

А. А. Адамовский, Н. С. Зюкин, В. А. Евдокимов*

ПАЙКА СВЕРХТВЕРДЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЙ

Измерен краевой угол смачивания адгезионно-активным припоем сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора. Угол смачивания, в зависимости от температуры пайки, измеряли в вакууме методом лежащей капли. Установлено, что краевой угол смачивания кубического нитрида бора больше такового композиционных материалов на его основе. С повышением температуры пайки (850—950 °С) угол смачивания для всех исследованных материалов уменьшается. Изготовлены изделия инструментального назначения (резцы) и модели изделий конструкционного назначения (стержни, подпятники, опоры подшипников скольжения).

Введение

Сверхтвердые материалы (СТМ) на основе нитрида бора уже нашли широкое применение в промышленности в качестве инструментальных материалов при лезвийной, абразивной обработках закаленных сталей и чугунов. Благодаря своим уникальным свойствам они могут использоваться в качестве конструкционных материалов во многих отраслях машиностроения. Однако СТМ получают в камерах сверхвысокого давления, размеры которых ограничены и диаметр заготовок кубического нитрида бора (сBN) не может превышать 5 мм [1], так как материал камер не выдерживает давления синтеза образцов большего диаметра. Для изготовления образцов диаметром больше 5 мм необходимо вводить добавки и, как правило, это способствует снижению физико-механических характеристик СТМ. Например, киборит-3 является композитом на основе сBN (70—75%) с добавкой AlN. Процесс изготовления материалов можно проводить при давлении 5,0 ГПа и использовать оснастку из закаленных инструментальных сталей вместо твердых сплавов группы ВК. В аппаратах такого типа удалось получить киборит-2 инструментального назначения диаметром до 32 мм, высотой до 10 мм и конструкционного назначения диаметром до 20—30 мм и высотой 15—25 мм [2]. Киборит-1, -2, -3 получают реакционным спеканием синтезированного в камерах сверхвысокого давления порошка сBN с Al, в состав связки которых наряду с AlN и AlB₂ входит высший борид β-AlB₁₂ [2]. Пайкой адгезионно-активными припоями можно создать изделия требуемого размера инструментального и конструкционного назначений, сохранив при этом высокие физико-механические свойства исходных сверхтвердых материалов.

* А. А. Адамовский — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины; Н. С. Зюкин — главный технолог, там же; В. А. Евдокимов — научный сотрудник, там же.

Цель работы — создать из материалов на основе кубического нитрида бора, используя адгезионно-активную пайку в вакууме, изделия инструментального и конструкционного назначений, сохранив высокие физико-механические параметры исходного материала.

