



УДК 621.762;621.893

© 2012

Академик НАН України Ю. В. Найдич, А. А. Адамовский

Конструкционный сверхтвердый материал на основе кубического нитрида бора в опорах и узлах сухого трения

Разработана технология получения изделий — соединения адгезионно активной пайкой ограниченных по размерам отдельных элементов из кубического нитрида бора. Получены цельные изделия конструкционного назначения: валы (оси) диаметром до 10 мм необходимой длины; практически не изнашиваемые без смазки подшипники скольжения типа вал/втулка; подпятники; опорные плиты; направляющие станков и др. с поверхностью трения кубический нитрид бора по кубическому нитриду бора.

Благодаря тому, что алмаз и кубический нитрид бора обладают особо высокими механическими свойствами (твердость, модуль упругости) и превосходят по этим характеристикам все другие известные вещества, они широко используются как инструментальные материалы — абразивные порошки, лезвийные инструменты (резцы различных конструкций, фрезы, фильеры, выглаживатели и др.)

Указанные синтетические материалы производят в сложных аппаратах сверхвысокого давления. Сегодняшняя промышленная технология позволяет получать элементы из алмаза и кубического нитрида бора либо в виде порошков, либо (особенно, для кубического нитрида бора) в виде поликристаллов — цилиндров небольшого размера: $\varnothing \sim 5 \div 8$ мм (лишь в особых аппаратах до 10–15 мм) высотой — 5–6 мм [1]. Присоединение такого элемента к металлическому держателю дает возможность после последующей заточки получить резцы для обработки, скажем, закаленных сталей, чугунов, а также многих других твердых веществ. Учитывая небольшие размеры таких элементов, закрепление их в держателе возможно только с помощью пайки специальными так называемыми адгезиоактивными припоями, отличающимися высокой смачиваемостью по отношению к алмазу или cBN. В Институте проблем материаловедения НАН Украины [2] в результате многолетних исследований разработаны принципы создания адгезиоактивных припоев различных классов и технологические процессы пайки ими неметаллических материалов, в частности, кубического нитрида бора.

Стратегической целью данной работы является разработка технологии соединения, сборки-пайки нескольких отдельных элементов из cBN с получением определенных изделий не-

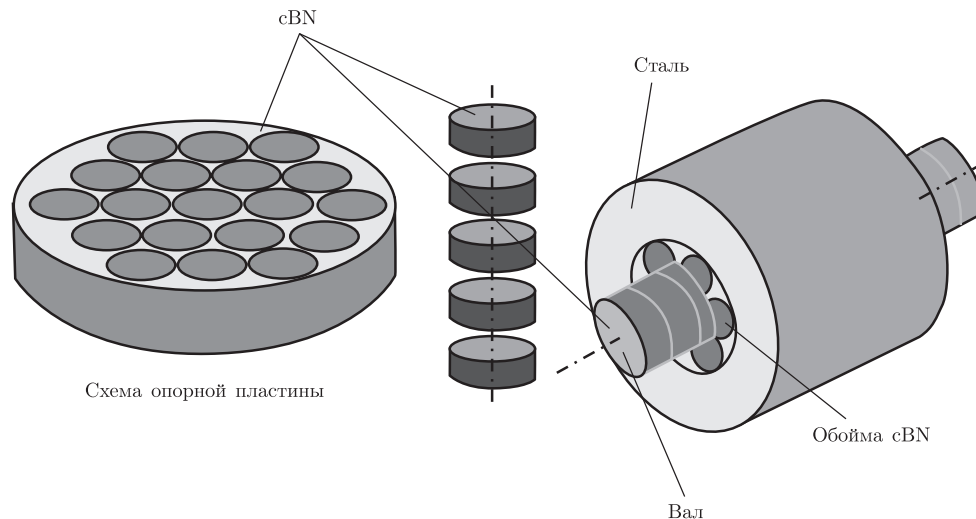


Рис. 1. Изделия конструкционного назначения, полученные методом пайки поликристаллов сBN

обходимых размеров и формы и таким образом использовать сверхтвердые вещества как конструкционные материалы для изготовления цельных изделий из них различного назначения. Ниже речь будет идти, прежде всего, о кубическом нитриде бора (сBN). Одна из возможных областей применения таких компактных конструкционных изделий из сBN являются узлы трения механизмов машин и приборов, особенно в экстремальных условиях эксплуатации.

