

УДК 621.923

DOI 10.17513/snt.40275

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРОДУКТОВ ИЗНОСА ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Носенко В.А., Кузнецов С.П., Сердюков Н.Д., Захаров А.С.

ФГБОУ ВО «Волжский политехнический институт» (филиал)

Волгоградский государственный технический университет,

Волжский, email: [semen1894@yandex.ru](mailto:semen1894@yandex.ru)

Целью исследования является изучение закономерностей переноса продуктов износа кубического нитрида бора при шлифовании. Шлифование и царапание осуществляли на станке с числовым программным управлением *CHEVALIER Smart-B1224III*, профилограммы царапин получены профилометром *SurfTest SJ-410*, морфологию поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе *Versa 3D LoVac*. Проведенные опыты по царапанию титана единичным зерном кубического нитрида бора свидетельствуют о причинно-следственной связи между шаржированием и самозатачиванием: в результате микроскалывания абразивного материала происходит самозатачивание зерна, образовавшиеся при этом продукты износа внедряются в обработанную поверхность. В результате анализа пикселей цифровых полутоновых изображений продуктов износа определен порог бинаризации, при помощи которого произведено выделение и измерение продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность после шлифования титана. В качестве параметров интенсивности шаржирования приняты суммарная относительная площадь и количество шаржирующих частиц, установлено, что эти параметры подчиняются логнормальному закону распределения, определена функциональная связь между этими параметрами. Закономерности шаржирования титана продуктами износа абразивного материала из кубического нитрида бора согласуются с закономерностями шаржирования кругами из традиционных абразивных материалов. Наибольшая интенсивность шаржирования наблюдается на начальном этапе обработки.

**Ключевые слова:** шлифование, перенос материала, кубический нитрид бора, титан, самозатачивание

*Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 45/649-24.*

## INVESTIGATION OF THE TRANSFER OF WEAR PRODUCTS DURING GRINDING WITH CUBIC BORON NITRIDE WHEELS

Nosenko V.A., Kuznetsov S.P., Serdyukov N.D., Zaharov A.S.

*Volzhsy Polytechnic Institute (Branch), Volgograd State Technical University*

The purpose of the article is to study the patterns of embedding grits of the titanium surface when grinding with a cubic boron nitride tool. Grinding and scratching were carried out on a *CHEVALIER Smart-B1224III* numerically controlled machine, scratch profilograms were obtained with a *SurfTest SJ-410* profilometer, surface morphology was studied on a *Versa 3D LoVac* scanning double-beam electron microscope. The performed studies on scratching titanium with a single grain of cubic boron nitride indicate a connection between embedding and self-sharpening: as a result of micro-chipping of the abrasive material, the grain is self-sharpening, the formed wear products are embedded in the treated surface. Based on the analysis of the brightness of grayscale images of wear products and the processed metal, the threshold for binarization of objects embedded into the treated surface has been established. As a result, the area and quantity of wear products are determined. The total relative area and the number of embedding particles are taken as parameters of the intensity of embedment. It has been established that the distributions of the listed embedment parameters obey a lognormal law, and a functional relationship between these parameters has been determined. The patterns of titanium embedment by wear products of abrasive material made of cubic boron nitride are consistent with the patterns of embedment when grinding with traditional abrasive materials. The greatest intensity of caricature of the treated surface by the wear products of the abrasive tool at the initial stage of processing.

**Keywords:** grinding, material transfer, cubic boron nitride, titanium, self-sharpening.

*The study was carried out using funds from the Volgograd State Technical University development program «Priority 2030», within the framework of scientific project № 45/649-24.*

### Введение

Сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ) получили широкое распространение при проведении операций шлифования труднообрабатываемых материалов. Высокая теплопроводность, твердость и химическая стабильность способствуют повышению стойкости

абразивного инструмента (АИ), что благоприятно сказывается на точности и качестве обработки [1]. Последнее время ведется множество исследований закономерностей износа КНБ. Сообщается, что зерна поликристаллического КНБ отличаются способностью к самозатачиванию, то есть формированию новых выступов и режу-