Методика и объекты исследования

Для соединения (пайки) СТМ между собой и с державками выбрали в качестве припоя металлический сплав на основе Cu следующего состава (% (мас.)): 61Cu—19Sn—13Pb—6Ti—1Ni [3]. Смачиваемость СТМ многокомпонентным припоем на основе меди исследовали методом лежащей капли. Использовали аппаратуру и методику, описанную в работе [4]. В качестве объектов исследования выбраны СТМ на основе кубического нитрида бора: $\text{BN}_{\text{сф}}$ (100%) (эльбор-Р); композиты — кубический и вюртцитный нитрид бора ($\text{BN}_{\text{сф}} + 20\% \text{BN}_{\text{в}}$), кубический нитрид бора и нитрид алюминия ($\text{BN}_{\text{сф}} + 30\% \text{AlN}$); композит марки 05-ИТ. Поверхности СТМ, которые смачивали припоем, доводили алмазным инструментом до шероховатости $R_a = 0,5$ мкм. Для пайки СТМ с державками использовали порошки металлов приведенного состава, которые дозировали весовым методом и смешивали до их равномерного распределения. Для пайки СТМ с подложками (державками), а также между собой припой наносили на поверхность в виде шликера или ленты. Шликер — смесь металлических порошков в 3%-ном растворе нитроцеллюлозы ($[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{ONO}_2)_3] \cdot n + 3n \cdot \text{H}_2\text{O}$) в этиловом эфире уксусной кислоты. Для исследования смачиваемости порошки припоев прессовали в таблетки диаметром 2 и высотой 2 мм, которые укладывали на поверхность СТМ и загружали в вакуумную печь. В качестве подложки для СТМ выбраны сталь 45 в состоянии поставки и твердый сплав марки ВК60М. Прочность на срез паяного изделия СТМ—подложка исследовали на прессовом оборудовании по схеме торец—плоскость [5], а прочность на срез припоя — по схеме кольцо [6]. Образцы композита марки 05-ИТ ($\varnothing 6,75$ мм, $h = 5,0$ мм) шлифовали по торцам и цилиндру. Закрепляли их припоем по цилиндрической поверхности [6] с зазором 0,1 мм в стальную шайбу-державку ($\varnothing 14 \times 6,9$ мм, $h = 3,0$ мм). Остальные образцы СТМ шлифовали только по торцам. При испытании паяных образцов на прочность фиксировали силу разрушения. Напряжения среза определяли методом расчета. Результаты измерений обрабатывали методами математической статистики. Микроструктуру исследовали на микрорентгеноанализаторе в характеристическом излучении титана, меди, серебра, свинца, никеля. Паяные образцы инструментального и конструкционного назначений обрабатывали на станках, оснащенных алмазными шлифовальными кругами, — плоско- и бесцентрово-шлифовальном, заточном.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследовали смачиваемость материалов на основе кубического нитрида бора расплавом металлов на базе меди. Экспериментальные данные показывают, что расплав довольно хорошо смачивает ($\Theta < 90^\circ$) как

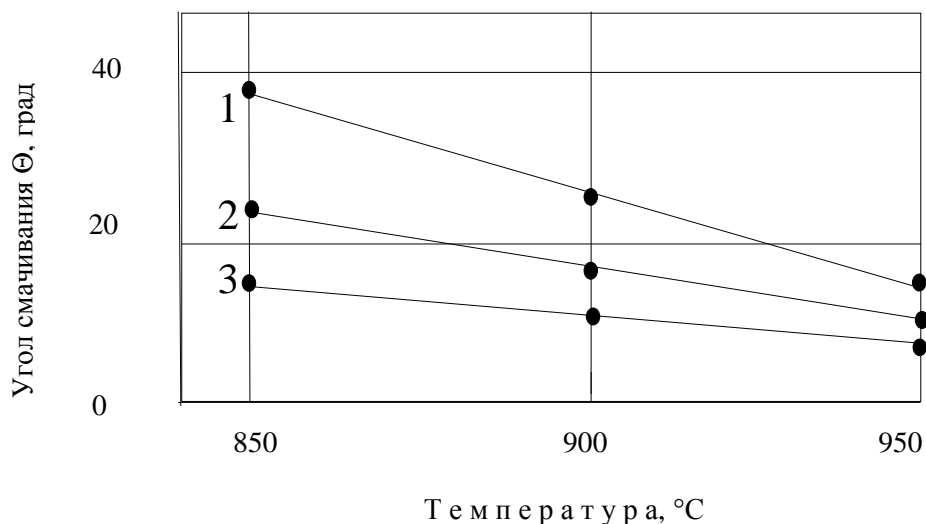


Рис. 1. Смачиваемость в вакууме $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Па материалов на основе $\text{BN}_{\text{сф}}$ припоем состава (% (мас.)) 61Cu—19Sn—13Pb—6Ti—1Ni: 1 — эльбор-Р; 2 — $\text{BN}_{\text{сф}} + 20\text{BN}_{\text{в}}$; 3 — $\text{BN}_{\text{сф}} + 30\text{AlN}$

Fig. 1. Wetting in of materials on a basis $\text{BN}_{\text{сф}}$ by solder of composition (% (mas.)) 61Cu—19Sn—13Pb—6Ti—1Ni in vacuum $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Pa: 1 — borozon-P; 2 — $\text{BN}_{\text{сф}} + 20\text{BN}_{\text{в}}$; 3 — $\text{BN}_{\text{сф}} + 30\text{AlN}$

