

УДК 621.91

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 45 ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ cBN, МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ

В. И. Жорник¹, М. В. Нерода², О. В. Мартиновская³

¹ Д. т. н., профессор, заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвёрдых материалов ГНУ «Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

² К. т. н., доцент, проректор по учебной работе, доцент кафедры машиноведения УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nerodamv@mail.ru

³ Старший преподаватель кафедры машиноведения УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: qsha@mail.ru

Реферат

В данной статье рассматривается получение точных поверхностей, перспективы использования тонкого точения материалами на основе кубического нитрида бора. Проведённые исследования позволяют установить оптимальные режимы обработки поверхностно упрочнённых сталей новым композитом на основе кубического нитрида бора, модифицированного алюминием, обеспечивающие качество поверхности и наилучшую стойкость режущего инструмента.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, поликристаллические сверхтвёрдые материалы, упрочнённые стали, режимы обработки, шероховатость, стойкость режущего инструмента.

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF HIGH-SPEED PROCESSING OF HARDENED STEEL 45 WITH ALUMINIUM MODIFIED cBN COMPOSITE TOOLS

V. I. Zhornik, M. V. Neroda, O. V. Martinovskaya

Abstract

This article discusses the production of precise surfaces and the prospects for using fine turning materials based on cubic boron nitride. The conducted research allows us to establish optimal processing conditions for surface-hardened steels with a new composite based on cubic boron nitride modified with aluminum, ensuring surface quality and the best durability of the cutting tool.

Keywords: high-speed processing, polycrystalline superhard materials, hardened steels, processing modes, roughness, durability of cutting tools.

Введение

В современном машиностроении большое внимание отводится вопросам долговечности и безотказности оборудования, а также снижению затрат на производство продукции, что напрямую зависит от экономии трудовых, материальных и энергетических ресурсов. Современные тенденции в развитии механической обработки состоят в увеличении скорости резания и динамической нагруженности, что возможно при ужесточении требований к прочности и жесткости узлов металлорежущего оборудования и инструмента. Повышение требований к точности и качеству получаемых поверхностей обуславливает использования современных технологий чистовой и финишной обработки.

Перед предприятиями, проводящими перевооружение производства, встаёт вопрос о выборе современного оборудования, позволяющего использовать новые технологии, в частности высокоскоростной обработки. Сегодня разработаны и внедряются методы формообразования, предполагающие получение заготовок, практически не требующих механической обработки. Однако механическая обработка всё ещё является наиболее распространённой и перспективной технологией, незаменимой на этапе последней операции для ответственных поверхностей. По сравнению с другими существующими методами получения и обработки деталей (аддитивными, лазерными, термоэлектрическими, электрохимическими, ультразвуковыми и др.), механическая обработка более универсальна, производительна, менее энергоёмка и легко поддается автоматизации [1]. Повышению производительности механической обработки способствует оснащение производства оборудованием, позволяющим проводить высокоскоростную обработку с частотой вращения шпинделя от 12000 до 40000 мин⁻¹ при скоростях резания до 3000...5000 м/мин.

Лезвийная обработка остаётся наиболее оптимальной в соотношении энергозатрат и производительности. В сравнении с ней шлифование – более дорогостоящая операция, что обусловлено высокой стоимостью шлифовального оборудования и инструмента,

продолжительностью основного и вспомогательного времени шлифовальных операций [2]. При этом качество получаемых поверхностей имеет ряд недостатков: вследствие высоких температур в зоне шлифования возможно изменение структуры, следовательно, и физико-механических свойств обработанной поверхности. При шлифовании закалённых сталей на поверхности возможно возникновение прижогов, микро- и макротрещин, царапин, вкраплений разрушившегося абразива и др. [3]. При шлифовании длинных поверхностей происходит интенсивное изнашивание шлифовального круга, что приводит к возникновению отклонений обработанной поверхности от цилиндричности. Эти недостатки отсутствуют при использовании «твёрдого точения» в качестве финишной обработки, а удельный объём стружки, снимаемый в единицу времени, увеличивается в несколько раз [1]. Ещё одним аргументом в пользу точения является появление сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, в отличие от вредных, растягивающих, остающихся после шлифования.