щих кромок в результате микроскалывания абразивного материала [2, 3]. Образовавшиеся продукты износа КНБ внедряются (шаржируются) в обработанную поверхность [4], что снижает качество обработки, особенно ответственных деталей, работающих в условиях трения и высоких знакопеременных нагрузок [5, 6]. Отсутствие рекомендаций по устранению или снижению шаржирования связано с методическими трудностями измерения параметров перенесенных частиц и малой изученностью процесса внедрения продуктов износа АИ при шлифовании.

**Цель исследования:** изучение закономерностей переноса продуктов износа КНБ при шлифовании.

#### Материалы и методы исследования

Для повышения точности измерения параметров внедренных продуктов износа выбран титан марки ВТ1-00 ( $Ti > 99,6$ ). Шлифование осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке с числовым программным управлением *CHEVALIER Smart-B1224III* кругами из КНБ 1A1 300×5×15×127 следующих характеристик: *CBN30 B126 M 100% V* и *CBN30 B251 K 100% V*. Царапание осуществляли индентором из поликристаллического КНБ. Профилограммы царапин получены профилометром Surftest SJ-410. Полученные поверхности исследованы на растровом двухлучевом электронном микроскопе *Versa 3D LoVac*.

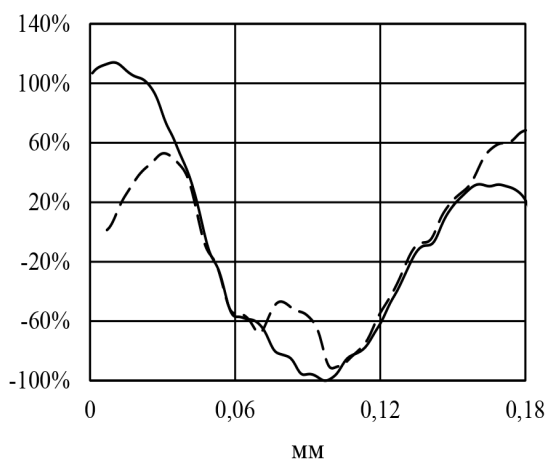
#### Результаты исследования и их обсуждение

Профилограммы царапин использовались для оценки износа абразивного зер-

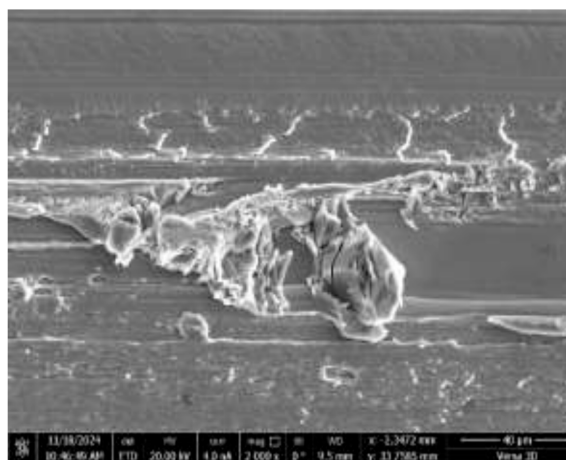
на. На рисунке 1а приведено изменение профиля царапин в процентах от первоначальной глубины. В результате скалывания произошло формирование новых выступов, наблюдаемых на профилограмме. Подобный износ является проявлением способности абразивного зерна к самозатачиванию. На поверхности царапины обнаружены внедренные кристаллы, идентифицированные методом рентгеноспектрального микроанализа как продукты износа КНБ (рис. 1б). Размер таких частиц не превышал 10 мкм, в месте внедрения происходит изменение профиля царапины. Соотнесение профилей царапин с их изображениями в обратно-рассеянных электронах позволяет утверждать, что наблюдаемые внедренные частицы на рисунке 1б являются продуктами износа абразивного зерна, образовавшимися в результате самозатачивания КНБ при царапании титана.

