on the hard metals WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo properties are obtained with the use of calculating and experimental methods. The final physical and mechanical properties of hard metals modified with nanoparticles depend on their microstructural parameters, proportion of volume ratios and size of carbide and ultrafine particles. Nanoparticles introduced into a binder decrease the thickness of the metal interlayer and therefore increase the strength of binder and composite as a whole. The reduction of the carbide grain average size was found out as well (owing to nanoparticles blocking influence on recrystallization). The test results display that the modification with nanoparticles enables to increase the main properties: service durability 1,3–4 times; wear resistance 1,6–2 times; fracture toughness 1,8–2 times; transverse rupture toughness at 25–50 %.

Keywords: hard metal composites, nano-particles, microstructural parameters, grain size, fracture toughness, service durability.

Проводимые в последнее время работы по созданию нового поколения твердых сплавов ориентированы, в значительной степени, на формирование заданной структуры материалов с субмикронными карбидными зёрнами (величина зёрна от 0.3 до 0.8 мкм) либо уменьшением размеров карбидной фазы до наноразмерного состояния [1–4]. Это обеспечивает повышение всего комплекса физико-механических и эксплуатационных характеристик твёрдого сплава. Однако, сохранение карбидной фазы в наноразмерном состоянии, предотвращение рекристаллизации является достаточно сложной технологической задачей.

По нашему мнению, представляется целесообразным использовать размерные эффекты от применения наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок в твердосплавных композитах. Внедрение наночастиц в металлическую связку может способствовать снижению средней толщины прослойки между карбидными зёрнами, реализации известных в материаловедении эффектов дисперсного упрочнения на фрагментарном уровне. Одновременно, включения твёрдых наночастиц выступают в роли ингибиторов роста зёрна карбидной фазы [5; 6], препятствуют образованию смежных границ карбидных зёрен при гомогенизации. Такие структурные изменения являются положительным фактором (анализ накопленной информации о взаимосвязи структурных параметров твёрдого сплава с его физико-механическими характеристиками показывает, что наиболее важными яв-

ляются – размер зёрен карбидной фазы, их контактность, толщина прослойки связующего) [1; 4; 5]. Повышение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик может быть обеспечено при небольшом количестве добавок наночастиц к матричному материалу, без усложнения традиционной технологии и увеличения стоимости твердосплавных композитов.

Цель работы – изучение закономерностей формирования структуры и определение функциональных связей между параметрами структуры и конечными свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами керамики.

Методика и аппаратура исследований. Для получения твердосплавных композитов в работе использовались общепринятая стандартная технология изготовления. Отличия заключаются в особенностях подготовки порошковых смесей карбидов вольфрама, титана и кобальта, а также карбонитридов титана на никель-молибденовой связке (в том числе получения плакированных порошков карбида вольфрама с ингибирующими добавками наночастиц керамики).

Приготовленные смеси использовались для изготовления штабиков для проведения испытаний на изгиб (ISO/CD 3327), четырехгранных и пятигранных резовых пластин, твердосплавных оправок и волок для определения коэффициента стойкости, таблеток Ø10×10 мм. На образцах разработанных материалов измерялись следующие физико-механические харак-

теристики: в процессе спекания измерялась усадка на dilatометре DIL 402; на спеченных образцах – плотность гидростатическим методом по ISO 3369; твердость по Виккерсу и коэффициент трещиностойкости (K_{IC}) по методу Палмквиста на микротвердомере ТП-7Р-1 путем измерения длины трещины, распространяющейся от угла отпечатка пирамидки Виккерса (нагружение при испытании 100, 200, и 300 Н) по ISO/DIS 28079; твердость по Роквеллу HRA- на приборе ТК с твердосплавными мерами на двух – трех образцах от партии по ISO 3878; износостойкость, согласно стандарту ASTM B611-85; пористость и содержание графита по ISO 4505; коэрцитивная сила на приборе «Кобальт» в соответствии с ISO 3326. Анализ микроструктуры образцов твердосплавных композиций проводился на растровом электронном микроскопе HITACHI TM 1000 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с энергодисперсионным и волновым спектрометрами. Эксплуатационные и стойкостные испытания твердосплавных инструментов проводились по отраслевым методикам различных предприятий и научно-исследовательских организаций.