Применение «твёрдого точения» повышает экологическую безопасность производства, так как в большинстве случаев не требует использования СОЖ, а стружка после точения либо полностью сгорает в процессе резания, так как 80 % теплоты отводится в стружку, либо может успешно подвергаться вторичной переработке.

Внедрение высокоскоростной обработки (ВСО) способствует высвобождению до 30 % станков, позволяет одновременно с обеспечением точностных и прочностных характеристик деталей заменить шлифование лезвийной обработкой, следовательно, сократить номенклатуру используемого оборудования предприятия, а также снизить затраты не только на оборудование и оснастку, но и на обслуживающий персонал. Однако ВСО требует перехода на современный режущий инструмент, материал и геометрия которого отвечали бы требованиям новых технологий. Одним из важнейших вопросов становится увеличение ресурса инструмента, повышение его износостойкости и вибростойкости [4].

Материалы и методы исследования

Современные направления развития режущего инструмента и инструментальных систем серьёзно изменили рынок применяемых инструментальных материалов. Анализ продаж инструмента для машиностроительных предприятий за последние десятилетия показал, что доля твёрдых сплавов составляет 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 из-за относительно низкой химической стабильности использовать твердосплавные пластины для «твёрдого точения» не рекомендуется [5]. Высокая скорость резания приводит к повышению температуры в зоне контакта и абразивно-окислительному изнашиванию, переходящему в стадию диффузионного-адгезионного взаимодействия материалов инструмента и обрабатываемой детали, что резко снижает стойкость инструмента.

Наиболее перспективные работы по совершенствованию режущего инструмента для ВСО материалов твёрдостью 45–62 HRC связаны с созданием и применением материалов на основе СТМ, а именно алмаза и кубического нитрида бора.

Кубический нитрид бора (сBN) – искусственно синтезированный материал, приближающийся по своим характеристикам к алмазу, а по термостойкости превосходящий его. 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 (до 1200–1350 °С), высокая химическая стойкость и стойкость к окислению и др.

Уникальная комбинация свойств сBN позволяет использовать его при обработке высоколегированных и закалённых сталей, чугунов, твердых сплавов и применять в условиях интенсивных истирающих воздействий. Термодинамические особенности полиморфизма нитрида бора позволяют создавать широкую номенклатуру материалов на основе его плотных модификаций, используя различные технологии получения исходного материала.

Поликристаллические сверхтвёрдые материалы (ПСТМ) в большинстве случаев получают спеканием мелкодисперсных порошков сBN и вюрцитного нитрида бора (wBN) в условиях термобарического воздействия, применяется также метод фазового превращения гексагонального нитрида бора в кубический (графитоподобного в алмазоподобный) либо частичного или полного превращением wBN в сBN. PSTM содержат частицы кубического нитрида бора либо в связующей матрице, либо спеченные в поликристаллические блоки без добавок связующих веществ. Созданные PSTM различаются размером, структурой и свойствами используемых зерен BN, применяемыми связующими материалами (металлы, карбиды, нитриды, карбонитриды, оксиды), а также параметрами структуры (дисперсность зерен) и их свойствами (твердость, трещиностойкость, химическая активность).

Поликристаллическими пластинами из сBN оснащаются режущий инструмент, применяемый для работы в тяжёлых эксплуатационных условиях. Наиболее известные зарубежные компании, зани-

мающиеся производством и реализацией инструментов на основе сBN – Kennametal, Kyocera, Mitsubishi, Sandvik, Seco, SCAR, Sumitomo, TaeguTec, Tungaloy. Работа над совершенствованием существующих и созданием новых материалов на основе сBN продолжается в лабораториях таких стран, как Беларусь, Россия, Украина, Япония, Швеция, Израиль и др.

Несмотря на разнообразие композитов, они не конкурируют друг с другом, каждый материал имеет свою нишу использования, оправданное эффективное применение при обработке определённых материалов и использовании конкретных режимов и условий работы [6].