кубический нитрид бора, так и композиционные материалы на его основе, хотя различия в углах смачивания имеют место. Известно [4], что чистая медь не смачивает СТМ на основе $\text{BN}_{\text{сф}}$ ($\Theta > 90^\circ$), а расплав Cu, содержащий поверхностно-активный металл (Ti), смачивает указанные материалы. Исследование смачиваемости гексанита-Р адгезионно-активными сплавами [4] системы Cu—Sn—Pb—Ti при различном соотношении фаз $\text{BN}_{\text{сф}}$, $\text{BN}_{\text{в}}$ показало, что по мере роста содержания фазы $\text{BN}_{\text{в}}$ в образцах угол смачивания уменьшается. Улучшение смачиваемости объясняют [4] большей химической активностью фазы $\text{BN}_{\text{в}}$ по сравнению с фазой $\text{BN}_{\text{сф}}$, что хорошо согласуется с ИК-спектрами отражения поликристаллов на основе BN различного фазового состава. Композит на основе $\text{BN}_{\text{сф}}$, содержащий AlN, лучше смачивается металлическим расплавом припоя (рис. 1). Установлено, что композит на основе $\text{BN}_{\text{сф}}$, легированный Al, содержит фазы AlN, AlB_2 , $\beta\text{-AlB}_{12}$ [2]. По-видимому, эти фазы обладают большей химической активностью в контакте с расплавом адгезионно-активного припоя, чем с фазой $\text{BN}_{\text{сф}}$. Поэтому композиты лучше смачиваются по сравнению с чистым $\text{BN}_{\text{сф}}$.

Припой можно использовать в виде порошка (шликер) и в виде прокатанной ленты. Припой в виде шликера выбранного состава необходимо употребить после его приготовления в течение 5—10 мин, поскольку по истечении указанного срока этиловый эфир уксусной кислоты полностью испаряется и шликер “затвердевает”. Кроме того,

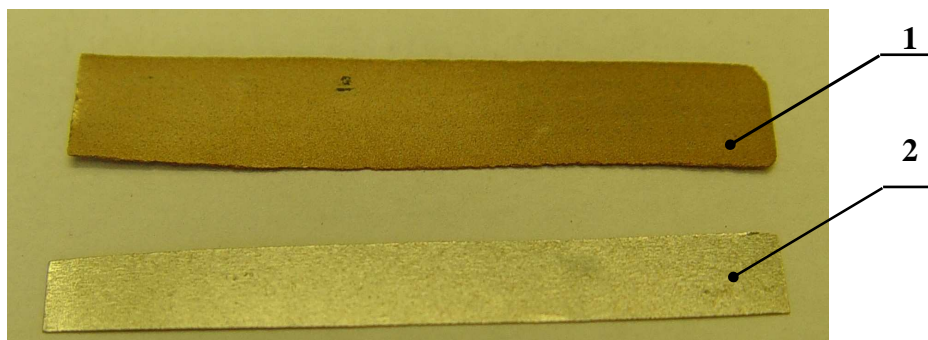


Рис. 2. Припой, прокатанный в ленту толщиной 0,2 (1) и 0,1 мм (2)

Fig. 2. Solder, rolled in a tape, thickness 0,2 (1) and 0,1 mm (2)

шликер имеет низкую плотность и в охлажденном расплаве припоя остаются поры. С целью облегчения сборки изделий перед пайкой и уменьшения пористости припоя после его кристаллизации смесь порошков уплотняли на валках прокаткой в ленту (рис. 2). Лента может храниться длительное время и всегда готова к употреблению. Цвет прокатанной ленты припоя зависит от её толщины. Лента толщиной $\delta = 0,2$ мм имеет желтый цвет меди. При толщине 0,1 мм лента имеет белый цвет олова (рис. 2), поскольку при утонении ленты олово прокатывается тонким слоем и покрывает частицы меди. Лента более удобна для пайки по плоскости: заготовки проката нужного размера и формы можно вырезать в процессе подготовки изделия перед пайкой.

