

УДК 538.975:621.9

Н.В. Новиков, академик НАН Украины, д.т.н., проф.**С.А. Клименко, д.т.н., проф.****А.А. Бочечка, д.т.н., с.н.с.***Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины*

НАНОМАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Приведен обзор современного состояния применения наноматериалов в технологиях механической обработки – в инструментальных композитах для лезвийных и абразивных инструментов, в смазочно-охлаждающих технологических средах.

Ключевые слова: наноматериалы, технологические среды, композиты, лезвийные инструменты, абразивные инструменты.

Постановка проблемы. Наноматериалы – материалы, содержащие структурные элементы (кристаллиты, волокна, слои, поры и др.), геометрические размеры которых хотя бы в одном направлении не превышают нанотехнологической границы – 100 нм, обладающие качественно иными по сравнению с традиционными физическими, химическими, механическими и биологическими свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Размеры, ограничивающие принадлежность какого-либо материала к нанобласти, достаточно условны. Авторы [1] отмечают, что верхняя граница диапазона обусловлена существенным изменением свойств материалов при размерах структурных элементов < 100 нм, а нижняя граница диапазона связана с критическим размером нанокристаллического материала как структурного элемента, имеющего упорядоченное строение, т.е. кристаллическую решетку. Согласно [2], верхняя граница нанодиапазона обусловлена тем, что размер ≤ 100 соответствует максимальному значению радиуса действия сил электромагнитного взаимодействия, определяющий синтез наночастиц, нижняя граница связана с радиусом действия ближкодействующих сил, имеющим величину порядка ближайшего межатомного расстояния. При этом следует иметь ввиду, что для наночастиц размерный эффект имеет бифуркационную природу, что при достижении характерного размера сопровождается переходом на новый уровень развития и изменением свойств конденсированной

фазы, а величина ближайшего межатомного расстояния может составлять от долей нанометра до нескольких нанометров [3].

Изложение основного материала. В настоящее время наноматериалы находят все более широкое применение во всех отраслях промышленности, в том числе в процессах механической обработки и во многом являются базой для расширения возможностей технологий лезвийной и алмазно-абразивной обработки, позволяя высокопроизводительно и качественно изготавливать детали современной техники из конструкционных материалов с высокими физико-механическими свойствами.

Как известно, возможность эффективно использовать материалы в инструментах определяется широким комплексом их физико-механических свойств: – пределом прочности при растяжении, сжатии и изгибе; – величиной твердости и ее зависимостью от температуры; – температурной зависимостью предела выносливости; – модулем упругости; – коэффициентами Пуассона, линейного расширения, тепло- и температуропроводности и др. К этому перечню следует добавить химический состав и химические свойства инструментального материала.

Применение в материалах наноразмерных составляющих оказывает положительное влияние практически на весь комплекс свойств, предопределяющий их работоспособность в инструментах для механической обработки. Анализ изменения свойств материалов при снижении величины зерна до наноразмеров показывает, что в материале увеличиваются твердость, прочность при изгибе, термостойкость, снижаются чувствительность к смене температуры, адгезионная активность к контактирующему материалу, диффузионная активность. Отмеченное самым непосредственным образом сказывается на эффективности технологий механической обработки.

Это касается всех видов инструментов – стальных, из твердых сплавов, керамики или сверхтвердых материалов, как в традиционном виде, так и с защитными покрытиями. В значительной степени это относится и к материалам защитных покрытий. Кроме того, на основе наноразмерных составляющих изготавливаются пасты и суспензии для механической обработки, смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) практически для всех видов обработки.

Материалы для инструментов могут быть наноструктурными, нанокompозитными и нанослойными (рис. 1).

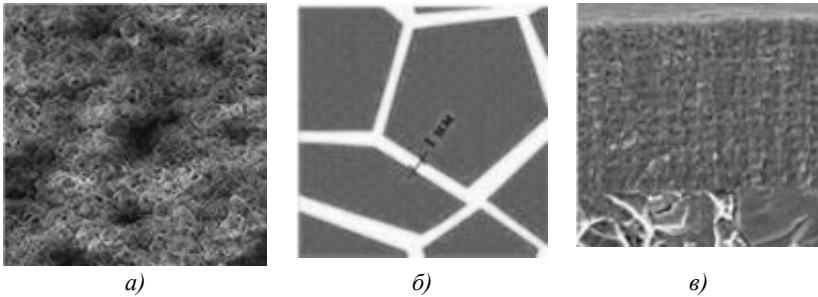
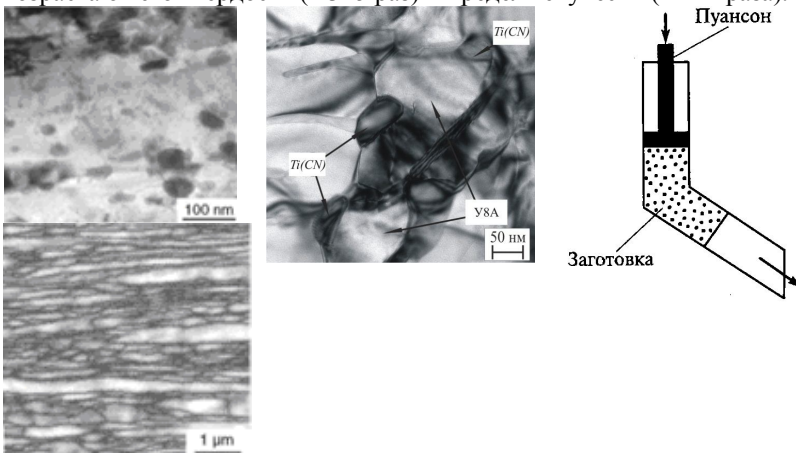


