

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие / С. В. Лукинских; М-во науки и высш. обр. РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 168 с.
2. Водопьянов, В. И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие / А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев. – ВолгГТУ : Волгоград, 2012. – 136 с.
3. Кокорев, И. А. Курс деталей машин: учеб. пособие / И. А. Кокорев, В. Н. Горелов. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 287 с.
4. Кудрявцев, В. Н. Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. – Справочник. Издание 2-е, перераб. и доп. – М., 1966 – 536 с.

УДК 621.91

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

*Мартиновская О. В.<sup>1</sup>, Жорник В. И.<sup>2</sup>*

- 1) *Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь*
- 2) *Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Машиностроение в значительной степени определяет состояние научно-технического и производственного потенциала ведущих отраслей мировой экономики, стремление поддерживать предприятиями конкурентоспособность выпускаемой продукции стимулирует непрерывное развитие машиностроительной отрасли. С этой целью ведутся работы как над повышением работоспособности оборудования, его долговечности и безотказности, так и над снижением себестоимости производства, что напрямую зависит от экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов, затрачиваемых на выпуск продукции. Стремясь повысить конкурентоспособность машин, производители увеличивают скоростные и силовые возможности агрегатов, что неизбежно влечёт за собой ужесточение требований к прочности и надёжности составляющих их деталей и узлов. Увеличение ресурса наиболее ответственных элементов механизмов можно обеспечить за счёт разработки новых технологических процессов их изготовления, включая операции, позволяющие улучшить качество рабочих поверхностей деталей. С ростом требований к точности и качеству получаемых поверхностей более остро встают задачи совершенствования технологии чистовой и финишной обработки.

Работа над повышением эффективности производства также заставляет непрерывно улучшать существующие технологии и рассматривать новые способы обработки деталей. Особенно актуальным это становится, когда перед предприятием встаёт вопрос о необходимости перевооружения производства.

Серьёзное развитие получили методы формообразования, предполагающие получение заготовок, практически не требующих механической обработки. Однако, несмотря на это, именно механическая обработка является наиболее распространённой и всё ещё перспективной технологией, особенно незаменимой на этапе окончательного придания формы и качества ответственным поверхностям. По сравнению с другими существующими методами получения и обработки деталей (аддитивными, лазерными, термоэлектрическими, электрохимическими, ультразвуковыми и пр.), механическая обработка более универсальна, производительна, менее энергоёмка и легко поддаётся автоматизации [1]. Для повышения производительности механической обработки, наиболее перспективным направлением является оснащение производства оборудованием, позволяющим проводить высокоскоростную обработку с частотой вращения шпинделя 12000...40000 мин<sup>-1</sup> при скоростях резания до 3000...5000 м/мин.

Лезвийная обработка материала на всех стадиях технологического процесса была и остаётся наиболее оптимальной с точки зрения энергозатрат и производительности. К примеру, высокие требования к точности и качеству изготовления отдельных поверхностей валов традиционно заставляют предусматривать в технологическом процессе операции шлифования, и, не в последнюю очередь, это связано с инерционностью мышления. Однако высокая стоимость шлифовального оборудования и инструмента, продолжительность основного и вспомогательного времени шлифовальных операций делают этот вид обработки сравнительно дорогостоящим [2]. Что касается качества получаемых поверхностей, то высокие температуры в зоне резания при шлифовании могут приводить к изменению структуры, а значит и физико-механических свойств обработанной поверхности. При шлифовании закалённых сталей на поверхности возможно возникновение прижогов, микро- и макротрещин, шаржирование, царапин, вкраплений разрушившегося абразива [3, 4]. Все эти недостатки отсутствуют при использовании в качестве финишной обработки «твёрдого точения». При этом качество поверхности при использовании высокоскоростной обработки (ВСО) сравнимо с качеством поверхности после шлифования, а удельный объём стружки, снимаемый в единицу времени, увеличивается от трёх до пяти раз [1]. К тому же после точения в обработанном поверхностном слое возникают благоприятные сжимающие остаточные напряжения в отличие от вредных растягивающих, остающихся после шлифования.

За отказ от шлифования выступают такие аргументы, как необходимость использования СОЖ и утилизации образующегося шлама. СОЖ распыляется в воздухе, испаряется, присутствует в шлеме, чем оказывает негативное влияние как на окружающую среду, так и на дыхательную систему человека, его кожные покровы [5]. Применение «твёрдого точения» в большинстве случаев не требует использования СОЖ, а стружка после точения либо полностью сгорает в процессе резания, т. к. 80 % теплоты отводится в стружку, либо успешно подвергается вторичной переработке, что повышает экологическую безопасность производства.

