

УДК 621.921.34

С.А. Клименко, д.т.н., проф.**И.А. Петруша, д.т.н., с.н.с.****А.С. Осипов, к.т.н., с.н.с.****М.В. Никишина, м.н.с.****М.Ю. Копейкина, к.т.н., с.н.с.****В.Н. Ткач, д.ф.-м.н., с.н.с.***Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины*

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СВЕРХТВЕРДЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрены современные подходы к созданию и совершенствованию сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора для оснащения режущих инструментов для обработки конструкционных материалов с высокими механическими свойствами.

Введение. Совершенствование технологий механической обработки конструкционных материалов, в том числе закаленных сталей, чугунов, титановых, твердых сплавов и др., связано с повышением производительности за счет увеличения скорости резания и подачи, снижения стоимости обработки, что, в свою очередь, обусловлено созданием новых режущих инструментов в результате применения высокоэффективных инструментальных композитов, таких как сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (сBN).

Цель. Изучение закономерностей структурообразования композитов на основе сBN, получаемых в условиях высоких давлений и температур, изучение их физических и физико-механических свойств, оптимизация областей эффективного использования полученных материалов, определяют комплекс взаимосвязанных научно-исследовательских материаловедческих и технологических задач.

Основная часть. Концептуально разработка композитов с керамической матрицей на основе сBN, хорошо соотносится с известными представлениями и технологическими решениями, развитыми при получении конструкционных композитов с керамической матрицей. В рассматриваемом случае основное отличие в методе получения композитов состоит в необходимости применения

высоких давлений (4,5–8 ГПа) и спекании при повышенных температурах в диапазоне 1800–2400 °С, соответствующей области термодинамической стабильности кубической модификации нитрида бора.

Содержание сBN в инструментальных композитах может варьироваться в широких пределах. К группе *BL* (по классификации ISO) относят композиты с 45–65 об. % сBN. Матрица, дисперсность структуры которой отвечает субмикронному диапазону, мультифазна и имеет сложный химический состав на основе элементов Ti, C, N, Al, O. Основное предназначение композитов группы *BL* – применение в инструментах при обработке закаленных сталей твердостью 55–65 HRC с высокими скоростями резания, в том числе в условиях прерывистого точения.

Композиты с содержанием сBN в диапазоне 70–95 об. % (группа *BH* по классификации ISO) предназначены для использования в инструментах при точении и фрезеровании серых и отбеленных чугунов, наплавленных, а также других упрочненных материалов. Такие инструменты обладают повышенной стойкостью к ударным нагрузкам и могут использоваться при обработке твердых сплавов с высоким содержанием кобальта.

Характерные особенности структурного состояния некоторых вариантов инструментальной керамики на основе сBN позволяют отнести их в разряд новых материалов – ***сверхтвердых структурированных композитов*** (ССК).

В данной статье представлены основные подходы к созданию ССК инструментального назначения.

Принцип структурированности связывается с возможностью формирования при спекании в композитах определенного гетерогенного структурного состояния, что позволяет целенаправленно изменять их физико-механические свойства, превышающие свойства монофазных гомогенных материалов. Содержание фазы сBN в ССК, как правило, не менее 95 об. %, т.е. композит является существенно монофазным, но гетерогенным по своей структуре.

Основные подходы к формированию структурного состояния ССК на основе сBN, обеспечивающего необходимую прочность композита, представляются следующими:

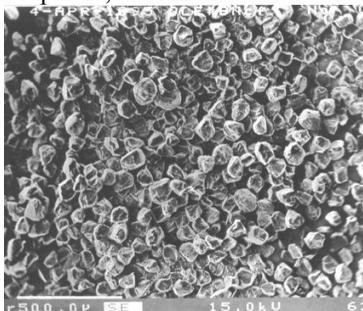
- ***ССК с комбинированной гетероструктурой.*** Керамическая матрица на основе сBN упрочняется (армируется) путем введения высокопрочных изометричных частиц поликристаллического сBN. Для структурного состояния армирующего компонента характерны

совершенство внутренних границ и высокий уровень межзеренной когезии. Границы в объеме матрицы формируются на основе межчастичных контактов при спекании с участием добавок активаторов, вводимых в количестве 3–5 об. %. Структура матрицы способна тормозить распространение трещин, разветвляя их в объеме композиционного материала и, как следствие, поглощать энергию;