Исследовали прочность на срез паяного изделия на образцах СТМ, припаянных по торцу к плоскости державки. Результаты испытаний показали, что прочность на срез $\sigma_{ср}$ изделия существенно зависит от материала державки: большая прочность ($189 \pm 5,8$ МПа) фиксировалась для пары СТМ—сталь 45 по сравнению с парой СТМ—ВК60М ($162,4 \pm 2,3$ МПа). Вероятно, это можно объяснить тем, что припой в расплавленном виде лучше смачивает сталь 45 и хуже твердый сплав марки ВК60М, то есть большие силы адгезии припоя к стали способствуют повышению прочности на срез паяного изделия. Кроме того, видимо, из державки твердого сплава кобальт диффундирует в тонкий поверхностный слой СТМ и разупрочняет его. Поэтому лучшим материалом державки для СТМ является сталь.

В работе [5] отмечено и в настоящем исследовании подтверждено, что при испытании образцов СТМ, припаянных по торцу, разрушение всегда происходит по СТМ, а не по припою. Такой же характер разрушения наблюдали при испытаниях изделий на растяжение и на срез [5]: поверхность разрушения всегда проходила по телу поликристалла вблизи границы раздела СТМ—припой или посередине поликристалла. Авторы работы [5] считают, что причиной разрушения поликристалла посередине является дефект его изготовления.

Прочность припоя на срез [3] не измеряли, поскольку разрушение всегда происходило не по припою, а по СТМ. Прочность припоя на срез исследовали на образцах СТМ, припаянных к державке по боковой

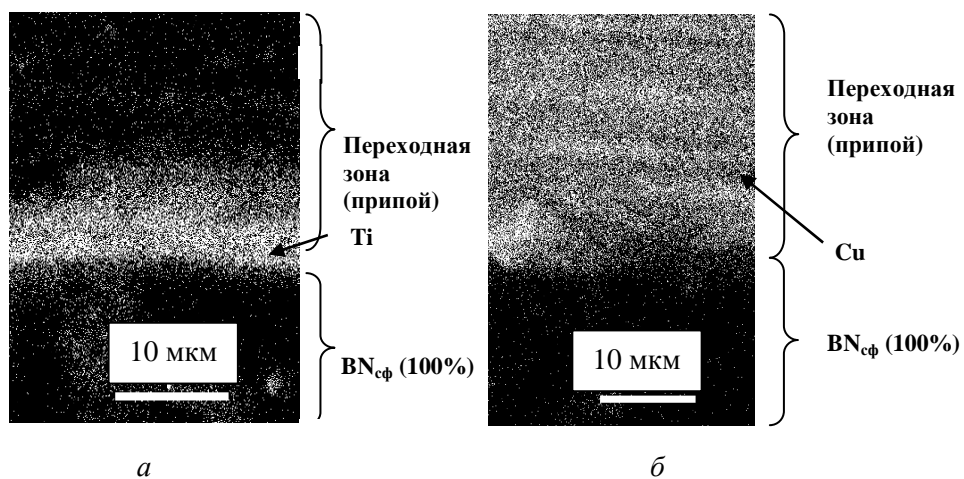


Рис. 3. Микроструктура в сечении BN_{cf} —припой (% (мас.)) 61Cu—19Sn—13Pb—6Ti—1Ni в характеристическом излучении титана (а) и меди (б)

Fig. 3. Microstructure in section BN_{cf} —solder (% (mas.)) 61Cu—19Sn—13Pb—6Ti—1Ni in characteristic radiation titanium (а) and copper (б)

