

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.30-39.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P.30-39.

Научная статья

УДК 621.923

doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

## Перенос продуктов износа абразивного материала при царапании и шлифовании титана

Владимир Андреевич Носенко<sup>1</sup>, д.т.н.

Семен Павлович Кузнецов<sup>2</sup>, к.т.н.

Никита Денисович Сердюков<sup>3</sup>, старший преподаватель

Валентин Олегович Харламов<sup>4</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный  
технический университет, Волжский, Россия

<sup>4</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>1</sup> vladim.nosenko2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>

<sup>2</sup> cemen1894@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6924-3380>

<sup>3</sup> serdyukov-nikita@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9026-9016>

<sup>4</sup> harlamov\_vo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

**Аннотация.** Внедренные продукты износа абразивного инструмента на поверхности ответственных изделий из титановых сплавов являются критическим дефектом, способным значительно снизить срок службы узла из-за интенсивного абразивного износа контактирующих поверхностей и образования усталостных трещин. На примере резания единичным зерном показано, что в результате микроскалывания абразивного материала уменьшается перенос металла на контактирующие поверхности зерна и происходит внедрение продуктов износа в обрабатываемую поверхность. При шлифовании инструментами из сверхтвёрдых материалов возможность контроля и управления данным процессом методом рентгеноспектрального анализа ограничена в результате значительной погрешности определения малых концентраций легких элементов. С целью измерения параметров переноса продуктов износа абразивного материала, предложен способ, основанный на анализе изображений шлифованных поверхностей, полученных в обратно-рассеянных электронах. На основании результатов элементного анализа определен состав продуктов износа и погрешности измерения параметров переноса при шлифовании кругами из карбида кремния и кубическим нитридом бора (КНБ), а именно числа и площади внедренных частиц. Доля внедренных кристаллов абразивных материалов для кругов из карбида кремния – 80 % и для кругов из КНБ – 70 %, в том числе 20 % кристаллы корунда (наполнитель).

**Ключевые слова:** титан, карбид кремния, кубический нитрид бора, микроцарапание, шлифование, перенос материала, химический состав

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

**Для цитирования:** Носенко В.А., Кузнецов С.П., Сердюков Н.Д., Харламов В.О., Перенос продуктов износа абразивного материала при царапании и шлифовании титана // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 30–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

## Abrasive wear products transport during titanium scratching and abrasion

Vladimir A. Nosenko<sup>1</sup>, D. Eng.  
Semyon P. Kuznetsov<sup>2</sup>, PhD Eng.  
Nikita D. Serdyukov<sup>3</sup>, senior lecturer.  
Valentin O. Kharlamov<sup>4</sup>, PhD Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> Volga Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia

<sup>4</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>1</sup> vladim.nosenko2014@yandex.ru

<sup>2</sup> cemen1894@yandex.ru

<sup>3</sup> serdyukov-nikita@mail.ru

<sup>4</sup> harlamov\_vo@mail.ru

**Abstract.** Buried abrasive tool wear products on the surface of critical titanium alloy products become a fatal defect that can significantly reduce the service life of the unit due to intense abrasive wear of the contacting surfaces and the formation of fatigue cracks. Using the example of single grain cutting, it is shown that as a result of micro-piercing of an abrasive material, metal transport to the contacting surfaces of the grain decreases and wear products are introduced into the treated surface. When grinding with tools made of superhard materials, the possibility of monitoring and controlling this process by X-ray spectral analysis is limited resulting from a significant error in determining small concentrations of light elements. In order to measure the parameters of the wear products transport of an abrasive material, a method based on the analysis of polished surfaces images obtained in backscattered electrons is proposed. Based on the results of the elemental analysis, the composition of the wear products and the measurement errors of the transfer parameters under grinding with silicon carbide and cubic boron nitride (CBN) wheels, namely the number and area of buried particles, were determined. The share of structured crystals of abrasive materials for silicon carbide wheels is 80 % and for CBN disks is 70 %, including 20 % corundum crystals (filler).