Современные работы по синтезу материалов на основе сBN направлены на расширение возможности применения СТМ в зависимости от условий работы инструмента, оптимизации стойкостных характеристик эксплуатации в заданных условиях. При финишной обработке на первое место выступает износ по задней поверхности инструмента, поэтому задача стоит в увеличении твёрдости инструментального материала. Черновая обработка и обработка с ударами требует от материала режущего инструмента повышенной трещиностойкости, обеспечивающей уменьшение сколов режущей кромки.

На постсоветском пространстве работы по созданию новых материалов на основе кубического нитрида бора велись в Объединённом институте машиностроения НАН Беларуси (ОИМ НАН Беларуси), в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению, Институте сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины [7–9].

В лаборатории наноструктурных и сверхтвёрдых материалов ОИМ НАН Беларуси проведены исследования в направлении синтеза плотных форм BN с применением каталитически активных добавок из порошка гексагонального BN, модифицированного алюминием. В результате осаждения на поверхности частиц BN алюминия в условиях высоких давлений и температур активируется фазовое превращение гексагонального BN в кубический. Полученный материал обладает твердостью (35–38,5 ГПа) и трещиностойкостью (11,5–12,9 МПа·м^{1/2}), имеет более низкую пористость и более высокую механическую прочность по сравнению с поликристаллами, синтезированными другими методами, и в перспективе может использоваться для чистовой лезвийной обработки закалённых сталей и износостойких покрытий [7, 10].

Задачей проводимых на кафедре машиноведения БрГТУ исследований является изучение режущих свойств вставок из сверхтвёрдых материалов сBN–wBN–AlB₂/AlN и сBN–Al, изготовленных ОИМ НАН Беларуси (рисунок 1), определение возможности их использования взамен шлифования, применяемого при обработке штоков гидроцилиндров, изготовленных из стали 45 после закалки ТВЧ до 50 и 60 HRC. Основными требованиями к поверхности, кроме твёрдости поверхностного слоя, являются шероховатость, точность обработки по 9 качеству и прямолинейность обрабатываемой поверхности 0,1 мм по всей длине штока. Так, шероховатость, получаемая после первого прохода шлифовального круга, соответствует Ra = 0,63.

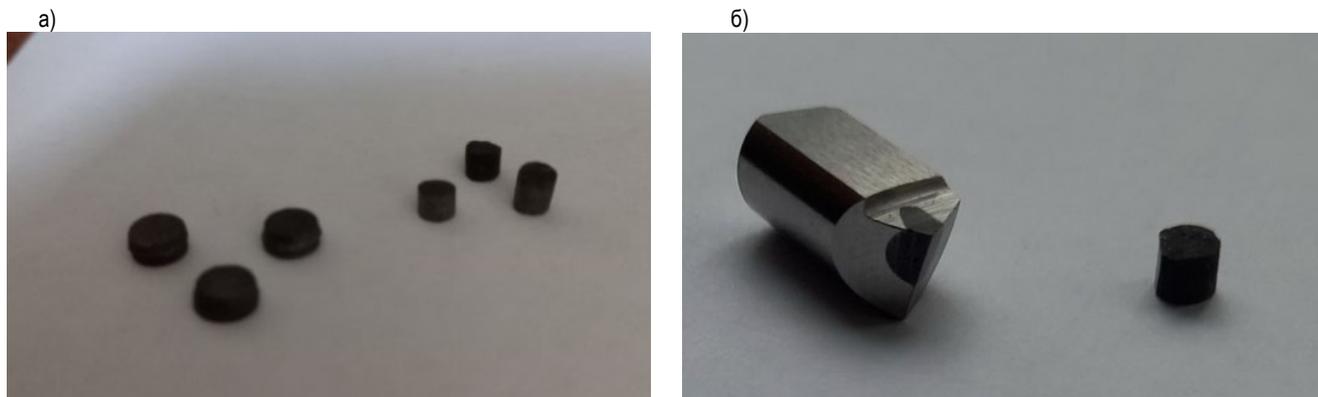


Рисунок 1 – а) пластины из сBN–А и сBN–wBN–AlB₂/AlN изготовленные в ОИМ НАН Беларуси; б) вставка для реза с впрессованной пластинкой из сBN–wBN–AlB₂/AlN