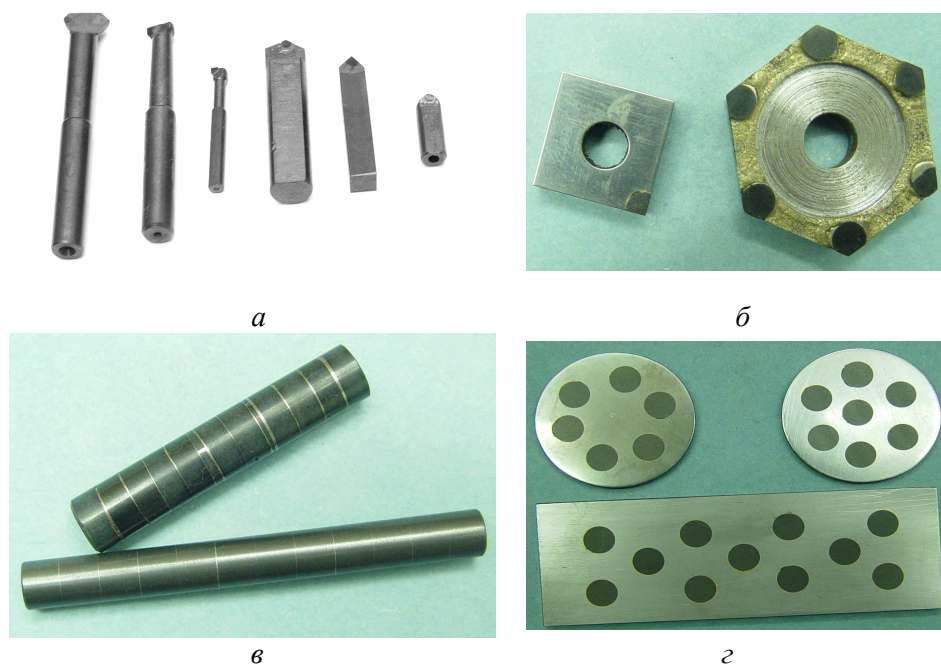


Рис. 4. Паяные изделия инструментального и конструкционного назначений на основе BN_{cf} : а — резцы; б — пластины; в — эльборовые стержни; г — подпятники опор подшипников скольжения

Fig. 4. Brazed products of tool and constructional purpose on a basis BN_{cf} : а — cutters; б — plate; в — borazon rods; г — socket of the slide bearing support

поверхности цилиндра — по схеме кольцо [6]. Разрушение паяной пары композит 05ИТ—сталь 45 всегда происходило по припою: припой оставался на поликристалле (композит 05ИТ) и на державке (сталь 45), а СТМ и сталь 45 не разрушались. Измеренная $\sigma_{ср}$ исследуемого припоя составила $309 \pm 8,7$ МПа. Прочность на срез промышленного припоя на основе меди—латуни марки Л63 равна 322 МПа [2]. Таким образом, прочности припоя и латуни Л63 почти равны.

Исследование микроструктуры переходной зоны СТМ—припой в характеристическом излучении показало, что титан адсорбируется на поверхности $BN_{сф}$ (рис. 3, *a*), а медь распределяется по припою равномерно (рис. 3, *b*), то есть так же, как и остальные металлы, входящие в состав припоя: олово, свинец, никель. Следовательно, адсорбция титана на поверхности СТМ способствует улучшению его смачивания и повышению прочности спая соединенных материалов.

Пайкой адгезионно-активным припоем получены изделия инструментального и конструкционного назначений из $BN_{сф}$: расточные, проходные, резьбовые резцы и резцовые вставки, пластины на подложке из твердого сплава (пластина квадратная) и стали (пластина шестигранная), эльборовые стержни (спаяны при помощи прокатанного припоя), эльборовые подпятники опор подшипников скольжения (спаяны по схеме кольцо) (рис. 4). Стержни СТМ конструкционного назначения паяли прокатанным припоем (рис. 4). Исследования показали, что в припое отсутствуют поры, то есть спай из прокатанного припоя получается практически без пор. Известно [2], что поликристаллы $BN_{сф}$ в камерах сверхвысокого давления получают длиной до 5 мм. Пайкой получены стержни длиной 100 мм и есть технические возможности получить стержни длиной более 100 мм. При этом толщина прослойки припоя между заготовками СТМ в стержне равна 0,10—0,06 мм. Приготовили шлифы, перпендикулярно поверхности пайки. Исследования при помощи оптического микроскопа показали, что поры в припое отсутствуют.