Из анализа химического состава шлифовального круга и обрабатываемого металла следует, что средние атомные номера продуктов износа и обрабатываемого материала существенно отличаются. Поэтому поверхность титана на фотографии, полученной в обратно рассеянных электронах, более светлая, продукты износа абразивного инструмента имеют более темные оттенки серого. Поэтому при последующей бинаризации изображения возможно контрастное цветовое выделение продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность, с последующим подсчетом их площади и количества.

Для определения порога яркости рассмотрено несколько десятков изображений с предполагаемыми продуктами износа.



а)



б)

Рис. 1. Изменение профиля царапины (а) и внедренные продукты износа КНБ при увеличении  $\times 2000$  (б)

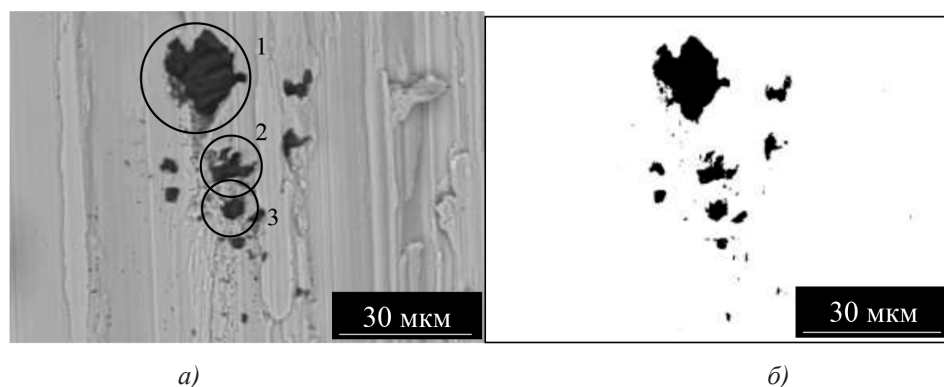


Рис. 2. Изображение шлифованной поверхности титана в обратно рассеянных электронах (а) и после бинаризации (б)

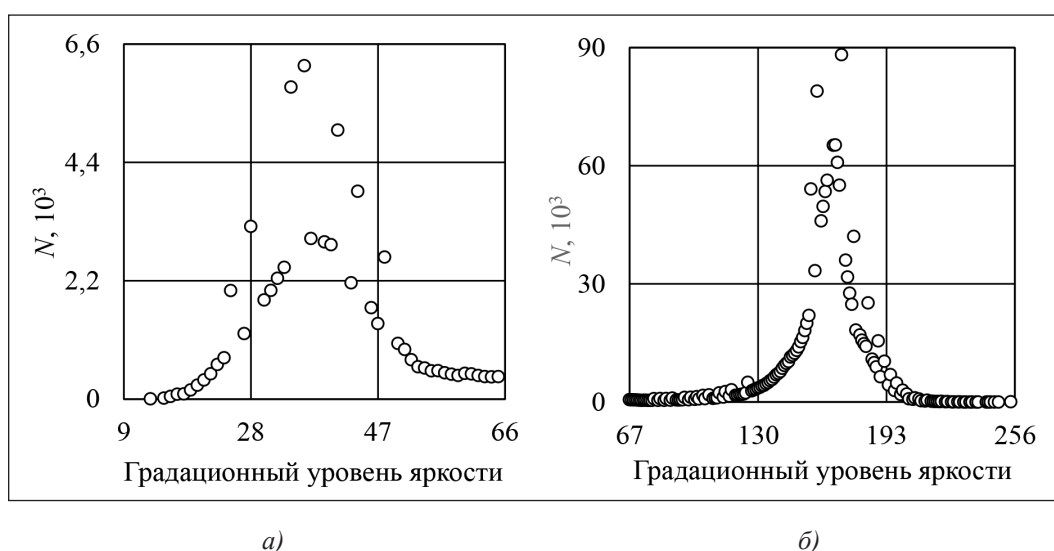


Рис. 3. Распределение уровней яркости предполагаемых продуктов износа (а) и элементов рельефа шлифованной поверхности (б)