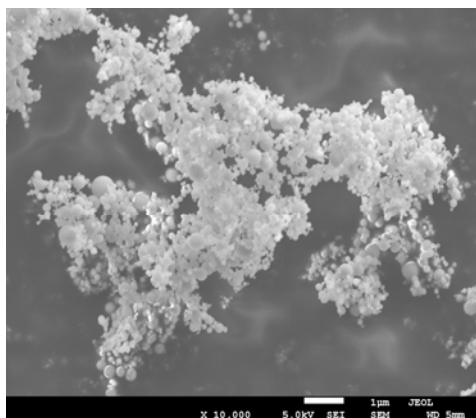
Результаты и обсуждение. В качестве модифицирующих добавок использовались нанопорошки окислов, полученные методом ударно-волнового синтеза [7]. Морфология порошков приведена на рис. 1, средний размер частиц изменяется от 0,008 мкм для ZrO_2 (минимум) до 0,1 мкм у Al_2O_3 (максимум).

Преимуществом предлагаемого способа получения модифицированных наночастицами твердосплавных композитов является сохранение базовой (стандартной) технологии без принципиальных изменений, требующих существенных затрат на оборудование и оснастку. Введение дополнительных операций и технологических приемов предварительной подготовки модифицирующих (легирующих) нанопорошков, а также особенности смесеприготовления, обеспечивает равномерное, однородное распределение наночастиц по объему твердосплавного композита, исключает агломерирование при внедрении наночастиц в прослойку (связующего) кобальта при спекании.

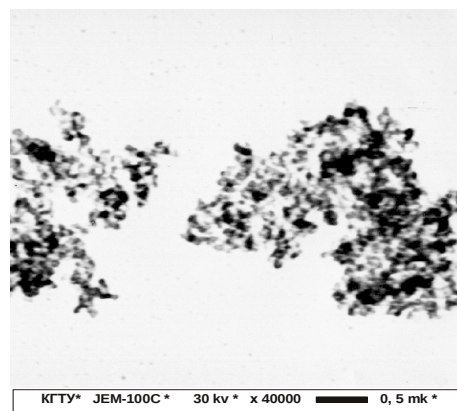
При проведении экспериментов, концентрация наночастиц в составе модифицированных твердых сплавов варьировалась в диапазоне от 0 до 0,5 % масс. Результаты экспериментов по определению физико-механических свойств, проведенных в условиях Кировградского завода твердых сплавов, представленные в табл. 1, 2 (твердые сплавы на основе карбида вольфрама) и табл. 3 (безвольфрамовые твердые сплавы) показывают, что введение в состав твердых сплавов керамических наночастиц способствует приросту прочностных характеристик в 1,5–1,8 раза. Изучение параметров микроструктуры сплава (табл. 2) показало стабильное снижение размера карбидных зерен у модифицированных сплавов, что можно объяснить торможением процессов перекристаллизации через кобальтовую фазу вследствие присутствия в ней ингибирующих добавок наночастиц керамики.

Наночастицы керамики Al_2O_3 или ZrO_2 в количестве 0,05–0,3 % по массе, не только дисперсно упрочняют кобальтовую прослойку и композит в целом (повышают трещиностойкость до 50 %, прочность на изгиб до 25 %), но и ее стойкость к температурным воздействиям, снижают адгезионное схватывание с обрабатываемым материалом.

Испытания образцов композитов WC-Co-наночастицы Al_2O_3 в условиях граничного трения по абразивной ленте также показали возможность улучшения такого эксплуатационного параметра твердых сплавов, как износостойкость (в 1,5 раза), за счет модифицирования прослойки кобальта более твердыми включениями керамики. Минимальные значения износа наблюдаются примерно в тех же областях добавок (~ 0,25 % масс.), которые обеспечивают прирост прочности. Дополнительный вклад в повышение износостойкости материала вносит, по-видимому, повышенная сопротивляемость истиранию, самого оксида алюминия, – его микротвердость: $H_n Al_2O_3$ – 18–20 ГПа. Результаты проведенных стойкостных испытаний свидетельствуют также о возможности повышения скорости резания инструментами из модифицированных твердых сплавов по сравнению со стандартными составами [4].