Рис. 1. Виды наноматериалов: а) наноструктурные; б) нанокомпозитные; в) нанослойные

Рассмотрим примеры применения наноматериалов в лезвийных и абразивных инструментах, СОТС для механической обработки.

Инструментальные и быстрорежущие стали. При изготовлении инструментов для механической обработки находят применение объемно- и поверхностно-наноструктурные стали. Для получения в сталях объемно-наноструктурного состояния (рис. 2) используются различные методы термомеханической обработки, технологии, обеспечивающие деформационное упрочнение материалов, методы интенсивной пластической деформации. Из последних для изготовления инструментов наиболее перспективен метод равноканального углового прессования – по данным [4], за счет измельчения зерна под действием интенсивных напряжений и деформаций сдвига в объеме обрабатываемого материала значительно возрастают его твердость (в 3–5 раз) и предел текучести (в 2–4 раза).



а) б) в)

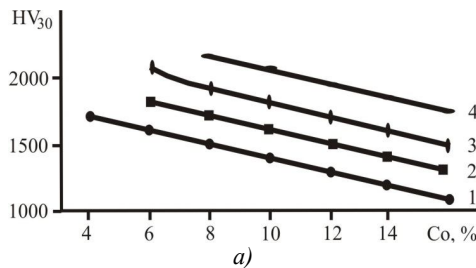
Рис. 2. Методы получения объемно-наноструктурного состояния в сталях: а) структура стали после ТМО; б) структура стали У8А, дисперсионно-упрочненной наноразмерными включениями $Ti(CN)$ [5]; в) схема равноканального углового прессования

Для получения на инструментах из стали поверхностно-наноструктурных слоев используется широкий круг технологий модифицирования материалов – плазменные, лазерные и т.д. Такие технологии позволяют повысить стойкость инструментов из быстрорежущих сталей до 10 и более раз.

К технологиям, обеспечивающим поверхностное наноструктурирование относится и микродуговое окисление алюминиевых сплавов с модифицированием базового электролита алмазно-графитовыми углеродными материалами [4]. При этом формируется слой покрытия толщиной до 300 мкм, микротвердостью до 25 ГПа.

Твердые сплавы. Для получения наноструктурных твердых сплавов используются исходные наноразмерные порошки карбидов вольфрама, титана, тантала. Как известно, при уменьшении размера зерна исходных карбидов значительно увеличиваются механические свойства твердых сплавов (рис. 3) [6], что обеспечивает повышение работоспособности оснащенных ими инструментов.

Разработан инструментальный композит «ВолКар», спеченный из наноразмерного порошка карбида вольфрама без Со-связки [7]. Материал характеризуется высокими механическими свойствами – твердость 23 ГПа, коэффициент трещиностойкости $K_{1c} = 8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.



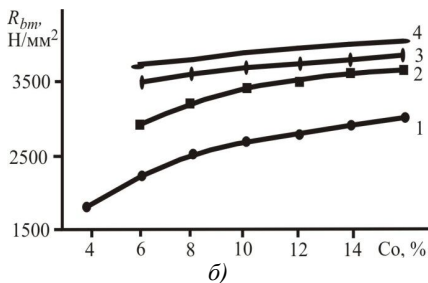


Рис. 3. Свойства твердых сплавов (размер зерна: 1 – 0,8–1,3 мкм; 2 – 0,5–0,8 мкм; 3 – 0,2–0,5 мкм; 4 – < 0,2 мкм) в зависимости от содержания кобальта: а) – твердость; б) – предел прочности при изгибе

Исследования работоспособности инструмента, оснащенного сплавом «ВолКар», в сравнении с резцами, оснащенными традиционным твердым сплавом ВК6 (твердость 15 ГПа, коэффициент трещиностойкости $K_{1c} = 13 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), при точении стали Х12М (56–58 HRC) показали повышение стойкости до 2,5 раз.

Керамика. Методами порошковой металлургии из наноразмерных порошков изготавливаются оксидные, карбидные, нитридные керамические композиты инструментального назначения. Кроме того, в керамических композитах используются наноразмерные наполнители, например «усы» из монокристаллов Si_3N_4 .