В качестве примера на рисунке 2 показана шлифованная поверхность титана, отличающаяся светлым фоном. В центре фотографии более темным, почти черным цветом окрашены внедренные объекты. Размер наиболее крупного объекта 1 (верхняя часть изображения) по вертикальной и горизонтальной осям соответственно 20 и 14 мкм. Размер объектов 2 и 3 в центре слева около 3 мкм. На обработанной поверхности присутствует большое количество очень мелких объектов серого и светло-серого цвета размером 0,3–0,5 мкм.

Бинаризация заключается в переводе изображения в оттенках серого в черно-белое изображение. Обязательным условием бинаризации является определение порога яркости, с которым сравнивается яркость каждого пикселя изображения (рис. 2).

Статистический анализ уровней яркости пикселей, из которых сформировано изобра-

жение рисунка 2а, представлен на рисунке 3. В связи с тем, что доля пикселей изображения включений на несколько порядков меньше остальных пикселей изображения, распределение разбито на две выборки: уровни яркости пикселей предполагаемых продуктов износа абразивного инструмента (рис. 3а); уровни яркости пикселей обработанной поверхности (рис. 3б). Уровень яркости предполагаемых продуктов износа лежит в диапазоне 0–65 единиц. Более высокий уровень яркости – от 66 до 254 единиц – имеют пиксели обработанной поверхности титана. Граница между данными уровнями анализируемых объектов лежит в интервале 60–70 единиц. В работе пороговое значение уровня яркости принято равным 65 единицам.

С учетом принятого порога яркости проведена бинаризация полутонового изображения и получено изображение, представленное на рисунке 1б.

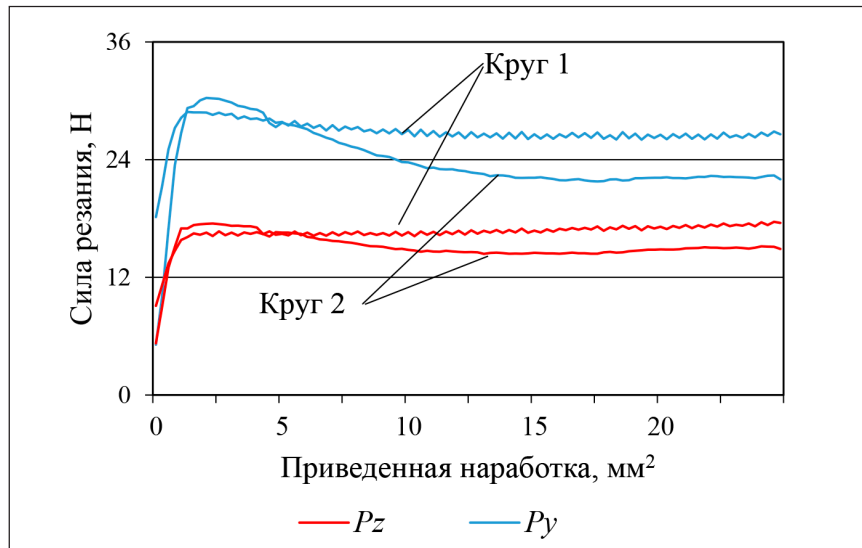


Рис. 4. Изменение касательной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания в зависимости от приведенной наработки