Конкретной задачей настоящей работы является изготовление подшипников скольжения: цилиндрических — типа вал/втулка, а также плоских узлов трения, где пары трения составляют сBN/сBN. Хотя коэффициенты трения и механизм самого процесса трения в сочетаниях таких материалов остаются еще малоисследованными, можно полагать, что особо высокая твердость материалов будет способствовать низкой силе трения (отсутствие схватывания), а также малому износу материала в контактных узлах. Возможно также изготовить комбинированные детали, сочетающие сBN и металлические материалы, особенно достаточно твердые (например, сплавы типа ВК — карбид вольфрама/кобальт).

Объектом исследования выбран сверхтвердый материал на основе сBN — композит марки 05-ИТ (ТУ 2-035-806-81), полученный в камере сверхвысокого давления. Композит содержит, % (масс): 2 — Cr; 0,5 — Zr; < 0,1 — Al; остальное — сBN. Для проведения экспериментов использовали поликристаллы заводского производства таких размеров: диаметр — 6,75; высота — 5 мм, шлифованные по цилиндру и торцам. Шероховатость торцевых и цилиндрических поверхностей образцов $R_a = 0,32-0,50$ мкм, что соответствует 8^6-8^8 классу шероховатости по ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 2.309-73. Поликристаллы соединяли в изделия вакуумной пайкой. Методика и оборудование приведены в работе [2]. В качестве припоя использовали сплавы Cu-Sn, легированные различными добавками, в частности, Ti [2, 3]. Краевой угол смачивания припоя при температуре пайки ~ 850 °C в вакууме материалов на основе сBN составляет около 20° [4].

Схемы изделий конструкционного назначения представлены на рис. 1. Опорная пластина состоит из корпуса и поликристаллов: в стальной опорной пластине сделаны отверстия, размер которых несколько больше диаметра поликристаллов. Зазор в паре сопряжения отверстие-поликристалл составляет 0,1 мм, который заполняют припоем в процессе пайки.

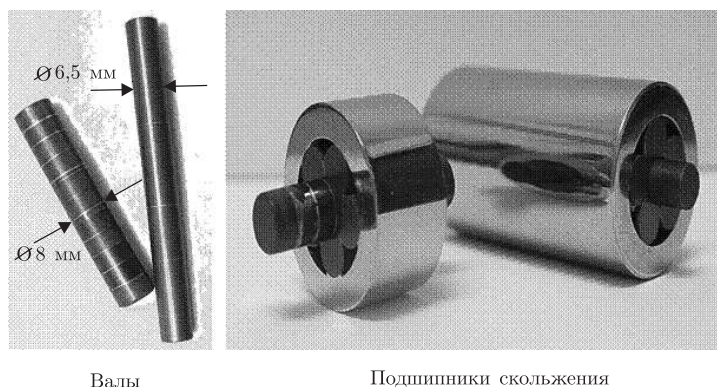


Рис. 2. Фотографии натуральных образцов изделий конструкционного назначения, полученных методом пайки, из сверхтвердого материала на основе cBN марки композит 05-ИТ

Спаянные поликристаллы и корпус для выравнивания опорной поверхности подвергают шлифовке на плоскошлифовальном станке алмазными кругами с подачей СОЖ в зону резания.

Особый интерес представляют цилиндрические подшипники. Вал собирают из таблеток поликристаллов, на торцы которых наносят припой и в вакууме таблетки припаивают торцами друг к другу. После пайки вал шлифуют с охлаждением на бесцентровошлифовальном станке алмазным кругом до шероховатости поверхности $R_a = 0,25$ мкм. Втулка состоит из стального корпуса и поликристаллов cBN. В стальном корпусе сделано центральное сквозное отверстие, диаметр которого больше диаметра вала на 1 мм, а в торцах корпуса — кольцевые проточки глубиной по 5 мм каждая. Диаметр проточек рассчитан: после укладки в проточки по пять поликристаллов — зазор между каждым соседним поликристаллом равен 0,1 мм. На поликристаллы в собранном корпусе наносят припой в виде шликера, загружают собранную втулку в вакуумную печь для пайки. Поликристаллы припаиваются друг к другу и к стальному корпусу, после пайки поверхность скольжения втулки обрабатывают алмазными цилиндрическими головками на внутришлифовальном станке. Необходимо обеспечить шероховатость рабочей поверхности втулки не ниже $R_a = 0,25$ мкм и зазор 0,01 мм в сопряженной паре вал/втулка.