Высокие механические свойства демонстрирует керамический композит, спеченный из порошка $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$, полученного методом аэрозольного распылительного пиролиза [8]. Материал может эффективно использоваться для изготовления инструментов, например керамических скальпелей, применяться в качестве связки инструментальных композитов на основе кубического нитрида бора (рис. 4, а). Свойства композита обусловлены особенностями строения исходных порошков – они представляют собой сферы размером 1–4 мкм с фрактальной внутренней структурой, состоящие из оксидных частиц размером 16–25 нм (рис. 4, б)

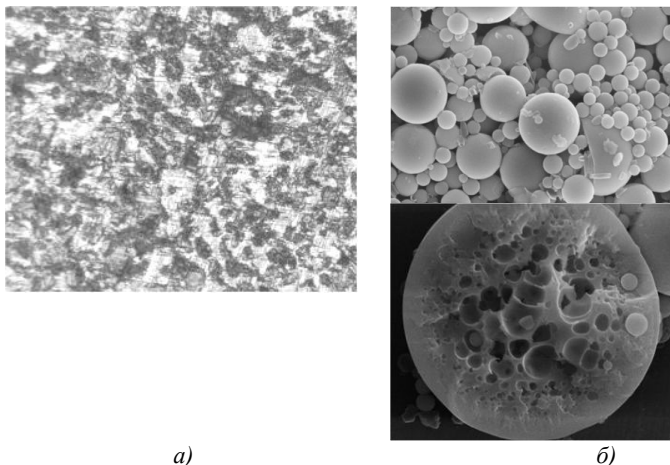
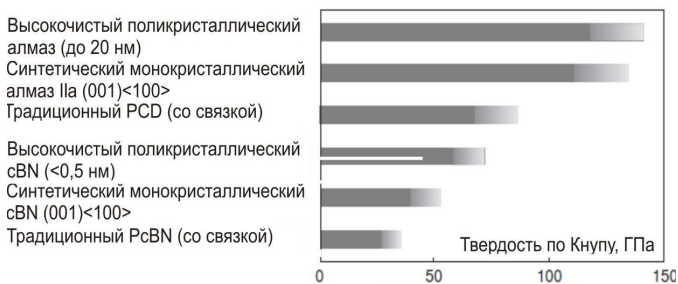
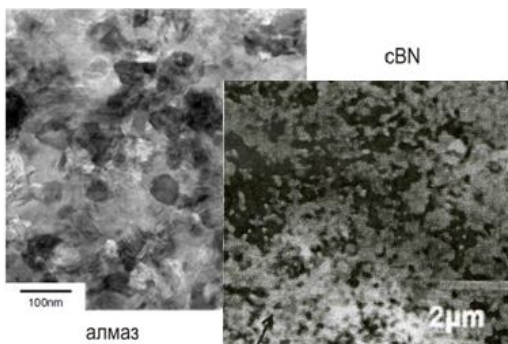


Рис. 4. Структура композита $cBN+ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$ (а), внешний вид оксидных порошков и внутреннее строение частицы (б)

Синтетические сверхтвердые материалы. Изготавливаются следующие синтетические сверхтвердые материалы для оснащения лезвийных инструментов для обработки резанием (рис. 5, а): наноструктурный поликристаллический алмаз и кубический нитрид бора (рис. 5, б); поликристаллический композит на основе алмаза и кубического нитрида бора; монокристаллический алмаз и кубический нитрид бора.



а)



б)

Рис. 5. Твердость сверхтвердых материалов (а), структура наноструктурных поликристаллических алмаза и кубического нитрида бора (б) (данные Sumitomo Electric Ltd)

В поликристаллическом композите в качестве наноразмерной составляющей может быть использованы как зерна сверхтвердого материала, так и компоненты связки.

На рисунке 6 представлены порошки, полученные путем компактирования алмазных нанопорошков детонационного синтеза без их рекристаллизации в условиях высоких давлений и температур [4]. Полученные порошки могут использоваться как для прецизионной абразивной обработки различных материалов, так и для спекания на их основе алмазных наноструктурных поликристаллов.

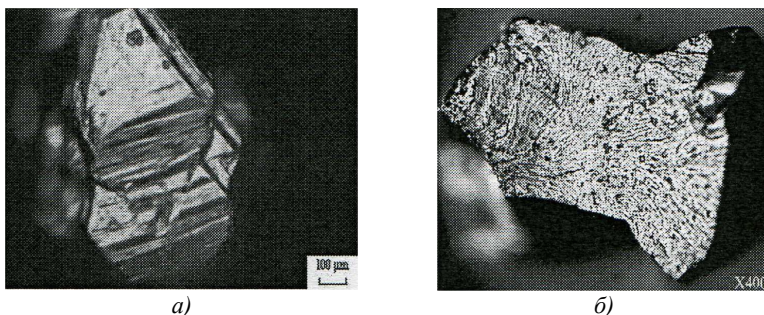


Рис. 6. Поликристаллы на основе УДА: а) частица поликристаллического алмаза, полученная вакуумно-термической обработкой порошка алмаза детонационного синтеза;

б) скол алмазного компакта, полученного ударно-волновой консолидацией порошка УДА

Как показали сравнительные исследования инструментов, оснащенных различными алмазными материалами, наибольшей работоспособностью характеризуются инструменты с наноструктурным поликристаллическим алмазом (рис. 7) [9]. Нужно отметить, что наименьшей работоспособностью обладают инструменты, оснащенные монокристаллическим алмазом.