а



б

Рис. 1. Морфология исходных нанопорошков оксида алюминия (а) и оксида циркония (б)

Таблица 1

Свойства твердых сплавов на основе карбида вольфрама, модифицированных добавками Al_2O_3 – нано

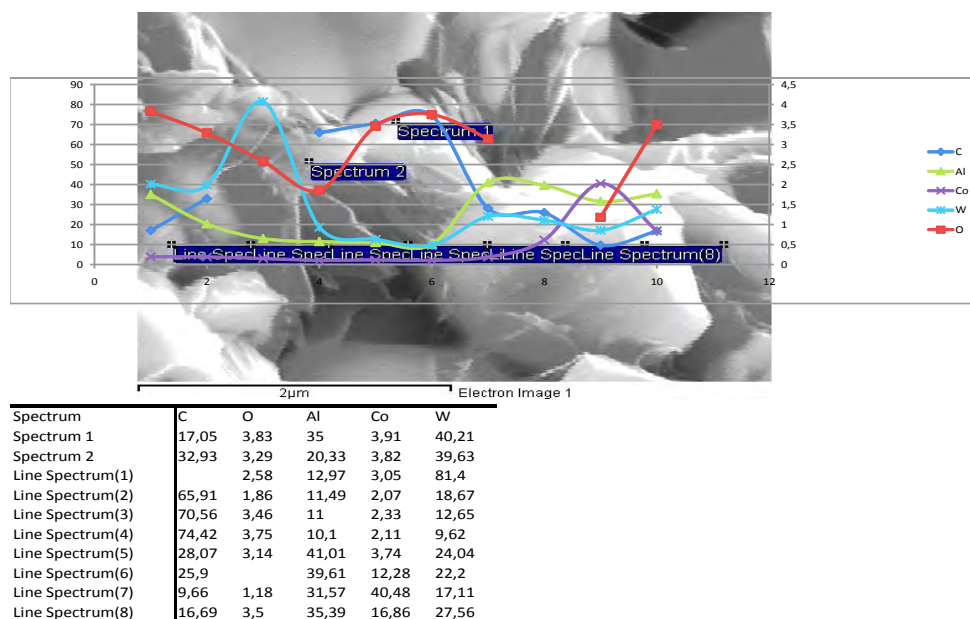
Марка сплава	Физико-механические характеристики			
	плотность, ρ , г/см ³	твердость, HRA	прочность на изгиб, МПа	Коэрцитивная сила, H_c , эрстед
ВК6	14,66	89,8	1650	127
ВК6*	14,68	89,5	1710	128
ВК6	14,71	89,5	1430	122
ВК6*	14,53	89,5	1850	123
ВК8	14,28	89,5	1440	138
ВК8*	14,61	89,3	1940	111
ВК8	14,25	89,5	1280	132
ВК8*	14,47	89,2	1740	106
ВК15	14,1	86,5	2100	
ВК15*	14,0	86,5	2240	
ВК10 КС	14,49	87,3	2100	98
ВК10КС*	14,21	87,4	2450	79
Т15К6	11,12	91,5	1060	160
Т15К6*	11,11	91,5	1330	162
Т15К6**	11,09	91,5	1770	163

Примечание: * – сплав с добавками Al_2O_3 – нано.

Таблица 2

Параметры микроструктуры твердых сплавов на основе карбида вольфрама

Марка сплава	Параметры микроструктуры								d_{cp} , мкм	Фаза, Co , мкм
	пористость, %	содержание графита, % об.	размер зерна, мкм							
			1	2	3	4-5	6-7			
			фаза d_L , %							
ВК6	A 0,02	0,3	6	30	19	3	2	2,25	0,8–1	
ВК6*	A 0,08	0,2	33	41	15	11	—	2,10	—	
ВК8	A 0,08	0,6	30	29	21	17	3	2,47	—	
ВК8*	B 0,04	0,2	31	40	19	5	4	2,21	—	
ВК15	B 0,08	0,1	30	34	21	14	1	2,51	—	
ВК15*	A 0,02	0,2	35	41	17	7	—	2,33	—	
ВК10КС	A 0,02	0,4	8	12	27	30	21	4,03	—	
ВК10КС*	B 0,04	0,4	7	15	28	25	20	3,87	—	