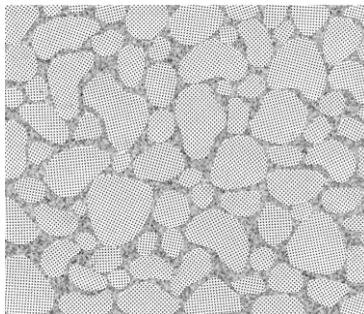
- **гетеромодульный ССК**. Повышение прочности и термостойкости инструментальной керамики достигается путем введения в шихту для спекания матрицы сBN низко модульных включений в количестве 3–5 об. %. Размеры включений должны быть существенно меньше некоторого критического значения, при котором возникающие при снижении давления остаточные растягивающие напряжения вблизи включений в матрице недостаточны для спонтанного микрорастрескивания композита. Главным механизмом повреждения прочности является отклонение траекторий магистральных трещин, их разветвление в неоднородном поле упругих напряжений вблизи частиц другой фазы и, как следствие, диссипация энергии. Гетерогенность структурного состояния в этом типе ССК обусловлена локальными микроискажениями кристаллической решетки сBN в непосредственной близости к дисперсным включениям низко модульной добавки.

Пример ССК с комбинированной гетероструктурой на основе сBN (марка «гетеронит») показан на рисунке 1.

Объемное содержание наполнителя, оптимизированное по критерию износостойкости получаемого гетероструктурного материала, составляет 55–65 об. %.



а)



б)

Рис. 1. ССК с комбинированной гетероструктурой на основе сBN:
а – высокопрочный наполнитель из поликристаллического сBN;

б – модель структуры (высокопрочные частицы cBN армируют керамическую матрицу на основе cBN (киборит))

ССК «гетеронит» показал себя, как высокоэффективный материал для оснащения режущих инструментов, применяемых при обработке в тяжелых условиях точения закаленных сталей, чугунов и жаропрочных износостойких покрытий. На рисунке 2 представлены результаты исследований влияния подачи на интенсивность изнашивания инструмента при точении напыленного самофлюсующегося покрытия ПГ-CP4 (57-60 НРС).

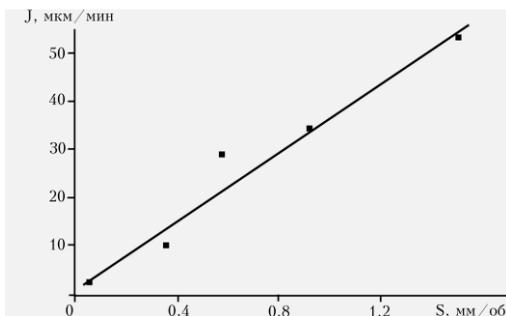


Рис. 2. Влияние величины подачи на интенсивность изнашивания инструмента, оснащенного ССК «гетеронит», при обработке плазменно-наплавленного покрытия ПГ-CP4

Оценка величины ломашей подачи для инструмента, оснащенного ССК «гетеронит», при обработке напыленного покрытия показала, что ее величина находится на уровне 1,5 мм/об., что открывает перспективы создания на основе этого керамического композита резбовых инструментов.

Составляющие ССК «борсинит» характеризуются следующими показателями: плотность матрицы $3,46 \pm 0,012$ г/см³, наполнителя $3,47 \pm 0,012$ г/см³; теплопроводность матрицы 100–180 Вт/(мК), наполнителя 250–500 Вт/(мК); твердость (нагрузка 4,91 Н) матрицы 28–35 ГПа, наполнителя 41–51 ГПа; коэффициент трещиностойкости матрицы 11–13 МН·м^{-3/2}, наполнителя 6,4–10,5 МН·м^{-3/2}; модуль Юнга матрицы 833 ± 12 ГПа, наполнителя 836 ± 36 ГПа.

Примером гетеромодульного ССК на основе cBN является керамика марки «борсинит» (рис. 3, 4).