Износ вал-втулка и коэффициент трения исследовали при трении на воздухе без охлаждения. Режим испытания: скорость скольжения — 0,26 м/с; нагрузка — 50 Н; износ определяли методом взвешивания с точностью 0,01 мг на аналитических весах второго класса модели ВЛТ-200 (ГОСТ 24104-80).

Фотографии натуральных образцов цилиндрических подшипников скольжения представлены на рис. 2. Валы диаметром 8 и 6,5 мм сопряжены с втулками из композита 05-ИТ, между которыми выдержан зазор 0,01 мм. Валы (Ø8 и Ø6,5 мм) поддерживают две втулки шириной по 5 мм каждая, впаянные в торцевые выточки стального корпуса. Испытания подшипников скольжения провели в течение 50 час с перерывами: 1 день — 8 час; следующие 6 дней — по 7 час. Суммарный пробег подшипников составил 46,8 км, суммарный износ втулки — 20,0 мг, вала — 10. Средний износ на 1 км пробега втулки — 0,43, вала — 0,21 мг/км. Коэффициенты трения различных материалов — металлов, керамики, сверхтвердых материалов, а также сочетания материалов для сравнения приведены в табл. 1. Как видно, коэффициенты сухого трения чистых металлов на воздухе очень высокие ($f = 0,51-1,44$). Сверхтвердые материалы выделяются среди металлов и неметал-

лов низкими коэффициентами сухого трения, приведенными в табл. 1. Это обусловлено тем, что они имеют повышенные модули упругости, как минимум в 2–3 раза по сравнению даже с керамикой на основе Al_2O_3 . В зоне контакта сверхтвердые материалы не подвергаются пластической деформации и обладают пониженным коэффициентом трения по сравнению с остальными материалами. Известно [8], что пластическая деформация материалов в зоне трения приводит к значительному повышению коэффициента трения пары. Коэффициент трения сверхтвердых материалов ниже металлов и оксидных керамик на порядок; коэффициент трения пары cBN–cBN меньше всех приведенных в табл. 1 величин и составляет, по нашим данным, $f = 0,04$. Отметим, что для пары алмаза по алмазу $f = 0,1$. Испытания [7] проводились при скольжении острья алмаза по поверхности куба [100] плоскости алмаза. Радиус закругления алмазного острья 130 мкм. С учетом малого износа и особо низкого коэффициента трения сверхтвердые материалы на основе cBN являются наиболее перспективными для их использования в узлах сухого трения.

Важным вопросом при изготовлении конструкционного изделия из сверхтвердых материалов методом сборки-пайки отдельных его элементов является прочность паяных швов. В наших исследованиях достигнутая прочность на изгиб паяного вала из таблеток композита СТМ на основе кубического нитрида бора марки 05-ИТ составила $\sigma_{\text{и}} = 280$ МПа. Полученная величина не является предельной. В Институте проблем материаловедения НАН Украины, используя различные припои и методы формирования макрокомпозитов, варьируя также конструкционные особенности соединения (ширина паяного зазора, форма изделия, другие параметры паяного шва), для сочетания одноименных материалов (Si_3N_4/Si_3N_4) получим прочность шва 750–800 МПа, что соответствует 95% прочности самого соединяемого материала. Следовательно, можно утверждать, что имеется значительный резерв повышения прочности конструкционных изделий из cBN. В этом направлении и предполагается продолжить настоящие исследования. При этом, конечно, должна быть учтена и прочность самого соединяемого материала.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны и изготовлены изделия конструкционного назначения из сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора — подшипник скольжения вал — втулка