Примечание: * – сплав с добавками Al_2O_3 – нано.Рис. 2. Распределение элементов по структуре твердосплавного композита WC-TiC-Co – Al_2O_3 -нано

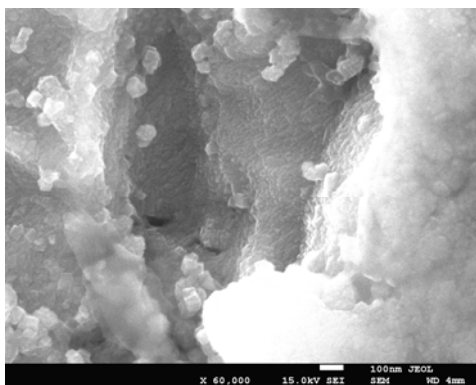


Рис. 3. Микроструктура фрагмента излома твердосплавного композита на основе WC-TiC-Co – (Al₂O₃-нано) (между карбидными зернами видны включения наночастиц)

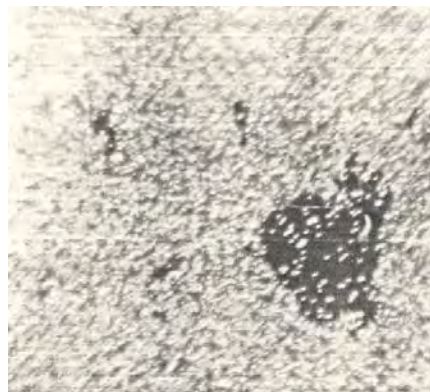


Рис. 4. Твердый сплав ВК – нанопорошки Al₂O₃. Распределение Al₂O₃ в объеме кобальтовой связи

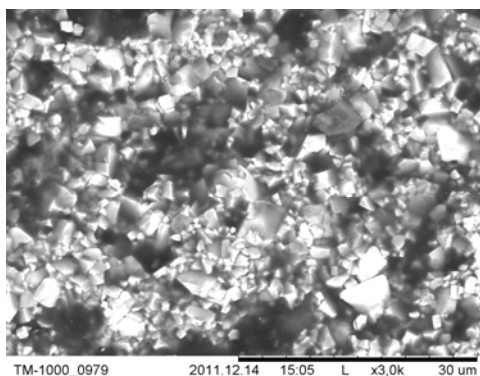


Рис. 5. Фрактограмма излома твердого сплава WC-Co- (Al₂O₃ – нано)

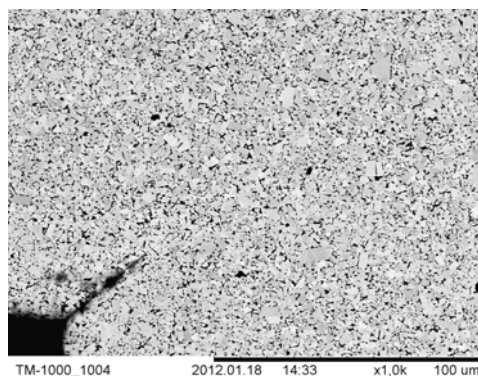


Рис. 6. Релаксация напряжений в фронте распространения трещины Палмквиста (от угла отпечатка пирамидки Виккерса)

Показатели твердости и плотности материала существенно не отличаются от базового материала и находятся на уровне: HRC 91,5-92; $\rho = 14,7\text{--}14,75 \text{ г/см}^3$; несколько увеличиваются значения микротвердости прослойки связующего материала – кобальта поскольку реализуется известный эффект дисперсного упрочнения на уровне фрагментов структуры Co-Al₂O₃.

Наличие таких фрагментов иллюстрируется результатами изучения микроструктуры – рис. 2–4. Изображения микроструктуры свидетельствует также об однородном распределении наноксид алюминия по объему твердосплавного материала.