Экспериментальные исследования проводились с целью выявления влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности и стойкость инструмента. Использовался токарно-винторезный станок Optimum D460x1000 DPA, относящийся к средним станкам, отличающимся повышенной плавностью хода и отсутствием вибраций. Измеренное радиальное биение шпинделя составляет 0,005 мм, что соответствует требованиям к «твёрдому точению». На рисунке 2 представлены инструмент для токарной обработки, оснащенный вставками из ПСТМ и процесса тонкого точения закаленных образцов из стали 45.

При работе лезвийным инструментом с большой скоростью и малой глубиной резания в точке касания наблюдается локальное взаимодействие, не развивающееся в объеме детали и инструмента, благодаря этому не происходят серьезные изменения в обработанном слое. Большая часть тепла концентрируется в стружке, не успевая перейти в заготовку. На глубине 10 мкм она не превышает 100 °С [3], тем самым не допускается самоотпуск поверхности, и структура поверхностного слоя не изменяется.



а – прямые проходные резцы со вставками из ПСТМ; б – процесс тонкого точения образца из закалённой стали 45

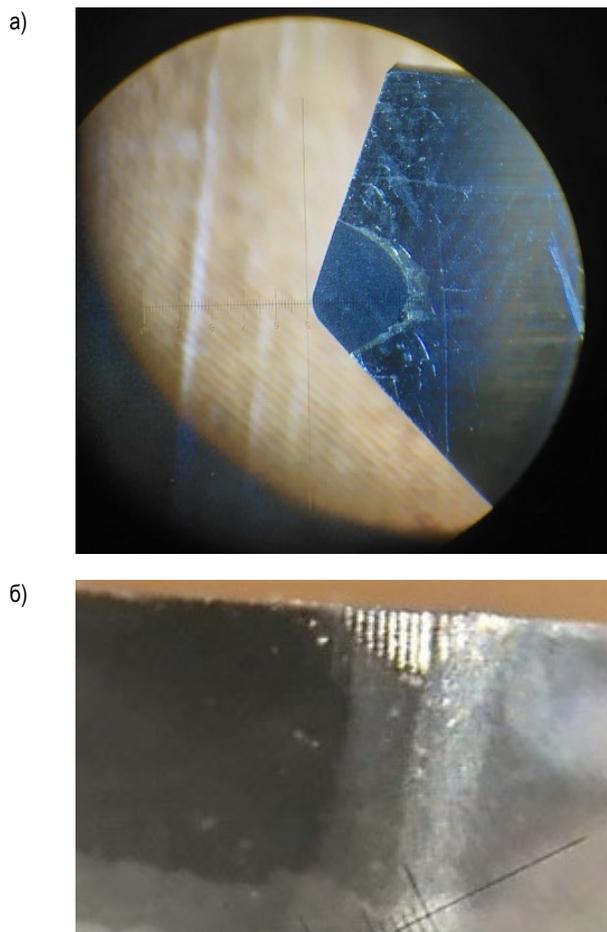
Рисунок 2 – Иллюстрация проведения экспериментальных исследований

Анализ литературных источников показал, что геометрия режущей части вставок из материалов на основе cBN, для работы на больших скоростях, должна обеспечивать прочность и вершины, и режущих кромок резца. Для обработки упрочнённых сталей рекомендуется переднему углу придать отрицательное значение от -5° до -10° , сопряжение между главной и вспомогательной режущими кромками выполнять с радиусом 0,1...0,6 мм, а задний угол выполнить $8...12^\circ$. Для увеличения прочности вершины резца углы в плане рекомендуется принимать 45° и 20° [11].