Пайка СТМ инструментального и конструкционного назначений имеет некоторые особенности. В лезвийном инструменте поликристаллы паяют в открытый паз. Следовательно, припой смачивает поликристалл на $\sim 1/3$ — $3/4$ его поверхности: нижний торец и часть боковой поверхности. Материалы конструкционного назначения паяют по торцам (цилиндры, стержни) или по боковой поверхности и торцу. При пайке по боковой поверхности материал в державке находится в сжатом состоянии, что способствует улучшению условий его работы в узлах трения.

Выводы

Показано, что адгезионно-активным припоем в вакууме надежно соединяются сверхтвердые материалы на основе нитрида бора между собой и с державками из стали и твердых сплавов. Угол смачивания $BN_{сф}$ больше по сравнению с Θ композитов на его основе, то есть композиты смачиваются лучше чистого $BN_{сф}$.

Изготовлены изделия инструментального назначения, оснащенные СТМ: резцы расточные, проходные, резьбовые (на стальной державке); вставки, закрепленные на твердом сплаве группы ВК, ТК.

Пайкой получены модели изделий на основе СТМ конструкционного назначения: стержни длиной 100 мм; подпятники вращающихся опор; плоские опоры подшипников скольжения.

РЕЗЮМЕ. Обмірювано крайовий кут змочування адгезійно-активним припоєм надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бора. Кут змочування, у залежності від температури пайки, вимірювали у вакуумі методом лежачої краплі. Встановлено, що крайовий кут змочування кубічного нітриду бору більше таких композиційних матеріалів на його основі. З підвищенням температури пайки (850—950 °С) кут змочування для всіх досліджених матеріалів зменшується. Виготовлено вироби інструментального призначення (різці) і моделі виробів конструкційного призначення (стрижні, підп'ятники, опори подшипників ковзання).

1. Новиков Н. В., Шульженко А. А., Беженар Н. П. и др. Киборит: получение, структура, свойства, применение // Сверхтвердые материалы. — 2001. — № 2. — С. 40—51.
2. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение:* Монография в 6-ти т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. Т. 1: Синтез алмаза и подобных материалов. — К.: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “Алкон” НАН Украины, 2003. — 320 с.
3. А. с. SU № 536905. Способ пайки твердосплавных материалов / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко, Б. Д. Костюк, Н. С. Зюкин и др. // Бюл. — 1976. — № 44.
4. *Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении* / Под ред. Ю. В. Найдича. — К.: Наук. думка, 1991. — 280 с.
5. Найдич Ю. В., Мартыросян А. М., Колесниченко Г. А., Зюкин Н. С. Особенности прочностных характеристик спаев сверхтвердых инструментальных материалов на основе нитрида бора с металлами // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1989. — Вып. 22. — С. 62—66.
6. Петрунин И. Е., Маркова И. Ю., Екатова А. С. *Металловедение пайки.* — М.: Металлургия, 1976. — 264 с.

Поступила 01.12.08

Adamovskyi A. A., Zyukin N. S., Evdokimov V. A.

The brazing of super hard composite materials on a basis of boron nitride for products of tool and constructional purpose

The wetting angle by adhesive-active solder of the superhard a material on base cubic nitride boron is measured. The wetting angle, depending on the temperature of the soldering, measured in vacuum by sessile drop method. It is fixed that wetting angle on cubic boron nitride is bigger in contrast with composite materials on his base; with increasing of the temperature of the soldering (850—950 °С) the wetting angle for the all explored materials have decreases. The products for the instrumental appointment — a cutting tool and models of products for constructional purposes such as a rods, step-bearing, bearings, slider bearing — were produced.