Внедрение ВСО способствует высвобождению до 30 % станков, позволяет одновременно с сохранением точностных и прочностных характеристик деталей заменить шлифование лезвийной обработкой, благодаря чему сократить

номенклатуру используемого оборудования и уменьшить машинный парк предприятия. Затраты на оборудование, обслуживающий персонал и занимаемые площади снижаются. Однако при этом возникает необходимость перехода на современный режущий инструмент, материал и геометрия которого отвечали бы требованиям новых технологий и производств. Возрастают требования к ресурсу инструмента, главной задачей является увеличение его износостойкости и вибростойкости [6].

Существующие современные направления в развитии режущего инструмента и инструментальных систем значительно изменили рынок применяемых инструментальных материалов. На высокотехнологичных машиностроительных предприятиях за последние десятилетия соотношение используемых инструментальных материалов, применяемых для механической обработки, поменялось в пользу твёрдых сплавов, они занимают около 60 %, всех инструментальных материалов, вытеснив быстрорежущие стали. Также выросла доля инструментов, изготовленных из керамики и на основе сверхтвёрдых материалов (СТМ), их общая доля приближается к 15 %. Однако твердосплавный инструмент не решает проблемы замены шлифования использованием высокоскоростной обработки.



*Рисунок 1 – Пластины из твёрдого сплава, фрезы и резцы, оснащённые многогранными твёрдосплавными пластинами*

Из-за низкой химической стабильности между твердым сплавом и обрабатываемым материалом использовать твердосплавные пластины для «твёрдого точения» не рекомендуется [7]. Высокая скорость резания, повышение температуры в зоне контакта приводят к абразивно-окислительному изнашиванию, переходящему в диффузионную стадию, что резко снижает стойкость инструмента [6]. С целью увеличения стойкости твёрдых сплавов производители

предлагают широкий ассортимент инструментальных пластин, имеющих одно- и многослойные покрытия. Твердые сплавы без покрытия составляют весьма незначительную часть от всего ассортимента инструментальных материалов.

Мировой тенденцией в совершенствовании режущего инструмента, обеспечивающего ВСО материалов твёрдостью 45–62 HRC, является создание и применение уникальных материалов на основе СТМ, к которым относятся алмаз и кубический нитрид бора (сBN). Несмотря на то, что первые успешные опыты по синтезу СТМ проводились ещё в середине XX века, а в 80-е годы количество разработанных марок композитов было значительно, именно в последнее время всё больше предприятий-изготовителей обращаются к СТМ, используя их в качестве лезвийного инструмента. Причиной этого служит разработка и более широкое внедрение станков, обеспечивающих максимально эффективное использование инструмента из СТМ.

Кубический нитрид бора – искусственно синтезированный материал, приближающийся по своим характеристикам к алмазу, а по некоторым, в частности, по термостойкости, превосходящий его. Он состоит из атомов азота и бора, расположенных в такой же пространственной конфигурации, что и атомы углерода в алмазе. Важнейшие свойства сBN, определяющие интерес к нему как к инструментальному материалу:

- высокая твердость (от 3000 до 5000 HV);
- низкий коэффициент трения (от 0,1 до 0,3);
- высокая термостойкость (достигает 1200–1350 °C);
- высокая химическая стойкость (низкая интенсивность взаимодействия с элементами обрабатываемого материала Fe, Cr, Ni, Co, Ti, Mo, W);
- высокая стойкость к окислению (химически пассивный материал);
- высокая теплопроводность (близкая к 800 Вт/(м·К));
- высокая износостойкость композиционных материалов на его основе (в 30–50 раз больше, чем у твердых сплавов).

Уникальная комбинация свойств сBN позволяет использовать его в качестве режущего инструмента при обработке высоколегированных и закалённых сталей, чугунов, твердых сплавов, других труднообрабатываемых материалов и применять в условиях интенсивных истирающих воздействий. Термодинамические особенности полиморфизма нитрида бора обусловили создание большого количества материалов на основе его плотных модификаций с использованием различных технологий получения исходного материала.