**Keywords:** titanium, silicon carbide, cubic boron nitride, micro-scratching, grinding, material transport, chemical composition

**Financing:** the research was carried out at the expense of the development program of VolgSTU «Priority 2030», as part of the scientific project No. 45/649-24

**For citation:** Nosenko V.A., Kuznetsov S.P., Serdyukov N.D., Kharlamov V.O. Abrasive wear products transport during titanium scratching and abrasion / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 30–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

### Введение

Шлифование – процесс микроцарапания обрабатываемого материала вершинами зёрен абразивного инструмента (АИ) [1, 2]. Важнейшим свойством АИ является самозатачиваемость – «свойство абразивного инструмента сохранять работоспособное состояние вследствие образования новых выступов и режущих кромок у абразивных зёрен при абразивной обработке» (ГОСТ 21445). Образование новых режущих кромок снижает силу резания и температуру в зоне контакта, определяет производительность и стойкость шлифовальных кругов [3].

С увеличением размеров площадки износа возрастает сила, действующая на зерно, и внутренние растягивающие напряжения, при достижении которыми критических значений в материале образуются трещины, являющиеся причиной скалывания фрагментов зерна [4, 5].

Если самозатачиваемость зерна проявляется в меньшей степени, происходит разрушение связки и вырывание зёрен, в результате, снижается коэффициент шлифования, возрастает шероховатость обработанной поверхности [6].

Множество исследований процесса шлифования инструментом из кубического нитрида бора (КНБ) свидетельствуют о предпочтительности самозатачиваемости абразивного материала. Созданы и разрабатываются поликристаллические зерна кубического нитрида бора, обладающие регулируемой самозатачиваемостью. Из классических абразивных материалов большей склонностью к самозатачиванию обладают зерна карбида кремния, что во многом определяется высокой хрупкостью материала по сравнению, например, с корундом. С целью повышения самозатачиваемости разработаны поликристаллические материалы на основе корунда [7 – 9].

Образование продуктов износа абразивного материала происходит непосредственно в зоне контакта, что определяет вторую и менее изученную сторону самозаточивания: отделившиеся непосредственно в зоне резания фрагменты абразивного зерна способны внедряться в обрабатываемую поверхность. Кристаллы, внедренные на поверхность изделия, являются концентраторами напряжений, нарушают целостность поверхности и оказывают негативное влияние на эксплуатационные свойства. При работе изделий, особенно в условиях знакопеременных нагрузок, концентраторы напряжений снижают усталостную прочность материала и вносят непредсказуемость в показатели надежности, что имеет большое значение при эксплуатации ответственных изделий [10, 11]

Взаимоперенос материалов при шлифовании и других видах абразивной обработки во многом определяется адгезионной активностью обрабатываемого материала. Наибольшей адгезионной активностью в ряду *d*-переходных металлов IV периода обладает титан [12]. Поэтому при шлифовании титана и его сплавов инструментом из карбида кремния перенос продуктов износа абразивного инструмента в 5 – 8 раз больше, по сравнению, например, с железом, кобальтом и никелем. Внедрение продуктов износа инструментов из классических абразивных материалов в поверхность титановых сплавов является доказанным фактом [13, 14]. Интенсивность переноса абразивных инструментов из карбида кремния и корунда определяли по изменению концентрации, соответственно, кремния и алюминия [13].

При шлифовании инструментами из КНБ и алмаза достоверное определение концентрации бора, азота и углерода только в результате переноса из абразивного материала осложняется наличием указанных элементов в окружающей среде и методическими трудностями отделения пиков этих элементов от тормозного рентгеновского излучения [15]. В связи с этим, интенсивность переноса материала абразивных инструментов из алмаза и КНБ определяют в результате анализа изображения обработанной поверхности в обратно рассеянных электронах [16].