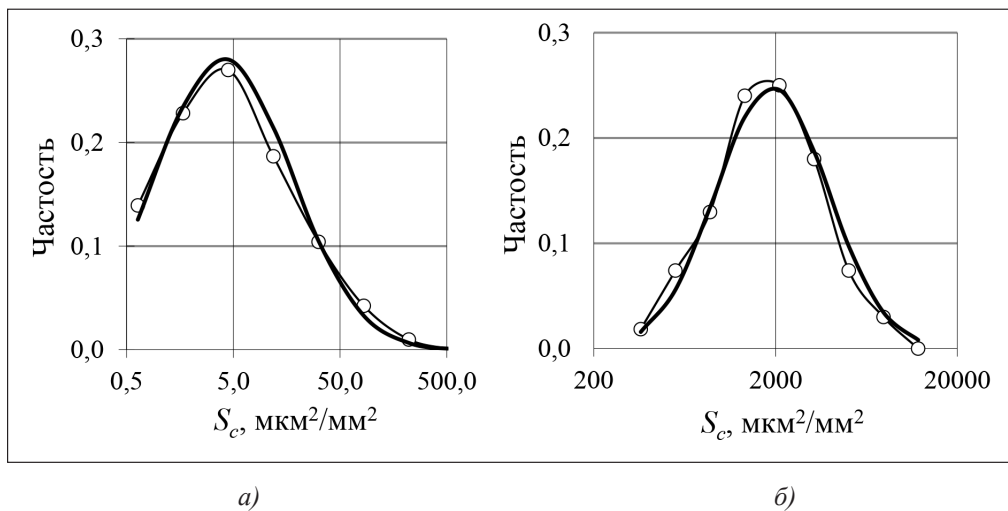


Рис. 5. Распределение  $S_c$  после шлифования кругом B126 M, наработка 25 мм<sup>2</sup> (а) и кругом B251 K, наработка 1 мм<sup>2</sup> (б): — теоретическое; —○— экспериментальное

Измерение параметров переноса проводили в различных условиях шлифования, определенных на основании анализа силы резания (рис. 4). Выбраны образцы, полученные после правки кругов (начальный этап обработки, приведенная наработка на 1 мм ширины обрабатываемой поверхности 1 мм<sup>2</sup>) и на установившемся этапе шлифования (наработка 25 мм<sup>2</sup>).

Результатом выделения и измерения внедренных в поверхность титана продуктов износа КНБ являются данные о числе и площади внедренных частиц. В качестве критериев интенсивности шаржирования выбраны количество  $N_c$  и суммарная площадь  $S_c$  внедренных частиц, отнесенные к 1 мм<sup>2</sup> обработанной

поверхности. Установлено, что распределение  $N_c$  и  $S_c$  при шлифовании титана подчиняется логнормальному закону распределения. На рисунке 6 представлены законы распределения параметра  $S_c$ : при шлифовании на установившемся этапе обработки кругом 1 (рис. 5а) и после правки кругом 2 (рис. 5б).

Коэффициент парной корреляции между параметрами  $S_c$  и  $N_c$  составляет 0,96 и свидетельствует о сильной корреляционной связи между ними. Функциональная связь определена линейной зависимостью:

$$S_c = 8,65N_c + 2,16,$$

коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,96$ .

Влияние характеристики абразивного инструмента и наработки на параметры переноса

Инструмент	<i>B126 M</i>	<i>B126 M</i>	<i>B251 K</i>	<i>B251 K</i>
Наработка, мм <sup>2</sup>	1	25	1	25
$\bar{N}_c$ , шт./мм <sup>2</sup>	44	6	164	85
$\bar{S}_c$ , мкм <sup>2</sup> /мм <sup>2</sup>	202	29	588	178
$\bar{S}_p$ , мкм <sup>2</sup>	15,2	8,9	33,9	21,3

Среднее число внедренных частиц, приведенное к 1 мм<sup>2</sup> анализируемой шлифованной поверхности  $\bar{N}$  (таблица) при относительной наработке 1 мм<sup>2</sup> кругом *B251 K*, больше, чем кругом *B126 M*, почти в 4 раза, при относительной наработке 25 мм<sup>2</sup> – в 14 раз. Средняя площадь объекта, внедренного в обработанную поверхность  $\bar{S}_p$ , увеличена для рассматриваемых наработок в 2 раза. При шлифовании кругом *B251 K* относительная площадь внедренных объектов  $\bar{S}_c$  больше, чем кругом *B126 M*, в 3 раза на начальном этапе и в 6 раз – на установившемся этапе шлифования. За период шлифования кругом *B126 M* параметр  $\bar{S}_c$  снижается в 7 раз, при шлифовании кругом *B251 K* – в 3 раза. Приведенная средняя площадь продуктов износа абразивного инструмента, видимых на поверхности титанового сплава, при шлифовании кругом *B251 K* в 2,2–2,4 раза больше по сравнению с кругом *B126 M* и согласуется с почти пропорциональным увеличением размеров зерен данных абразивных инструментов.