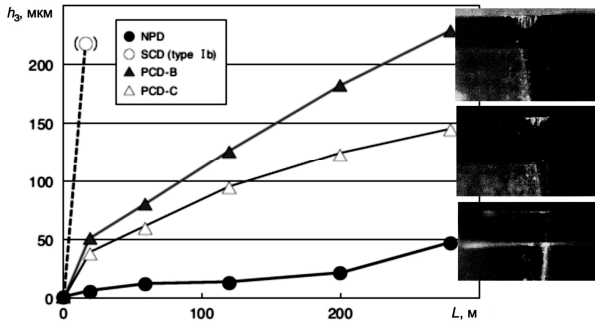


Рис. 7. Зависимость износа алмазных инструментов при точении твердого сплава (WC 7 %) от длины пути резания ($v = 20$ м/мин.; $S = 0,1$ мм/об.; $t = 0,5$ мм)

В таблице 1 представлены данные по влиянию размера зерна кубического нитрида бора на свойства инструментального композита.

Таблица 1
Физико-механические свойства композитов с различной величиной зерна кубического нитрида бора (данные Sumitomo Electric Ltd)

Показатель		Поликристаллический ультрадисперсный кубический нитрид бора	Традиционный поликристаллический материал на основе кубического нитрида бора	
			BH	BL
Содержание кубического нитрида бора, %		99,9	85–90	50–60
Связка		–	Co	TiN
Размер зерна, мкм		< 0,5	1–3	0,5–3
Твердость, ГПа	293 К	50–55	35–40	30–35
	1273 К	20	12	12
Прочность при разрыве, ГПа	293 К	1,35	1,4	1,05
	1273 К	1,6	0,55	1,1

Стабильность на воздухе, К	1621	1270	1270
-------------------------------	------	------	------

Как видно, уменьшение размера зерна кубического нитрида бора приводит к повышению физико-механических свойств композита. Особенно нужно отметить резкое изменение стабильности на воздухе, что при использовании в инструменте материала с ультрадисперсным зерном кубического нитрида бора, позволит повысить скорость резания.

Как показано в [10], уменьшение размера зерна в поликристалле на основе кубического нитрида бора с 2–10 мкм до 0,1–0,4 мкм позволяет при точении наваренной проволоки 75 (64–67 HRC) повысить стойкость оснащенного поликристаллами инструмента более 2-х раз и увеличить скорость резания в 1,8 раза.

В гомофазном гетероструктурном композите «гетеронит» в качестве связки использован наноразмерный порошок кубического нитрида бора, что позволило резко повысить его механические свойства. Такой композит может быть использован в инструменте для нарезания резьбы в деталях из материалов высокой твердости – величина ломающей подачи при точении закаленной стали инструментом, оснащенный композитом «гетеронит» > 1,5 мм/об.

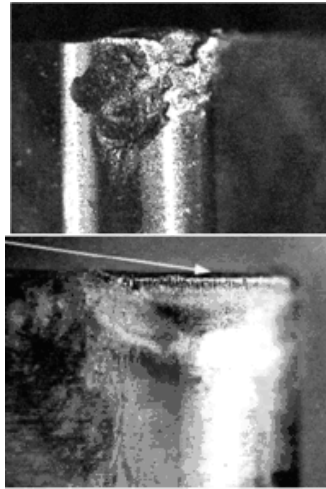
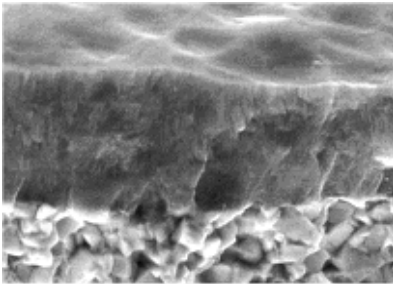
Нужно иметь ввиду, что изготовление наноматериалов для инструментов, используемых в механической обработке, сопровождается значительными трудностями в получении исходного сырья, реализации технологий получения материалов с наноразмерной структурой и обеспечении сохранности наноструктуры в связи с перераспределением напряжений в процессе хранения, так и в условиях термобарического нагружения в процессе эксплуатации.