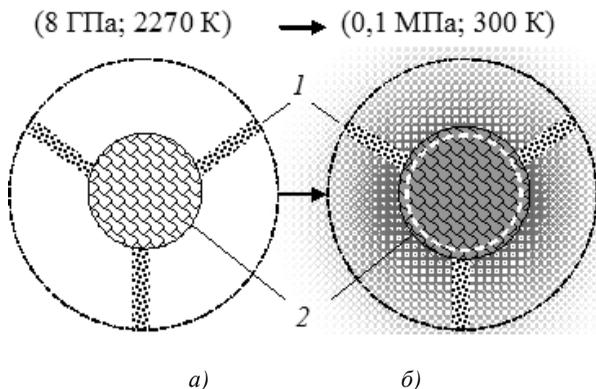
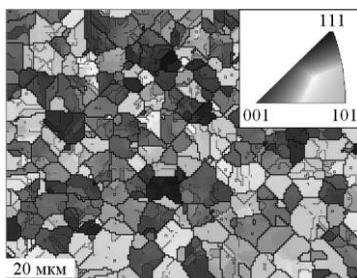
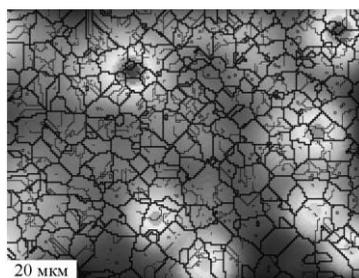


Рис. 3. Модель структуры ССК «борсинит» в условиях термобарического воздействия (а) и после него (б) (упруго-деформированное состояние вокруг включения иллюстрируется градиентной окраской): 1 – межзеренные границы в матрице cBN; 2 – включение Si_3N_4

В том варианте ССК повышение прочности и термостойкости инструментальной керамики достигается путем введения в шихту для спекания матрицы cBN включений Si_3N_4 . Предполагается, что остаточные напряжения в композите определяются главным образом не термо-, а бароупругостью, вследствие близости КТР компонентов. После охлаждения образца при уменьшении внешнего давления несоответствие коэффициентов сжимаемости cBN и Si_3N_4 приводит к появлению остаточных напряжений, локализованных вокруг низко модульных включений Si_3N_4 .



а)



б)

Рис. 4. Структура ССК «борсинит»: а – ориентация зерен в структуре композита; б – остаточные напряжения в структуре композита

Важной особенностью микроструктуры композита является наличие в нем хорошо сформированных межфазных границ cBN-Si₃N₄. Такие границы могут формироваться путем образования твердых растворов в результате взаимодействия контактирующих фаз. За возникновение прочной адгезионной связи между включениями β-Si₃N₄ и матрицей cBN, по-видимому, ответственно реакционное формирование межфазных границ, насыщенных элементами В, N, О, С и Si.

Структура спеченного композита «борсинит» изотропна, зерна в основном ориентированы хаотически с большими углами разориентации. Наблюдаются и малоугловые границы, очевидно формирующиеся в результате фрагментации отдельных зерен при деформации в условиях термобарического воздействия. Метод анализа картин дифракции обратнорассеянных электронов позволил выявить в композите и характер распределения остаточных напряжений, наличие которых, безусловно, связано с присутствием в матрице cBN сжатых включений низкомодульного β-Si₃N₄. Значительные пространственные области структуры композита, частично перекрываясь между собой, находятся упруго-деформированном состоянии. Области напряжений в объеме композита способны оказывать сильное влияние на зарождение, характер размножения и распространения и отклонение трещин, что приводит к рассеиванию энергии при разрушении материала.

Композит cBN-Si₃N₄ (3 масс. %), полученный при оптимальных параметрах *p*, *T*-воздействия, имеет плотность 3,465±0,005 г/см³. Измеренные значения упругих модулей составляют *E* = 860 ГПа, *G* = 366 ГПа; *B* = 440 ГПа, η = 0,175. Твердость по Виккерсу и трещиностойкость определены нагрузке 98 Н. Средние значения составили *HV* = 36,2±2,6 ГПа и *K_{1C}* = 11,7±1,5 МПа·м^{1/2}.

При создании гетеромодульных ССК на основе cBN для оснащения режущих инструментов, кроме механических характеристик, следует уделить внимание обеспечению химической стойкости композита, необходимой для реализации процесса обработки. Последнее особенно важно при обработке с высокой скоростью резания, при которой на контактных поверхностях инструмента имеет место средняя температура ~1200 °С.