Особый интерес, с точки зрения прогнозирования качества твердого сплава представляют данные исследований вязкости разрушения материала по методу Палмквиста (рис. 5, 6) в сочетании с изучением микроструктуры. Трещины, которые образуются в материале в результате внедрения индентора (алмазной пирамидки Виккерса), привлекают к себе внимание главным образом потому, что являются потенциальными носителями косвенной информации по прочности, эксплуатационной стойкости материала,

отражают изменения в механизмах разрушения, соответствующих различным типам структуры.

Причиной прерывистого развития магистральной трещины (рис. 6) вероятно, является релаксация напряжений, возникающих в ее фронте при взаимодействии с включениями Al₂O₃-нано в структуре твердого сплава (рис. 5). Необходимо в этой связи подчеркнуть, что появление ступенчатой, дискретной трещины приблизительно соответствует области добавок частиц 0,3 % масс. Оценочные расчеты по теоретической модели для WC-Co-Al₂O₃-нано (при содержании C₂~0,3 %) дают значение числа частиц Al₂O₃-нано, приходящихся на одно зерно WC ~ 30 частиц, т. е. концентрация частиц становится настолько высокой, что возрастает степень их контактности и конгломерирования, а это может приводить к охрупчиванию материала. Увеличение содержания легирующих добавок наночастиц свыше 0,3 % по массе представляется нецелесообразным.

Разработанные применительно к известным стандартным твердым сплавам математические модели, методики прогнозирования прочности, вязкости разрушения модифицированных твердых сплавов в зави-

симости от концентрации и объемных долей всех составляющих [4], были использованы (адаптированы) для оценки эффективности «внедрения» наночастиц в структуру кобальтовой связки вновь создаваемых твердых сплавов. По результатам расчетных и проведенных экспериментальных исследований такие наноструктурированные твердосплавные композиты с субмикронным карбидным зерном могут иметь следующий диапазон свойств: трещиностойкость по Палмквисту (коэффициент интенсивности напряжений) $K_{IC} = 20\text{--}21 \text{ МПа м}^{1/2}$; прочность на изгиб, $\sigma_{\text{и}} = 1800\text{--}2400 \text{ МПа}$ (для твердых сплавов разного состава).

Результаты измерений представленные в табл. 2, 3 преобразованные в графическую форму наглядно иллюстрируют, что на разных базовых марках твердого сплава WC – 6 % Co, WC – 8 % Co, WC – 15 % Co стабильно обеспечивается уменьшение среднего размера карбидного зерна (рис. 7) при введении наночастиц керамики.

Аналогичные эффекты были обнаружены на безвольфрамовых твердых сплавах КНТ 16, модифици-

рованных добавками наночастиц керамики (рис. 8, 9 и табл. 3).

Результаты измерений среднего размера карбонитридного зерна в безвольфрамовых твердых сплавах представленные в табл. 3 и преобразованные в графическую форму наглядно иллюстрируют, что эффективность ингибирующего воздействия повышается с увеличением концентрации добавок наночастиц и уменьшением их среднего размера.

Результаты многочисленных эксплуатационных испытаний физико-механических характеристик твердосплавных материалов и изделий (инструмента) на основе отечественных сплавов групп ВК, ТК, КНТ, подтвержденные актами испытаний, внедрения, протоколами и заключениями экспертных комиссий, показывают стабильный прирост основных характеристик (прочности, трещиностойкости, износостойкости) соответствие требований международных стандартов по показателям твердости, плотности, параметрам микроструктуры. Достоверность полученных результатов подтверждается так же тем, что они проводились независимыми специалистами и экспертами (в том числе в производственных условиях).