Большой резерв повышения работоспособности инструментов заключается в создании и использовании инструментов с защитными покрытиями, которые во многих случаях являются наноматериалами. Такие покрытия наносятся на все виды инструментов – из сталей, твердых сплавов, керамики и сверхтвердых материалов (рис. 8). Защитные покрытия могут быть как одно-, так и многослойные. Кроме повышения стойкости инструмента, покрытие с нанокристаллической структурой, в отличие от микроструктурного, обеспечивает снижение сил резания в процессе обработки и шероховатости обработанной поверхности (рис. 9).

Наноматериалы нашли применение в абразивных инструментах, как в качестве абразивных элементов, так и в качестве компонентов связки. На рисунке 10 представлены фотографии изломов алмазосодержащих композитов с медно-оловянной связкой без и с

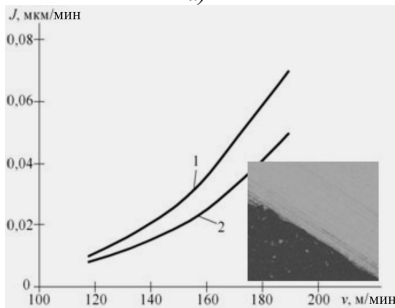
включением наноразмерных частиц меди. Показатели изнашивания алмазосодержащих композитов с добавками наноразмерных частиц меди и олова приведены в таблице 2 [13]. Как видно, работоспособность инструментов изменяется за счет увеличения твердости связки и формирования при разрушении излома с более сложной поверхностью, что связано с большими затратами энергии.

Для повышения работоспособности абразивных инструментов созданы композиты, которые по своему строению не относятся к наноматериалам, но в их структуре под действием условий процесса эксплуатации имеют место наноэффекты. Разработаны новые композиты на основе сетчатых ионно-ковалентных структур, способные адаптироваться к условиям термобарического нагружения в зоне обработки, т. е. обладающие эффектом реакционного обратимого самоармирования (рис. 11) [14].

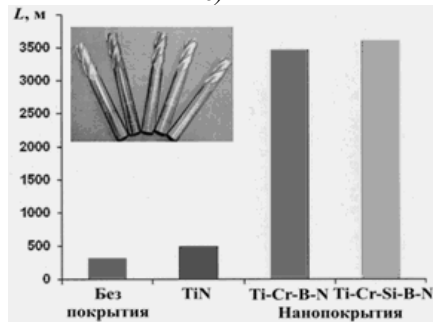


а)

б)



в)



г)

Рис. 8. Нанопокрывтие $TiAlN$ на твердосплавном резце (а), вид изношенного участка инструментов из керамики ВОК-71 и керамики ВКК с нанопокрывтием $Ti-(Ti,Al)N-(Ti, Cr,Al)N$ при сухом продольном точении стали 50Г (58 HRC) ($v = 348$ м/мин.; $S = 0,15$ мм/об.; $t = 0,5$ мм) (б) [11], скорость изнашивания инструмента из ПСТМ на основе кубического нитрида бора без покрытия (1) и с покрытием (сBN аморф.) (2) при точении стали ХВГ (60 HRC) (в), длина пути резания при фрезеровании стали Х12ВФ (з) [12]

Таблица 2

Показатели изнашивания инструментальных композитов системы $Cu+Cu_n+Sn+Sn_n+Co+алмаз$

Связка композита	Скорость изнашивания, мм ³ /час	Твердость HRВ ₁₀₀	Коэффициент изнашивания
Cu + Sn	0,72	90	1,00
Cu+Sn+Co	0,36	89	0,50
Cu+Cu _n +Sn+Sn _n (0,5 %)+Co	0,33	100	0,46
Cu+Cu _n +Sn+Sn _n (2,0 %)+Co	0,14	102	0,19

Эффект проявляется в обратимой смене плотности привитых к поверхности наполнителя функциональных групп полимера под действием механических и термомеханических напряжений. Макроскопическим проявлением самоармирования является обратимое повышение модуля упругости композита в 1,2–3,7 раза под действием напряжений сжатия или сдвига, что составляет 25–80 % величины его предела выносливости. Между полимерными компонентами самоармирование реализуется на участках 2–3 нм, между металлополимерными компонентами – 15–20 нм.

Созданные инструментальные композиты обеспечивают повышение производительности бездефектного шлифования инструментальных сталей в 1,6–2,2 раза при большей в 1,8–3,5 раза стойкости инструмента по сравнению с серийным аналогом (рис. 12).

Значительное влияние на работоспособность алмазно-абразивного инструмента оказывают наноразмерные покрытия на зернах алмаза.

В качестве примера можно привести покрытие $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ [15] толщиной до 30–70 нм, которое повышает вязкость разрушения инструментального композита условиях вибрационных динамических нагрузок и обеспечивает минимизацию износа инструмента в процессе эксплуатации.