На интенсивность изнашивания инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN, влияет химическое взаимодействие инструментального

материала с обрабатываемым, а также элементами окружающей среды, эффективно управлять которым можно за счет введения в состав композита соответствующего ингибитора, сдвигающего протекание реакций в более высокотемпературную область.

Для повышения работоспособности режущего инструмента, оснащенного ССК на основе сBN, в состав композита должны входить составляющие, которые под действием термобарических условий процесса обработки обеспечивают формирование в зоне резания среды с повышенным парциальным давлением азота. Взаимодействие этих составляющих с элементами обрабатываемого материала с выделением азота должно происходить при температурах более низких, чем температуры, характерные для взаимодействия с элементами обрабатываемого материала основы инструментального композита – сBN.

Эффективным ингибитором химического взаимодействия в зоне резания инструментом, оснащенный ССК на основе сBN, является нитрид кремния Si_3N_4 , который содержится в гетеромодульных ССК «борсинит».

Испытания работоспособности режущего инструмента, оснащенного режущими вставками из ССКа сBN- Si_3N_4 (рис. 5) проведены при наружном точении закаленных сталей в условиях ударного резания.

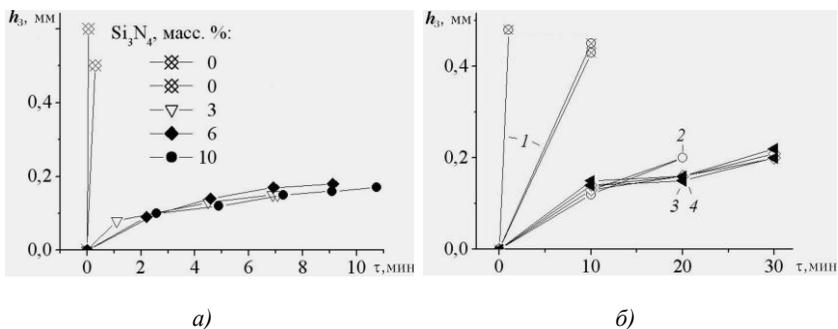


Рис. 5. Ширина фаски износа режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе сBN, по задней поверхности при прерывистом точении закаленной стали: а – ССК «борсинит», пластина RGN070300T, сталь ХВГ(60 HRC); $v = 80-90$ м/мин.;

$S = 0,1$ мм/об.; $t = 0,5$ мм; б – композиты сBN-Al (1 – KNB900, Keosera) и сBN- Si_3N_4 (2-4 – «борсинит», ИСМ НАН Украины), сталь 9XC (60-62 HRC); $v = 80-82$ м/мин.; $S = 0,2$ мм/об.; $t = 0,8-0,9$ мм; пластины: 1 – RGN120300T;

2 – RNGN070300T; 3 – RNGN090300T; 4 – RNGN120400T

Сравнение с инструментом, оснащенным материалом KBN900 на основе системы BN-Al (~3 масс. %), свидетельствует о существенном преимуществе резцов с композитом системы cBN-Si₃N₄ (3 масс. %) – у резцов с пластинами RNGN120400T из керамики KBN900 уже на первом проходе наблюдается значительный износ с характерными выкрашиваниями на задней поверхности, инструменты с пластинами из ССК «борсинит» показывают стабильную работу.

Еще одним эффективным вариантом управления химическим взаимодействием инструментального материала с обрабатываемым, а также элементами окружающей среды является введение ингибитора в покрытие на режущем инструменте, например, вакуум-плазменное. Таким ингибитором является нитрид ниобия NbN, а покрытие может наноситься как на инструменты, оснащенные ССК с комбинированной гетероструктурой, так и гетеромодульными ССК на основе cBN.

Применение в инструменте композита с Si₃N₄ и защитного покрытия на основе NbN способствует повышению работоспособности режущих инструментов при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов (рис. 6) за счет уменьшения интенсивности их изнашивания, что связано со снижением химического взаимодействия в зоне резания. Рост производительности обработки, обусловленный повышением скорости резания, составляет 25 (обработка закаленных сталей) – 60 % (точение никелевых сплавов).