В данном случае инструмент для испытаний представляет собой прямой проходной резец со вставкой из cBN-Al, закреплённой на державке с помощью пайки и с механическим креплением вставки из cBN-wBN-AlB₂/AlN. Рабочая поверхность заточена по переднему углу $\gamma = -5^\circ$; заднему $-\alpha = 10^\circ$, углы в плане выполнены $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 15^\circ$. Радиус при вершине был выбран на основании предварительных испытаний, которые показали, что лучшие показатели шероховатости обеспечиваются при приработке вершины до $r = 0,6$ мм (рисунок 3).

Одной из важнейших характеристик режущего инструмента, влияющих на его эффективное использование, является стойкость режущей кромки. Повышение стойкости способствует снижению расходов на инструмент, затрат на его переточку, а также сокращает время простоя дорогостоящего станочного оборудования. При правильном подборе режимов обработки обеспечивается требуемое качество обработанной поверхности, высокая производительность, стойкость инструмента и, следовательно, повышается эффективность производства в целом [5].

Испытания проводились с целью исследования стойкости резцов с учётом режимов резания и геометрических параметров инструмента, полученных в предварительных экспериментах. В качестве заготовок использовались цилиндрические штоки из стали 45 длиной 300 мм, с твёрдостью поверхностного слоя HRC 55–60. Токарная обработка проводилась при постоянной скорости резания. После каждого опыта проводили контроль шероховатости обработанной поверхности профилометром TR200 компании Time Group Inc, внесённый в Государственный реестр средств измерений РФ; периодически контролировали величину износа резца по задней поверхности при помощи отсчётного микроскопа МПБ-3 с ценой деления 0,05 мм.

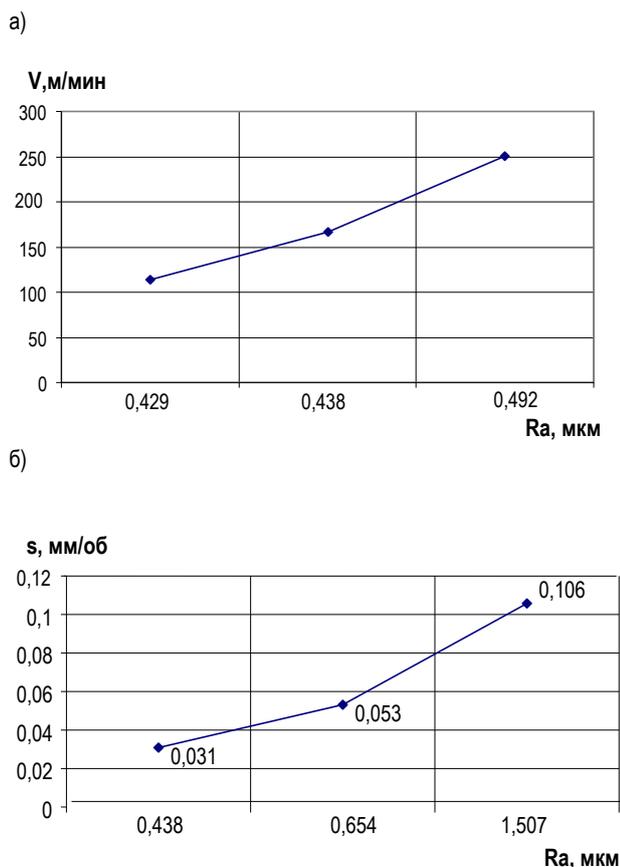


а) резец с напайной пластиной из композита cBN-Al;
б) износ пластины по передней поверхности
Рисунок 3 – Режущий инструмент для экспериментальных исследований

Критериями оценки стойкости инструмента были выбраны износ по задней поверхности инструмента $h_3 = 0,25$ мм и шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,7$ мкм. Износ по задней поверхности является наиболее распространённым показателем стойкости инструмента. Превысив оптимально установленные значения износа, инструмент некоторое время может быть использован, но при строгом контроле за качеством обработанной поверхности. Ещё одной причиной соблюдения допустимых величин износа является опасность резкого разрушения режущей кромки и поверхностей инструмента, ускорение процесса его затупления. По рекомендациям [13], для пластин из сверхтвёрдых материалов критерием затупления вставок является нормальный износ по задней поверхности 0,4 мм, согласно этому мы можем расширить диапазон экспериментирования, если шероховатость обработанной поверхности будет удовлетворять допустимому значению.