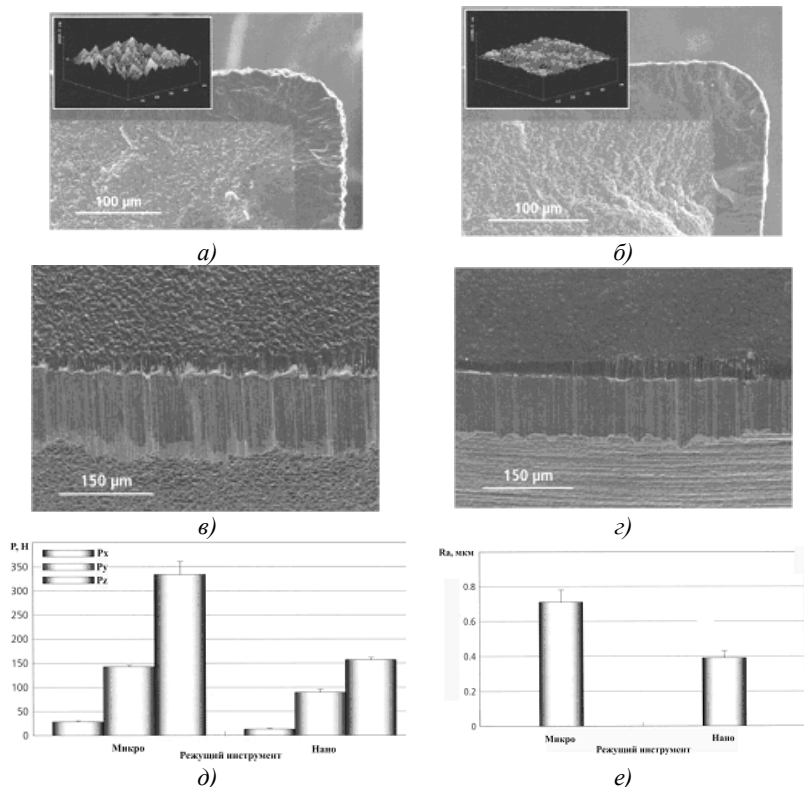


Рис. 9. Микроструктурное (а) и наноструктурное (б) покрытие на инструменте, износ по задней поверхности инструмента с микроструктурным (в) и наноструктурным (г) покрытием, силы резания (д) при точении инструментом с покрытием, шероховатость поверхности (е), обработанной инструментом с покрытием

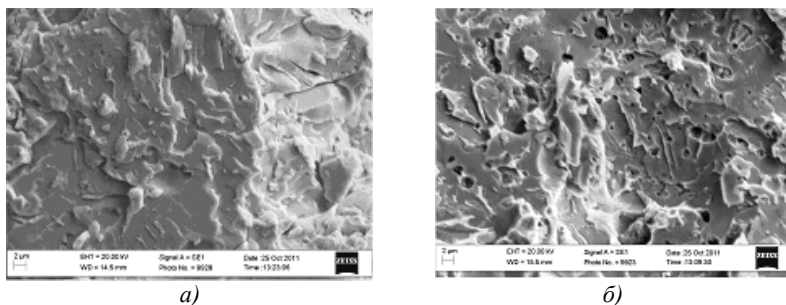


Рис. 10. Изломы композитов систем Cu+Sn+алмаз (а) и Cu+5% Cu+Sn+алмаз (б)

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) – еще одно перспективное направление применения наноматериалов в механической обработке.

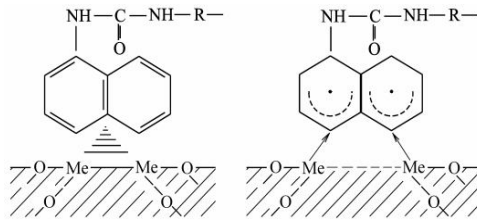


Рис. 11. Схема реализации эффекта самоармирования в композите

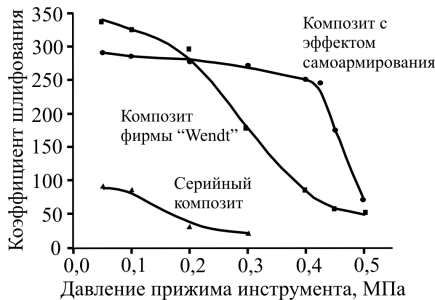


Рис. 12. Сравнение работоспособности шлифовальных кругов 12R4 150x5x3x32 при обработке твердого сплава BK15

Наночастицы в СОТС обеспечивают повышение теплопроводности среды и ее способности снижать температуру в зоне обработки, температуру инструмента и обработанного изделия. В СОТС могут использоваться как металлические, так и неметаллические наночастицы (табл. 3) [16]. Основой наноструктурированных СОТС является вода, масло и другие жидкости.

Высокую эффективность имеют СОТС с углеродными наночастицами – фуллероидами (фуллерен C-60, фуллерен C-70, одно- и многостенная нанотрубка, многослойная полиэдральная наночастица – астрален), фуллеритом (молекулярными кристаллами) (рис. 13).