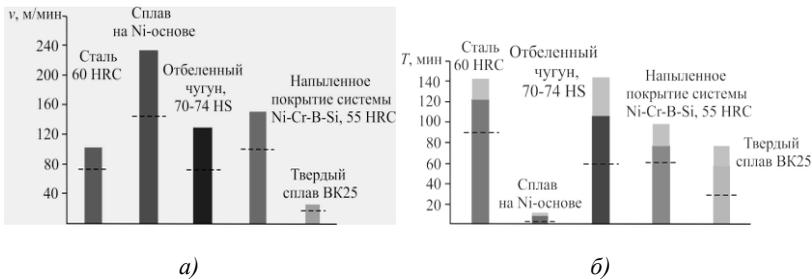


Рис. 6. Повышение скорости резания (а) и стойкости инструмента (б) за счет применения ССК «борсинит» (выше черты) и ССК «борсинит» с покрытием на основе NbN (ниже черты – эталонный композит cBN-AlN, AlB₁₂)

Реализация отмеченных тенденций связана с созданием ПСТМ инструментального назначения с повышенными механическими, теплофизическими и химическими свойствами, разработкой принципов управления процессами механического и физико-химии контактного взаимодействия инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды, созданием эффективных составов и технологий нанесения защитных покрытий и модифицирования поверхностного слоя композитов, разработка которых базируются на представлениях о закономерностях процесса резания инструментами, оснащенными ССК на основе cBN.

Выводы. Перспективными направлениями в создании и дальнейшем совершенствовании керамики на основе сверхтвердых структурированных композитов для оснащения режущих инструментов представляются следующие:

- создание гаммы материалов, для оснащения режущего инструмента, способных адаптироваться к условиям эксплуатационного нагружения в зоне обработки;
- разработка композитов с функционально-ориентированными свойствами участков, отвечающих различному эксплуатационному нагружению в режущем инструменте;
- разработка «интеллектуальных» материалов инструментального назначения, способных к самодиагностике.

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

Научные интересы:

- процессы обработки резанием;
- режущие инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами.

ПЕТРУША Игорь Андреевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- спекание керамических сверхтвердых материалов;
- физико-механические и химические свойства сверхтвердых композитов.

ОСИПОВ Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- спекание керамических сверхтвердых материалов;
- физико-механические и химические свойства сверхтвердых композитов.

НИКИШИНА Марина Владимировна – младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- спекание керамических сверхтвердых материалов;
- физико-механические и химические свойства сверхтвердых композитов.

КОПЕЙКИНА Марина Юрьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- процессы обработки резанием;
- режущие инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами.

ТКАЧ Василий Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- электронно-микроскопические исследования материалов;
- структура сверхтвердых композитов.

Статья поступила в редакцию 16.03.2012

Клименко С.А., Петруша І.А., Осіпов О.С., Нікішіна М.В., Копейкіна М.Ю., Ткач В.М. Створення і застосування інструментальної кераміки на основі надтвердих структурованих композитів

Клименко С.А., Петруша І.А., Осіпов А.С., Никишина М.В., Копейкіна М.Ю., Ткач В.Н. Создание и применение инструментальной керамики на основе сверхтвердых структурированных композитов

Klimenko S.A., Petrusha I.A., Osipov A.S., Nikishina M.V., Kopeykina M.Yu., Tkach V.N. The development and application of ceramic cutting tool based on the superhard structured composites.

УДК 621.921.34

The development and application of ceramic cutting tool based on the superhard structured composites / S.A. Klimenko, I.A. Petrusha, A.S. Osipov, M.V. Nikishina, M.Yu. Kopeykina, V.N. Tkach

The state-of-the-art of the development and improvement of superhard composites based on the cubic boron nitride have been considered. Such composites are used for the equipment of cutting tools for machining of materials with high mechanical properties.

УДК 621.921.34

Створення і застосування інструментальної кераміки на основі надтвердих структурованих композитів / С.А. Клименко, І.А. Петруша, О.С. Осіпов, М.В. Нікішіна, М.Ю. Копейкіна, В.М. Ткач

Розглянути сучасні підходи до створення і вдосконалення надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бора для оснащення різальних інструментів для обробки конструкційних матеріалів з високими механічними властивостями.