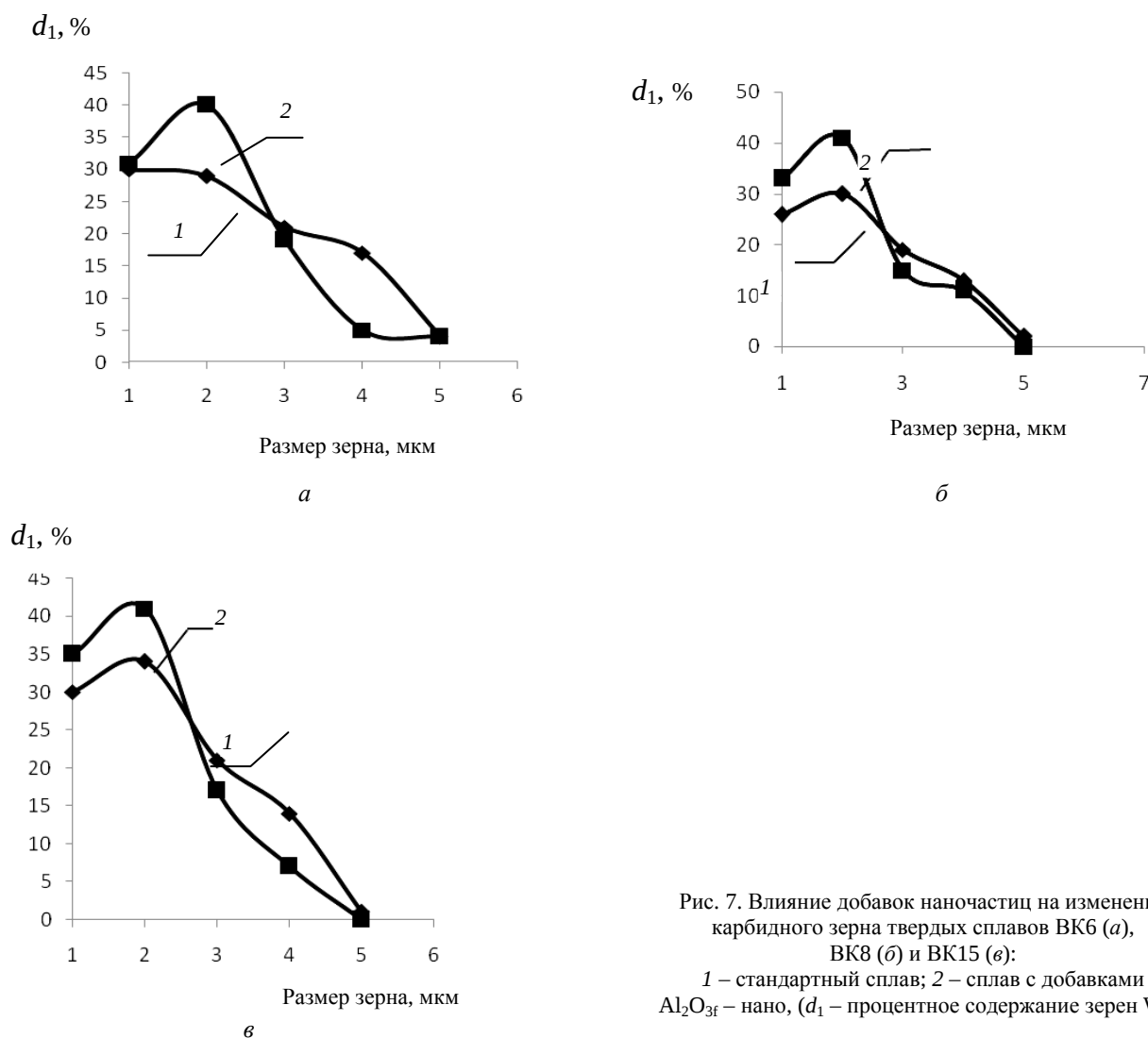
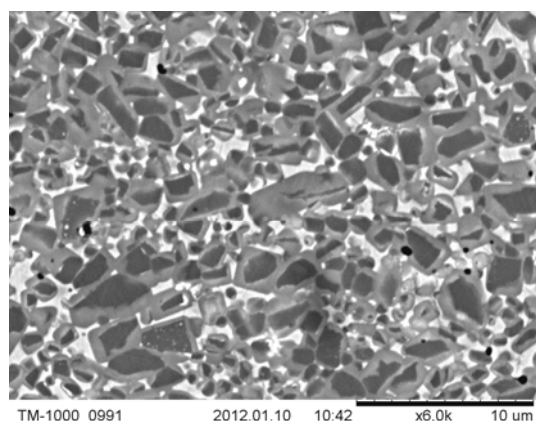
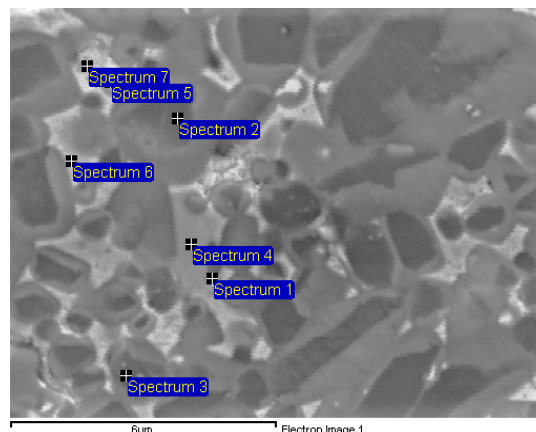