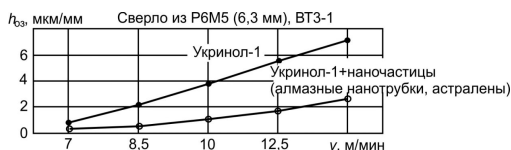
Наличие в СОТС поверхностно-активных веществ (ПАВ) повышает их эффективность за счет реализации эффекта Ребиндера. Однако при возрастании нагрузки в контакте свойства ПАВ снижаются в результате его десорбции с трущихся поверхностей и возможной деструкции. Повысить эффективность применения ПАВ возможно за счет введения в СОТС

наночастиц (рис. 14) [18] – наночастицы на стадии диспергирования в базовой СОТС формирует из его молекул сольватную оболочку, благодаря сорбции на наночастицах молекулы ПАВ приобретают ориентацию наиболее благоприятную для последующего их взаимодействия в зоне контакта с трущимися поверхностями, а наличие сольватной оболочки у наночастиц придает им седиментационно-агрегативную устойчивость, что необходимо для формирования объемной сетки в жидкой среде СОТС.

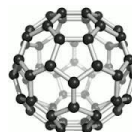
Таблица 3

Наноструктурированные СОТС

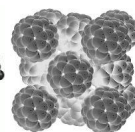
СОТС	Частица	Базовая жидкость	Средний размер частицы, нм	Доля в общем объеме, %	Прирост теплопроводности, %	
С металлическими наночастицами	Cu	этиленгликоль	10	0,3	40	
		вода	100	7,5	78	
	Fe	этиленгликоль	10	0,55	18	
	Au	вода	10–20	0,026	21	
	Ag		60–80	0,001	17	
С неметаллическими наночастицами	Al ₂ O ₃	вода	13	4,3	30	
			33		15	
			68	5,0	21	
	36		60			
	CuO		50	2,3	12	
			50	0,4	17	
	SiC		26	4,2	16	
	TiO ₂		15	5,0	30	
	многостеночная углеродная трубка		синтетическое масло	∅ 25–50	1,0	150
			децен/этиленгликоль/вода	∅ 15–30		30/13/17
вода		∅ 70–100	0,6	38		



а)



б)



в)

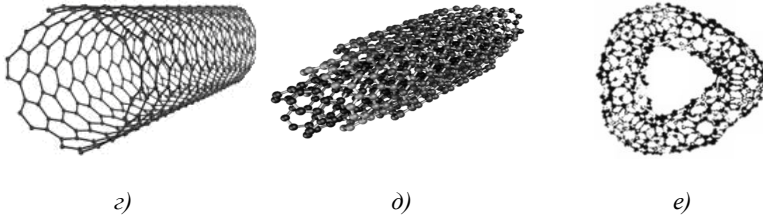


Рис. 13. Влияние СОТС на износ инструмента при сверлении титанового сплава (а) [17], углеродные наночастицы: б) фуллерен C-60; в) фуллерит; г), д) одно- и многостенная нанотрубка; е) астрален

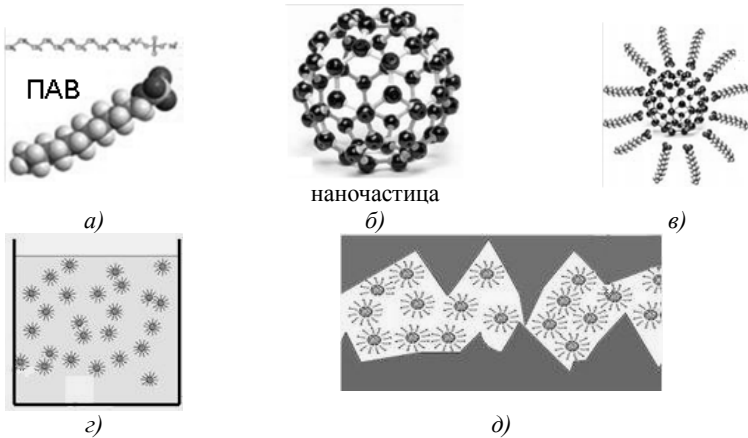


Рис. 14. Постадийный механизм наноструктуризации СОТС: а), б), в) формирование сольватной оболочки из ПАВ; г) возникновение фрактальной сетки в объеме СОТС; д) микрорельеф трибопары в присутствии наноструктурированной СОТС

Широкое применение наноматериалов обеспечивает революционные изменения в процессах механической обработки: повышение производительности процессов формообразования за счет резкого увеличения скорости резания; совершенствование технологий высокоскоростной обработки с получением изделий с требуемым состоянием поверхностного слоя; расширение существующих и разработку новых областей применения инструментов; эффективное получение и применение режущих инструментов с особо острыми режущими кромками для финишных технологий.