Результаты исследований и их обсуждение

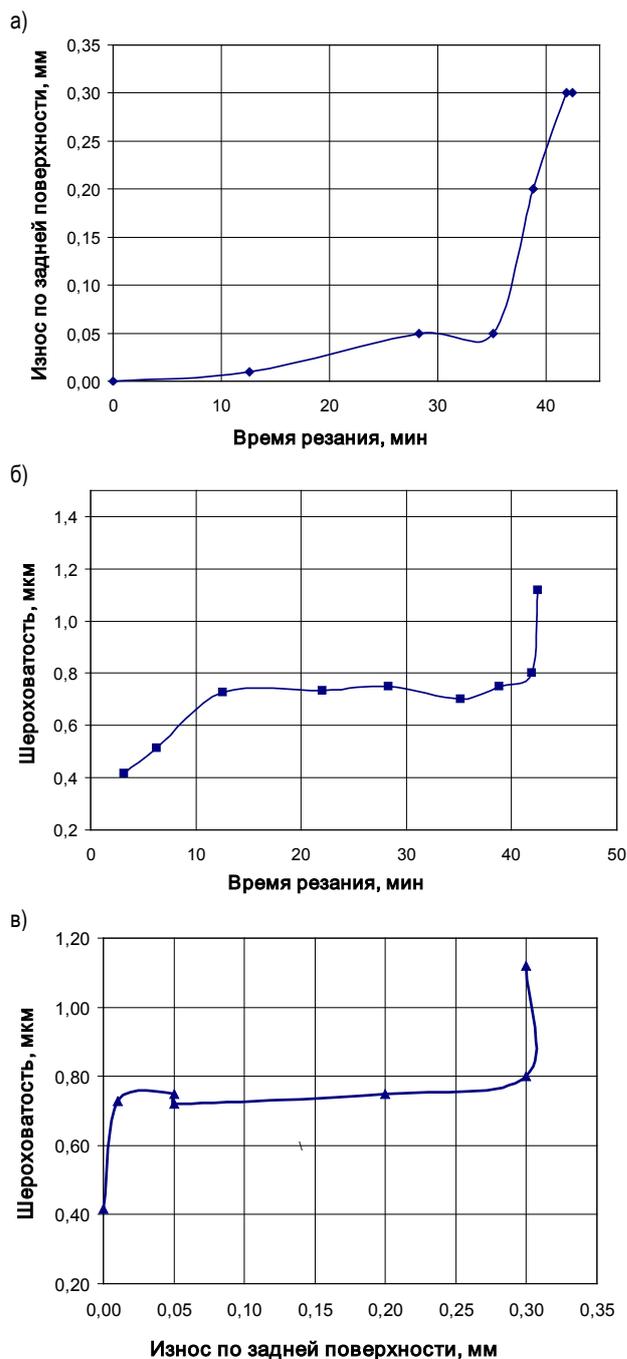
Для установления требуемого диапазона исследования режимов токарной обработки и выявления их влияния на изменение параметров шероховатости поверхности были проведены предварительные эксперименты, которые показали, что при увеличении подачи и скорости резания шероховатость увеличивается, а изменение глубины резания в пределах $t = 0,025...0,15$ мм, практически не сказывается на величине шероховатости. Выбор диапазона изменения параметров проведён в соответствии с научными публикациями [8, 6, 12] и согласно рекомендациям инструментальных фирм Seco и Sandvik. Диапазон подач изменяли в пределах $S = 0,031...0,106$ мм/об, скорость резания – $V = 114...251$ м/мин, глубину резания – $t = 0,025...0,075$ мм. На рисунке 4 показаны зависимости параметра шероховатости Ra обработанной поверхности от скорости резания и подачи при постоянной глубине резания 0,05 мм.