Рис. 7. Влияние добавок наночастиц на изменение карбидного зерна твердых сплавов BK6 (а), BK8 (б) и BK15 (в):

1 – стандартный сплав; 2 – сплав с добавками $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-нано}$, (d_1 – процентное содержание зерен WC)



а



б

Spectrum	Элементный состав спектров, масс %								
	C	Al	Si	Ti	Fe	Ni	Mo	W	Total
Spectrum 1	29.43			27.33		35.89	4.00	3.36	100.00
Spectrum 2	23.15			70.64			3.83	2.38	100.00
Spectrum 3	16.71			49.86		28.66	2.49	2.28	100.00
Spectrum 4	6.20	0.90	0.76	17.66		71.65		2.82	100.00
Spectrum 5	14.40			33.14		21.40	3.67	27.38	100.00
Spectrum 6	4.45	0.78	1.03	5.61	4.82	83.30			100.00
Spectrum 7			0.84	6.35	5.35	87.46			100.00

Рис. 8. Изображение микроструктуры (а) и результаты поэлементного анализа (б) сплава КНТ 16, модифицированного наночастицами

Таблица 3

Физико-механические свойства безвольфрамового твердого сплава состава TiCN-(Ni-Mo), дисперсноупрочненного Al₂O₃-нано

№ пп.	Содержание Al ₂ O ₃ -нано, масс. %	Прочность на изгиб, σ_b , МПа	Плотность, ρ , г/см ³	Твердость, HRA	Средний размер зерна TiCN, d, мкм	Параметры микро-структуры	Коэффициент стойкости при резании
1*	0	1200	5,80	89,5	2,7	A-04	1
2*	0,1	1370	5,76	89,2	2,23	A > % (30-40-16-13-1) A > 1 % (27-50-13-10) A > 1 % (40-46-14-1)	4,0
	0,2	1450	5,79	89,5	2,11		4,3
	0,3	1440	5,80	98,5	1,74		4,6
3*	0,1	1460	5,91	89,5	2,02	B 0.08 (33-38-25-4) A 0.02 (40-39-20-1) B 0.08 (44-44-12)	4,7
	0,2	1470	5,92	98,5	1,83		4,8
	0,3	1450	5,92	98,5	1,68		4,8
4*	0,1	1370	5,94	90,0	2,18	A-02 A-02 A-04	1,7
	0,2	1420	5,92	90,5	2,10		2,6
	0,3	1490	5,92	90,0	1,87		1,65

Примечание: 1* – базовый материал; 2* – добавки наночастиц вводились в порошковую смесь TiCN-(Ni-Mo) непосредственно при загрузке перед размолотом-смешиванием; 3* – после 18 часов размолот основной смеси TiCN-(Ni-Mo) в виде суспензии с дополнительным размешиванием в течение 2 часов; 4* – после 2 часов размолот основной смеси TiCN-(Ni-Mo) с дополнительным размешиванием в течение 18 часов.