Как было отмечено ранее, удаление обрабатываемого материала при шлифовании

происходит в результате микроцарапания вершинами зёрен. Поэтому и перенос материалов при шлифовании следует рассматривать, как результат взаимодействия единичных вершин зёрен с обрабатываемым материалом. Тем не менее, шлифование отличается от царапания единичными зёрнами. К отличительным особенностям переноса материалов при шлифовании следует отнести присутствие на обработанной поверхности материала связи, в том числе, в сочетании с абразивным материалом [12], возможность изменения размера и положения ранее перенесённых продуктов износа в результате контакта с другими зёрнами абразивного инструмента, в том числе, на последующих проходах. Сравнительный анализ переноса материала при микроцарапании единичной вершиной зерна и шлифовании абразивным инструментом способствует более глубокому пониманию процесса.

Цель работы – исследование переноса абразивного материала на обработанную поверхность при микроцарапании инденторами и шлифовании абразивными инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора.

### Методика исследований

В качестве обрабатываемого металла использовали технически чистый титановый сплав марки ВТ1-00 (ГОСТ 19807-91), не содержащий легирующих элементов, массовая доля титана более 99,6 %. Содержания кремния и углерода в титановом сплаве ВТ1-00 не более, соответственно, 0,08 и 0,05 %, содержание бора не указано (ГОСТ 19807-91). Выбор титанового сплава обусловлен высокой адгезионной активностью металла, минимальное содержание примесей в сплаве снижает точность определения концентрации химических элементов, входящих абразивных материалов. Царапание осуществляли инденторами из карбида кремния зеленого (далее – карбид кремния), производитель ОАО «Волжский абразивный завод» и кубического нитрида бора (КНБ), производитель АО «Абразивный завод «Ильич». Вершины кристаллов перед царапанием затачивали на заточном станке алмазным абразивным инструментом, угол конуса 120 °, радиус округления вершины 25...30 мкм.

Поверхности титанового сплава для микроцарапания подготавливали на прецизионном профилешлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III [17]. Шероховатость поверхности образца  $Ra$  не превышала 0,2 мкм. После этого шлифовальный круг заменяли металлическим диском, в торцовой поверхности которого закрепляли индентор и ориентировали его перпендикулярно поверхности образца. С помощью шупа устанавливали зазор между индентором и поверхностью образца 4...50 мкм. Включали вращение шпинделя и ручную, управляя возвратно-поступательным поперечным (осевым) перемещением стола, одновременно опускали шпиндель станка и фиксировали начало появления царапин на поверхности титанового сплава. Касание вершины индентора с поверхностью заготовки определяли по дорожке царапин. Как показали эксперименты, глубина видимой дорожки царапин не превышала 2 мкм, скорость резания 35 м/с.

Профиль царапины измеряли профилометром SurfTest SJ-410. Морфологию царапин исследовали на двухлучевом растровом электронном микроскопе Versa 3D LoVac. Для определения кристаллов абразивных материалов, перенесенных на поверхность титанового сплава, изображение получали в обратно-рассеянных электронах. На поверхности титана внедренные объекты выделяются низким градиционным уровнем яркости. Средний атомный номер кубического нитрида бора – 6, карбида кремния – 10, титана – 22. Химический состав предполагаемых кристаллов абразивных материалов определяли методом рентгено-спектрального анализа.

Результаты исследования царапин сопоставляли с состоянием поверхности титанового сплава после шлифования абразивными инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора. Характеристики абразивных инструментов 54C F100 G 10V и CBN30 B126 M 100 % V. Тип и размер шлифовальных кругов – 1A1 300×15×127. Скорость шлифования соответствовала скорости микроцарапания; подача на глубину 0,005 мм/ход; продольная подача 12 м/мин. Поверхность образца подготавливали и шлифовали на том же станке.

## Результаты, обсуждение результатов

### Перенос кристаллов карбида кремния и КНБ при царапании

В результате исследования морфологии и размеров царапин на оптическом микроскопе показано, что на фоне плавного уменьшения длины царапин значительных изменений размеров не установлено. Тем не менее, в отдельных царапинах обнаружены инородные объекты. Морфологию царапин и внедренных объектов исследовали на электронном микроскопе (рис. 1). Направление резания справа налево.