а) от скорости резания, при постоянных $t = 0,05$ мм, $s = 0,031$ мм/об;
 б) от подачи при постоянных $t = 0,05$ мм, $V = 167$ м/мин

Рисунок 4 – Зависимости шероховатости обработанной поверхности

В процессе проведённых экспериментов были получены зависимости величины износа резцов из композита cBN–Al и изменение параметра шероховатости обработанной поверхности Ra от продолжительности обработки. Экспериментальные данные представлены на рисунке 5. Их анализ свидетельствует об относительно стабильных режущих свойствах изучаемого материала. На рисунке 5а видно, что режущие свойства резца сохраняются при величине износа по задней поверхности 0,3 мм и его стойкость при этом составляет 42 мин, после этого режущие свойства инструмента резко снижаются. Интенсивное изнашивание пластины начинается после 36 мин обработки. При достижении величины износа 0,3 мм параметр шероховатости резко возрастает, достигая величин более $Ra = 1,1$ мкм (рисунок 5в). После этого обработку прекращали.



а) шероховатости обработанной поверхности от времени обработки;
 б) износа инструмента от времени работы резца;

в) шероховатости обработанной поверхности от износа инструмента по задней поверхности

Рисунок 5 – Зависимости

Зависимость, представленная на рисунке 5б, характеризует изменение параметра шероховатости от момента приработки инструмента до потери им допустимой режущей способности. После 10 мин резания шероховатость стабилизировалась на отметке $Ra = 0,7$ мкм и сохранялась на протяжении последующих 30 мин точения. Путь, пройденный вершиной реза за время достижения величины износа по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм, в среднем составил $L = 7175$ м.

Выводы

Стойкость режущего инструмента с напайной пластинкой из композита cBN–Al в среднем составляет $T = 42$ мин, что сопоставимо с рекомендациями ГОСТ [13], согласно которому нормативная стойкость пластин из композита 10, при скорости точения $V = 75$ м/мин, работающего в аналогичных условиях – $T = 58$ мин (что соответствует пути резания $L = 4350$ м). Сопоставив величины пути резания, можно констатировать, что производительность композита на основе cBN–Al выше производительности композита 10 в 1,65 раза.

В дальнейшем, в основе разработанной методики планируется получить исходные данные для разработки модели изнашивания материалов cBN–wBN–AlB₂/AlN и cBN–Al, используемых в качестве вставок лезвийных инструментов для «твёрдого точения», и оценить степень эффективности от замены операции шлифования длинных валов тонким точением инструментом, оснащённым вставками из вышеуказанных материалов.

Поставлена задача, на базе полученных экспериментальных данных, используя обобщающие эмпирические уравнения расчёта параметров обработки закалённых сталей резцами из нитрида бора, определить оптимальное соотношение стойкости материала с режимами работы при заданной шероховатости применительно к материалам систем cBN–Al и cBN–wBN–AlB₂/AlN.

Список цитированных источников

1. Корнеева, В. М. Повышение качества изделий на этапе процесса механической обработки / В. М. Корнеева, С. С. Корнеев // Технология машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 16–20.
2. Солоненко, В. Г. Резание металлов и режущие инструменты : учеб. пособие / В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. – М. : Высшая школа, 2008. – 414 с.
3. 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. – Дата доступа: 10.04.2024.
4. 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.
5. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
6. Грубый, С. В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора / С. В. Грубый, В. В. Лапшин // Наука и образование. – 2012. – № 6. – С. 61–74.
7. Витязь, П. А. Синтез и применение наноструктурных сверхтвёрдых материалов инструментального назначения / П. А. Витязь, В. Т. Сенють // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2015. – № 3. – С. 60–76.
8. Клименко, С. А. Технологические возможности инструментов оснащённых композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2017. – Вип. 12. – С. 54–60.
9. Получение сверхтвёрдого композита на основе cBN с повышенной трещиностойкостью конверсионным спеканием под высоким давлением / В. С. Урбанович [и др.] // Актуальные проблемы прочности : материалы междунар. науч. конф. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 378–380.
10. Спекание наноструктурных композитов на основе детонационных алмазов и плотных фаз BN / П. А. Витязь [и др.] // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2012. – № 13. – С. 1–13.
11. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н. В. Новикова. – М. : Машиностроение, 2005. – 555 с.
12. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 463 с.
13. Вставки перетачиваемые для сборного инструмента, оснащенные сверхтвёрдым материалом (композитом). Технические условия : ГОСТ Р 50302-92 / Госстандарт России. – М., 1992. – 16 с.