Список использованной литературы:

1. *Грабченко А.И.* Введение в нанотехнологии : текст лекций / *А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. Товажнянский.* – Харьков : НТУ «ХПИ»; ЧПИ «Новое слово», 2012. – 288 с.
2. *Шевченко В.Я.* Строение наночастиц / *В.Я. Шевченко* // Тр. VII конф. «Проблемы и достижения физико-химических и инженерных наук в области наноматериалов». – М. : Минпромнауки и технологий РФ, 2002. – Т. 2. – С. 185–207.
3. *Иванова В.С.* Введение в междисциплинарное наноматериаловедение / *В.С. Иванова.* – М. : Снайнс-Пресс, 2005. – 208 с.
4. *Витязь П.А.* Наноматериалы и нанотехнологии: достижения и проблемы / *П.А. Витязь* // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение : сб. науч. статей. – Мн. : Беларус. навука, 2009. – С. 5–51.
5. *Мочалина Н.С.* Упрочнение стали наноразмерными выделениями карбонитридов титана и ниобия : дис. ... канд. техн. наук / *Н.С. Мочалина.* – Новосибирск : НГТУ, 2010. – 188 с.
6. *Westphal H.* Bearbeitung schwerzerspanbarer Werkstoffe / *H. Westphal* // *Moderne Zerspannungswerkzeuge in optimierten Prozessketten.* – Schmalkalden, 2002.
7. US Patent # 6.617.271 B1 МКИ C04 B35/36. Tungsten carbide cutting tool materials / *E. Gevorkian, M. Kramer, V. Kodash.* – Заявл. 08.09.2003, Опубл. 17.03.2005.
8. Исследование свойств и оценка спекаемости наноструктурированных субмикронных порошков состава $ZrO_2 + 3 \text{ моль } \% Y_2O_3$, синтезированных методом ультразвукового распылительного пиролиза / *А.В. Галахов, В.И. Антипов, Л.В. Виноградов и др.* // Перспективные материалы. – 2012. – № 4. – С. 70–76.
9. Mechanical Properties and Cutting Performance of Nano-Polycrystalline Diamond / *H. Sumiya, K. Harano, T. Sato, S. Kukino* // *Proceedings of 4th Int. Conf. on High Performance Cutting, Nagara-gawa, Japan, 24–26 October, 2010.*
10. *Куликов М.Ю.* Влияние структуры на работоспособность инструмента из нитрида бора при чистовой обработке деталей, упрочненных методами электроконтактных технологий / *М.Ю. Куликов, А.Ю. Картамьшев* // Вестник Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина. – 2011. – Вып. 1. – С. 1–4.

11. *Сотова Е.С.* Повышение эффективности резания закаленных сталей путём применения высокопрочной композиционной керамики с многослойно-композиционными покрытиями : дис. ... канд. техн. наук / *Е.С. Сотова*. – М. : МГТУ «Станкин», 2011. – 148 с.
12. Наноструктурные покрытия Ti-Cr-B-N и Ti-Cr-Si-C-N для твердосплавного режущего инструмента / *Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, А.Н. Шевейко, В.А. Комаров и др.* // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2010. – № 2. – С. 39–47.
13. Инструменты и технологии, разработанные ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины в 2011 г. / *Н.В. Новиков, Л.Ф. Головки, Л.Н. Девин и др.* // Инструментальный світ. – 2012. – № 1 (53). – С. 4–7.
14. Инструментально-технологические разработки ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины в 2010 г. / *Н.В. Новиков, Н.А. Бондаренко, С.А. Клименко и др.* // Инструментальный світ. – 2011. – № 4 (52). – С. 4–11.
15. Глава 17. Сверхтвердые и керамические материалы и изделия из них / *П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.А. Баран и др.* // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. – Мн. : ГНОПМ, 2010. – С. 365–422.
16. *Калиниченко Н.Ю.* Анализ и классификация современных СОТС и наноматериалов, используемых в процессах абразивной обработки и рекомендации по их применению в технологии планетарного шлифования / *Н.Ю. Калиниченко, С.Е. Маркович, С.А. Калиниченко* // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – № 1. – С. 121–129.
17. *Соїту Н.Ю.* Повышение эффективности процесса сверления конструкционных материалов за счет наноструктурированных фуллеренсодержащих смазочно-охлаждающих технологических сред : автореф. дис. ... канд. техн. наук / *Н.Ю. Соїту*. – Саратов : СГТУ, 2010. – 21 с.
18. Повышение износостойкости триботехнических узлов технологической системы при использовании наноструктурированных СОТС / *В.А. Никитин, В.М. Петров, А.В. Федосов и др.* // Инструмент и технологии. – 2008. – № 25. – С. 146–150.

НОВИКОВ Николай Васильевич, академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, директор Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- материаловедение сверхтвердых материалов;
- режущие инструменты.

Тел.: (044)468–86–32.

E-mail: novikov@ism.kiev.ua

КЛИМЕНКО Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты.

Тел.: (044)430–85–00.

E-mail: atmu@ism.kiev.ua

БОЧЕЧКА Александр Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- материаловедение сверхтвердых материалов;
- режущие инструменты.

Тел.: (044)379–14–47.

E-mail: bochechka@ism.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 25.05.2012