Приведенные результаты согласуются с ранее полученными данными. При шлифовании титана кругами из КНБ происходит шаржирование, как и при использовании традиционных абразивных материалов [7]. Размер наблюдаемых внедренных частиц соответствует продуктам износа, образующимся при самозатачивании КНБ [8, 9]. Причиной более интенсивного переноса на начальном этапе обработки является воздействие правящего инструмента, вследствие чего на рабочей поверхности круга образуется большое количество поврежденных абразивных зерен, разрушающихся при контакте с обрабатываемым материалом и внедряющихся в обрабатываемую поверхность [10].

### Заключение

В результате анализа профиля царапин и изображений морфологии поверхности обнаружены внедренные продукты износа КНБ, образовавшиеся вследствие скалывания вершины зерна. Подобный износ свидетельствует о самозатачивании абразивного зерна, следовательно, шаржирование является следствием самозатачивания. Путем анализа градиционного уровня яркости пикселей полутонового изображения определен порог бинаризации, в результате чего

проведено выделение и измерение внедренных продуктов износа КНБ в поверхность титана после шлифования. Установлено, что относительная суммарная площадь и количество шаржирующих частиц подчиняются логнормальному закону распределения. Между этими параметрами наблюдается линейная зависимость. Данные о шаржировании титана продуктами износа КНБ согласуются с закономерностями, наблюдаемыми при использовании традиционных абразивных материалов: наиболее интенсивное шаржирование наблюдается на начальном этапе обработки.

### Список литературы

- Ji H., Li Z., Liu M. Structural and mechanical properties of cBN composites by regulating particle size distribution and holding time // Int. J. Refract. Metals Hard Mater. 2021. Vol. 100. P. 105635. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105635.
- Zhao B., Ding W., Zhou Y., Su H., Xu J. Effect of grain wear on material removal behaviour during grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy with single aggregated cBN grain // Ceramics International. 2019. Vol. 45, Is. 12. P. 14842-14850. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.215.
- Zhu Y., Ding W., Rao Z., Zhao Z. Self-sharpening ability of monolayer brazed polycrystalline CBN grinding wheel during high-speed grinding // Ceramics International. 2019. Vol. 45. P. 24078-24089. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.08.115.
- Носенко В.А., Фетисов А.В., Кузнецов С.П. Морфология и химический состав поверхности титанового сплава на начальном этапе шлифования кругом из кубического нитрида бора // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22, № 2. С. 30-40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-30-40.
- Wang R.X., Zhou K., Yang J.Y., Ding H., Wang W., Guo J., Liu Q.Y. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors // Wear. 2020. Vol. 454-455. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203332.
- Boud F., Carpenter C., Folkes J., Shipway P. Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, Is. 15. P. 2197-2205. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.
- Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. 2003. Vol. 255, Is. 7-12. P. 421-426. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7.
- Zhao Z., Fu Y., Xu J., Zhang Z. Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in highspeed grinding of nickel-based superalloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 87. P. 3545-3555. DOI: 10.1007/s00170-016-8686-1.
- Huang X., LI H.N., Rao Z., Ding W. Fracture behavior and self-sharpening mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride in grinding based on cohesive element method. // Chinese Journal of Aeronautics. 2018. Vol. 32, Is. 12. P. 2727-2742. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.004.
- Turley D.M., Doyle E.D. The importance of surface characterization in surface treatment processes // Wear. 1982. Vol. 81. P. 145-158.