References

1. Korneeva, V. M. Povyshenie kachestva izdelij na etape processa mekhanicheskoy obrabotki / V. M. Korneeva, S. S. Korneev // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2014. – № 10. – S. 16–20.
2. Solonenko, V. G. Rezanie metallov i rezhushchie instrumenty : ucheb. posobie / V. G. Solonenko, A. A. Ryzhkin. – M. : Vysshaya shkola, 2008. – 414 s.
3. Zubar', V. P. Lezviynaya obrabotka zakalyonnyh stalej i chugunov vzamen shlifovaniya [Elektronnyj resurs] / V. P. Zubar', A. G. Timchuk, M. V. Chopenko. – Rezhim dostupa: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/20359/1/STvMS_2010_5_Zubar_Lezviynaya.pdf. – Data dostupa: 10.04.2024.
4. Sheleg, V. K. Analiz i vybor racional'nyh rezhimov rezaniya tverdospлавным инструментом при точении валов / V. K. Sheleg, D. G. Shaturov, G. F. Shaturov // Nauka i tekhnika. – 2018. – T. 17, № 1. – S. 14–20.
5. Makarov, A. D. Optimizaciya processov rezaniya / A. D. Makarov. – M. : Mashinostroenie, 1976. – 278 s.
6. Grubyy, S. V. Issledovanie rezhushchih svojstv rezcov iz nitrida bora / S. V. Grubyy, V. V. Lapshin // Nauka i obrazovanie. – 2012. – № 6. – S. 61–74.
7. Vityaz', P. A. Sintez i primeneniye nanostrukturnyh sverhtvyordyh materialov instrumental'nogo naznacheniya / P. A. Vityaz', V. T. Senyut' // Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk. – 2015. – № 3. – S. 60–76.
8. Klimenko, S. A. Tekhnologicheskie vozmozhnosti instrumentov osnashchyonnyh kompozitami na osnove kubicheskogo nitrida bora / S. A. Klimenko, M. YU. Kopejkina, A. O. Chumak // Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni. – 2017. – Vip. 12. – S. 54–60.
9. Poluchenie sverhtvyordogo kompozita na osnove cBN s povyshennoj treshchinostojkost'yu konvercionnym spekaniiem pod vysokim davleniem / V. S. Urbanovich [i dr.] // Aktual'nye problemy prochnosti : materialy mezhdunar. nauch. konf. – Minsk : UP «IVC Minfina», 2022. – S. 378–380.
10. Spekanie nanostrukturnyh kompozitov na osnove detonacionnyhalmazov i plotnyh faz BN / P. A. Vityaz' [i dr.] // Prosesi mekhanichnoї obrobki v mashinobuduvanni. – 2012. – № 13. – S. 1–13.
11. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / pod red. N. V. Novikova. – M. : Mashinostroenie, 2005. – 555 s.
12. Obrabotka i uprochnenie poverhnostej pri izgotovlenii i vosstanovlenii detalej / V. I. Borodavko [i dr.] ; pod obshch. red. M. L. Hejfeца, S. A. Klimenko. – Minsk : Belarus. navuka, 2013. – 463 s.
13. Vstavki peretachivaemye dlya sbornogo instrumenta, osnashchennye sverhtverdyim materialom (kompozitom). Tekhnicheskie usloviya : GOST R 50302-92 / Gosstandart Rossii. – M., 1992. – 16 s.

Материал поступил 22.04.2024, одобрен 22.05.2024, принят к публикации 22.05.2024