Наибольшей твёрдостью обладают монокристаллы сBN, получаемые прямой перестройкой гексагональной кристаллической решётки в кубическую. Однако для лезвийного инструмента монокристаллы практически не используются в связи небольшими размерами и высокой стоимостью; они применяются в виде порошков для операций шлифования и полирования, а также в качестве сырья для получения поликристаллов. Поликристаллические сверхтвёрдые материалы (ПСТМ) в большинстве случаев получают спеканием мелкодисперсных порошков сBN и вюрцитного нитрида бора (wBN) в условиях термобарического воздействия либо методом фазового превращения гексагонального нитрида бора в кубический (графитоподобного в алмазоподобный), либо частичного или полного превращением wBN в сBN. Созданные материалы могут

содержать частицы СТМ как в связующей матрице, так и спеченные в поликристаллические блоки без добавок связующих веществ.

Пластинами из поликристаллов cBN оснащаются преимущественно резцы и фрезы, используемые в тяжёлых эксплуатационных условиях. Наиболее известные зарубежные компании, занимающиеся производством и реализацией инструментов на основе cBN, – Sandvik, TaeguTec, Seco, SCAR, Sumitomo, Tungaloy, Kyocera, Kennametal, Mitsubishi. Работы над совершенствованием существующих и созданием новых материалов на основе cBN продолжаются в научных лабораториях таких стран, как Беларусь, Россия, Украина, Япония, Швеция, Израиль и др.

Наиболее известными материалами, созданными на основе кубического или вюрциповодного нитрида бора, являются композиты: эльбор-Р (композит 01), белбор (композит 02), исмит (композит 03), КНБ (композит 05), ПНТБ (композит 09), гексанит-Р (композит 10), киборит (композит 11). Несмотря на разнообразие композитов, каждый материал имеет наилучшие характеристики эксплуатации для обработки конкретных материалов, при использовании определённых режимов и условий работы, и поэтому они не конкурируют друг с другом [8]. Если рассмотреть их состав, а именно наличие основной фазы, то можно убедиться, что именно она в определяющей степени влияет на их твёрдость.

Таблица 1 – Состав и твёрдость материалов на основе cBN

Материал	Количество cBN, %	Прочие фазы, %	Твёрдость по Кнупу, ГПа
композит 01	98	-	37
композит 05	75	25, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,8
композит 10	95	5, wBN	30
киборит-1	97	AlB <sub>12</sub> , AlN	34

Полученные ПСТМ различаются как размером, структурой и свойствами используемых зерен VN, так и применяемыми связующими материалами (металлы, карбиды, нитриды, карбонитриды, оксиды и др.) и их свойствами: видом, дисперсностью и химической активностью.

Работы по синтезу материалов на основе cBN направлены на расширение возможности применения СТМ, которое на данном этапе сдерживается его относительно высокой стоимостью, сложностью изготовления и узким диапазоном режимов резания, актуальных для конкретных пар материалов заготовка-инструмент. В зависимости от условий работы инструмента ставится задача оптимизировать у композита те или иные стойкостные характеристики, важные для эксплуатации в конкретных условиях. При черновой обработке, при обработке с ударами от материала режущего инструмента, требуется в большей мере трещиностойкость, которая обеспечивает уменьшение сколов режущей кромки. При финишной обработке на первое место выступает прогрессирующий износ по задней поверхности инструмента, поэтому задача стоит в увеличении твёрдости инструментального материала.

Для управления микроструктурой композита, с целью получения высокопрочных трещиностойких материалов, спекание порошков VN проводят с применением различных активирующих добавок. Используемое в аппаратах давле-

ние варьируется от 4 до 10 ГПа, а температура, необходимая для протекания процесса, находится в диапазоне 1300–2400 °С. Продолжительность протекания процесса спекания составляет 15–60 секунд и оказывает непосредственное влияние на размер зёрен частиц cBN.

Поиск альтернативных технологических решений, позволяющих повысить качество получаемых инструментальных материалов, привёл к созданию ряда новых материалов на основе кубического нитрида бора. На постсоветском пространстве наиболее известны исследования, проводившиеся в Объединённом институте машиностроения НАН Беларуси (г. Минск), в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению (г. Минск), Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (г. Киев). Созданы новые материалы, например, композиты систем «cBN – AlB<sub>12</sub>, AlN», «cBN – Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>» содержащие cBN ≈ 97 % (ИСМ, Украина); «cBN – wBN - AlB<sub>2</sub>/AlN» содержание cBN ≈ 80 %, «PcBN – Al» cBN ≈ 95 % (ОИМ НАН Беларуси) [9–11]. Материалы системы VN-Al-Ti исследовались в Ташкентском транспортном университете (Республика Узбекистан) [12].

В лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов Объединённого института машиностроения НАН Беларуси ведутся исследования в нескольких направлениях синтеза плотных форм VN. Одно из направлений – разновидность метода получения cBN с применением каталитически активных добавок, разработана технология синтеза ПСТМ на основе cBN из порошка гексагонального VN, модифицированного алюминием. В результате предварительной химико-термической обработки алюминий осаждается на поверхности частиц VN и в условиях высоких давлений и температур активирует фазовое превращение гексагонального VN в кубический. Полученный материал обладает достаточно высокими твердостью (35–38,5 ГПа) и трещиностойкостью (11,5–12,9 МПа·м<sup>1/2</sup>) и перспективен для чистовой лезвийной обработки.

Другой разработкой Объединённого института машиностроения НАН Беларуси является метод спекания под давлением субмикророшков cBN каталитического синтеза размерами 0,3–0,5 мкм, а также wBN взрывного синтеза с размерами частиц в пределах 0,3–5 мкм. С целью образования на зёрнах порошков cBN и wBN диффузионного покрытия, а также удаления с их поверхности влаги и кислородсодержащих соединений порошок cBN перед спеканием подвергают высокотемпературному отжигу в парах галогенидов тугоплавких металлов (W, Ti) и алюминия. Полученные поликристаллы состоят из зерен размерами преимущественно 0,5–0,8 мкм, самыми крупными являются зёрна cBN 1 мкм. Полученные по разработанной методике материалы имеют более низкую пористость и более высокую механическую прочность в сравнении с поликристаллами, синтезированными из порошков без специального покрытия [9, 13]. Материал предназначен для чистовой обработки закаленных сталей и износостойких покрытий.

Наличие экспериментального отечественного производства сверхтвёрдых инструментальных материалов на основе cBN является стимулом для развития инновационных высокопроизводительных технологических процессов механической обработки, способствующих дальнейшему развитию машиностроительной промышленности РБ. Новые синтезированные материалы на основе cBN,

требуют детального исследования и определения оптимальных условий их применения, разработки рекомендаций по рациональным режимам резания, определения перспективных направлений создания режущих инструментов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корнеев, В. М. Повышение качества изделий на этапе процесса механической обработки, В. М. Корнеева, С. С. Корнеев / Журнал «Технология машиностроения». – № 10. – 2014. – С. 16–20.

2. Солоненко, В. Г. Резание металлов и режущие инструменты: уч. пособие / М. : В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. Высшая школа, 2008. – 414 с.

3. Рогов, В. А. Высокоскоростная обработка закалённых заготовок / В. А. Рогов. – Журнал Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 16–19.

4. Зубарь, В. П. Лезвийная обработка закалённых сталей и чугунов взамен шлифования [Электронный ресурс] / В. П. Зубарь, А. Г. Тимчук, М. В. Чопенко. – Режим доступа: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/20359/1/STvMS\\_2010\\_5\\_Zubar\\_Lezviynaya.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/20359/1/STvMS_2010_5_Zubar_Lezviynaya.pdf).

5. Васильева, Н. В. Применение режущих инструментов из синтетических сверхтвёрдых материалов для повышения экологичности и качества механической обработки / Н. В. Васильева // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. – Пермь : Зebra, 2015. – С. 91–94.

6. Шелег, В. К. Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров. // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.

7. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 278 с.

8. Грубый С. В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора С. В. Грубый., В. В. Лапшин. – М. : ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – С. 61–74.

9. Синтез и применение наноструктурных сверхтвёрдых материалов инструментального назначения, П. А. Витязь, В. Т. Сенють. – Минск : Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – 2015. – № 3: серія «Фізіка-тэхнічных навук». – С.60–76.

10. Клименко, С. А. Технологические возможности инструментов оснащённых композитами на основе кубического нитрида бора, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Журнал «Сучасні технології в машинобудуванні». – 2017. – вип. 12. – С. 54–60.

11. Получение сверхтвёрдого композита на основе cBN с повышенной трещиностойкостью конверсионным спеканием под высоким давлением Урбанович В. С. [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы Международной научной конференции. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 378–380.

12. Режущий композиционный инструментальный материал на основе связи соединения системы B-N-Ti-AL для чистовой обточки железнодорожных деталей / Ш. З. Файзиев [и др.] // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. – № 3 (84).

13. Витязь П.А. Спекание наноструктурных композитов на основе детонационных алмазов и плотных фаз VN, П. А. Витязь [и др.] // Процеси механічної обробки в машинобудуванні выпуск: сб. науч. тр. – Житомир : ЖГТУ, 2012. – Вып. 13. – С. 40–52.