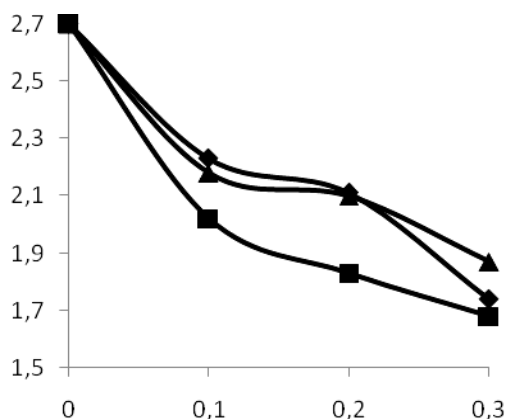


Рис. 9. Влияние содержания нанодобавок на средний размер зерна карбонитрида титана:
 ■ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,05 мкм; ▲ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,08 мкм;
 ◆ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,1 мкм

Использование нанопорошков для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании твердосплавных дисперсноупрочненных композиционных материалов. Результаты проведенных комплексных параметрических исследований свидетельствуют, по нашему мнению, о том, что у этих композитов реализуется известный в материаловедении принцип «состав – структура – свойства». Применение разработанных составов твердых сплавов, технологии их изготовления обеспечивает изменение структурных параметров, толщины кобальтовой прослойки связующего, снижение среднего размера карбидного зерна и, как результат, дисперсное упрочнение связующего и твердосплавного композита в целом; увеличение (по сравнению со стандартными материалами) прочности на изгиб на 25–30 %; трещиностойкости на 50 %; износостойкости (стойкость к истиранию) в 2–2,5 раза. За счет наличия в структуре твердого сплава нанопорошков оксида алюминия повышается стойкость режущего инструмента в 1,3–1,8 раза по сравнению с исходным сплавом.

Библиографические ссылки

1. Панов В. С., Чувилин А. М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2001. 452 с.
2. Godse R., Gurland J. Applicability of the critical strength criterion to WC–Co // *J. Of Mater. Science and Engineering*. 1988. A.106, p. 331–336.
3. Андриевский Р. А., Глезер А. М. Прочность наноструктур, УФН, 2009, 179:4, 337–358.
4. Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М. Конструирование и исследование твердосплавных и керамических композитов, модифицированных наночастицами // *Перспективные материалы*. 2012. № 5. С. 76–88.

5. Gordeev Y., Bucaemsky A., Seher G., Teremov S. Microstructure and properties of various cermets strengthening by ultrafine chock-wave particles // *Powder metallurgy world congress and exhibition//Spain*. 1998. Vol. 4. P. 140–146.

6. Использование нанопорошка Al_2O_3 в качестве ингибитора роста зерна в сплаве ВК8 / С. В. Николенко, М. И. Дворник, М. А. Пугачевский и др. // *Вопросы материаловедения*. 2008. № 2 (54). С. 100–105.

7. Белошапко А. Г., Букаемский А. А., Ставер А. М. Образование ультрадисперсных соединений при ударноволновом нагружении пористого алюминия. Исследование полученных частиц // *Физика горения и взрыва*. 1990. Т. 26, № 4. С. 93–98.

References

1. Panov V. S., Chuvilin A. M. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh spлавov i izdeliy iz nikh* (Technology and properties of sintered hard alloys and products made of them). Moscow, MISIS, 2001, 452 p.
2. Godse R., Gurland J. *J. Of Mater. Science and Engineering*. 1988, A.106, p. 331–336.
3. Andriyevskiy R. A., Glezer A. M. *Prochnost' nanostruktur*, UFN, 2009, 179:4, 337–358.
4. Gordeyev Yu. I., Abkaryan A. K., Zeyer G. M. *Perspektivnyye materialy*. 2012, № 5, p. 76–88.
5. Gordeev Y., Bucaemsky A., Seher G., Teremov S. Microstructure and properties of various cermets strengthening by ultrafine chock-wave particles // *Powder metallurgy world congress and exhibition//Spain*. 1998, vol. 4, p. 140–146.
6. Nikolenko S. V., Dvornik M. I., Pugachevskiy M. A. et al. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, № 2 (54), p. 100–105.
7. Beloshapko A. G., Bukayemskiy A. A., Staver A. M. *Fizika goreniya i vzryva*. 1990, 26 (4), p. 93–98.