Таблица 1. Коэффициенты сухого трения различных пар материалов [5–7, 9]

Материал пары трения	Коэффициент сухого трения, f	Источник
Среда — воздух		
Металлы		
Cu–Fe	0,51	[5]
Cu–Sn	1,44	
Часовые камни		
Рубин — У10А(HRC56)	0,35	[7]
Сапфир — сапфир	0,29	
Керамика (Al_2O_3)		
ЦМ-332 — ЦМ-332	0,885	[6]
Сверхтвердые материалы		
Алмаз — алмаз	0,1	[7]
Износ (I^*) и коэффициент (f) трения пары		
Эльбор-Р — ХВГ(HRC 61–63)	$I^* = 100–130$ мкм/км; $f = 1,25–1,68$	[9]
Композит: 05-ИТ — 05-ИТ, вал — втулка	$I^* = 0,64$ мг/км; $f = 0,04$	[Наши данные]

и некоторые другие изделия. Установлено, что в паре вал — втулка из cBN коэффициент сухого трения $f = 0,04$.

2. Подшипник скольжения вал — втулка испытан на воздухе без смазки. Установлено, что предложенная пара трения обладает меньшим коэффициентом трения и большей износостойкостью по сравнению с ранее известными материалами пар трения.

3. Материалы на основе кубического нитрида бора являются наиболее перспективными из ныне известных для разработки подшипников, опор скольжения и других изделий, работающих при высоких нагрузках без смазки в зоне контакта.

1. *Синтетические сверхтвердые материалы*: В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 280 с.
2. *Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении* / Под ред. Ю. В. Найдича. — Киев: Наук. думка, 1991. — 280 с.
3. *Найдич Ю. В., Колесниченко Г. А., Костюк Б. Д. и др.* Способ пайки твердосплавных материалов. А.с. SU № 536905. — Бюл. № 44. — 1976.
4. *Адамовский А. А., Зюкин Н. С., Евдокимов В. А.* Пайка сверхтвердых композиционных материалов на основе нитрида бора для изделий инструментального и конструкционного назначения // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2008. — Вып. 41. — С. 91–97.
5. *Крагельский И. В., Виноградова И. Э.* Коэффициенты трения. — Москва: Машгиз, 1962. — 220 с.
6. *Воронков Б. Д.* Подшипники сухого трения. — Ленинград: Машиностроение, 1979. — 224 с.
7. *Бонден Ф. П., Тейбор Д.* Трение и смазка. — Москва: Машгиз, 1960. — 151 с.
8. *Крагельский И. В., Щедров В. С.* Развитие науки о трении. — Москва: Изд. АН СССР, 1956. — 235 с.
9. *Карюк Г. Г., Колесниченко Л. Ф., Юга А. И. и др.* Фрикционные свойства материалов на основе плотных модификаций нитрида бора // Порошк. металлургия. — 1984. — № 9. — С. 82–87.

*Институт проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 29.07.2011

Академік НАН України **Ю. В. Найдіч, А. А. Адамовський**

Конструкційний надтвердий матеріал на основі кубічного нітриду бору в опорах і вузлах сухого тертя

Розроблено технологію одержання виробів — з'єднання адгезійно активним паянням обмежених за розміром окремих елементів з кубічного нітриду бору. Одержано цільні вироби конструкційного призначення: вали (осі) діаметром до 10 мм необхідної довжини; підшипники ковзання типу вал/втулка, які практично не зношуються без смазки; підп'ятники; опорні плити; напрямляючі верстатів та інші з поверхнею тертя кубічний нітрид бору по кубічному нітриду бору.

Academician of the NAS of Ukraine **Yu. V. Naidich, A. A. Adamovskiy**

Constructional superhard material based on cubic boron nitride in supports and dry friction units

The fabrication technology of articles formed by the active brazing of size-limited separate boron nitride elements is developed. Solid articles of construction appointment are obtained: shafts (axes) to 10 mm in diameter of a necessary length; practically wear-free bearings without lubricant of the shaft/bush type; saddles; baseplates; machine tools rails, etc., with the cubic boron nitride on cubic boron nitride friction surface.