При микроцарапании индентором из карбида кремния (рис. 1, а) слева от большого кристалла 1 образовался валик металла 2, что хорошо согласуется с направлением движения индентора. В результате перемещения возрастающего объема металла, увеличивается сила сопротивления движению индентора, что и явилось причиной скалывания данного фрагмента кристалла. Отдельные мелкие фрагменты кристаллов расположены справа по ходу движения 3. Размер видимой части продуктов износа от 1,0 до 40 мкм. На рис. 1, б показана группа кристаллов приблизительно одинакового размера и формы. Справа видна дорожка скольжения, оставленная данной группой кристаллов, слева валик металла, остановивший перемещение кристаллов. Размер кристаллов около 5 мкм.

Фрагменты кристаллов КНБ, вдавленные в поверхность царапины, показаны на рис. 1, в. Хорошо выраженные дорожки справа и слева от внедренных кристаллов свидетельствует о том, что отделившиеся кристаллы расположены не в первом ряду площадки износа по направлению её движения. Размер продуктов износа от 1,0 до 20 мкм. Кристаллы длиной 5...10 мкм показаны на рис. 1, г.

На основе анализа размеров кристаллов, вдавленных в поверхность царапин, установлено, что размеры продуктов износа абразивного материала после царапания индентором из КНБ почти в два раза меньше, по сравнению с продуктами износа инденторов из карбида кремния.

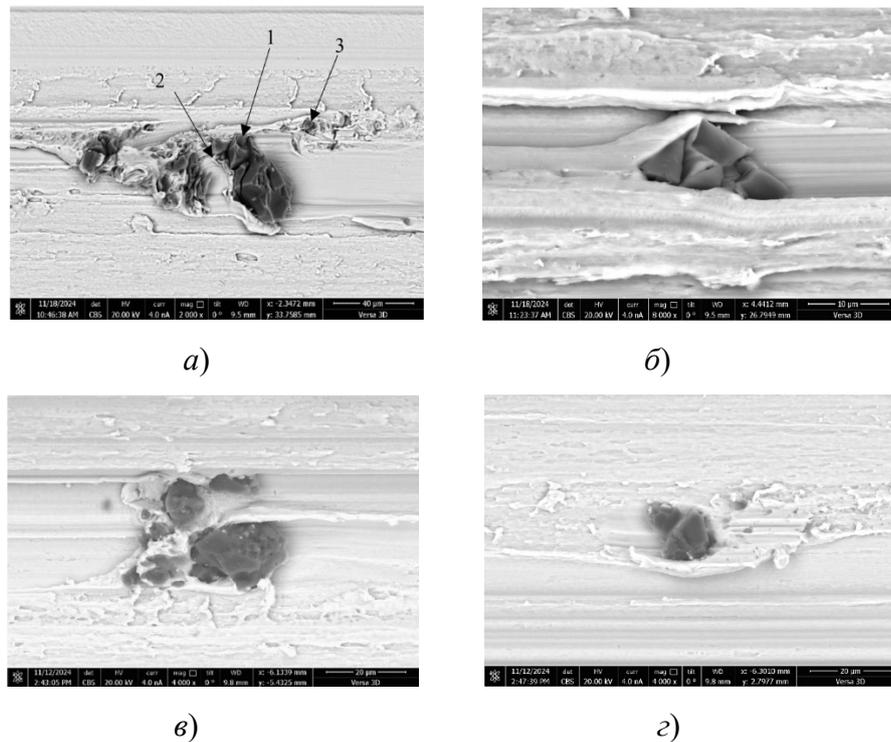


Рис. 1. Продукты износа, внедренные в поверхность титанового сплава после царапания инденторами из карбида кремния (*a, б*) и кубического нитрида бора (*в, г*)

Fig. 1. Wear products buried in the surface of a titanium alloy after scratching by indenters made of silicon carbide (*a, b*) and cubic boron nitride (*c, d*)

Спектрограмма объектов, обнаруженных на поверхности царапин после взаимодействия с вершиной индентора из карбида кремния (рис. 2, *a*), свидетельствует о наличии углерода и кремния, составляющих молекулу

карбида кремния. В спектрограмме объектов, присутствующих в царапинах, образованных индентором из КНБ, основными химическими элементами являются азот и бор (рис. 2, *б*). В каждой спектрограмме присутствует титан.

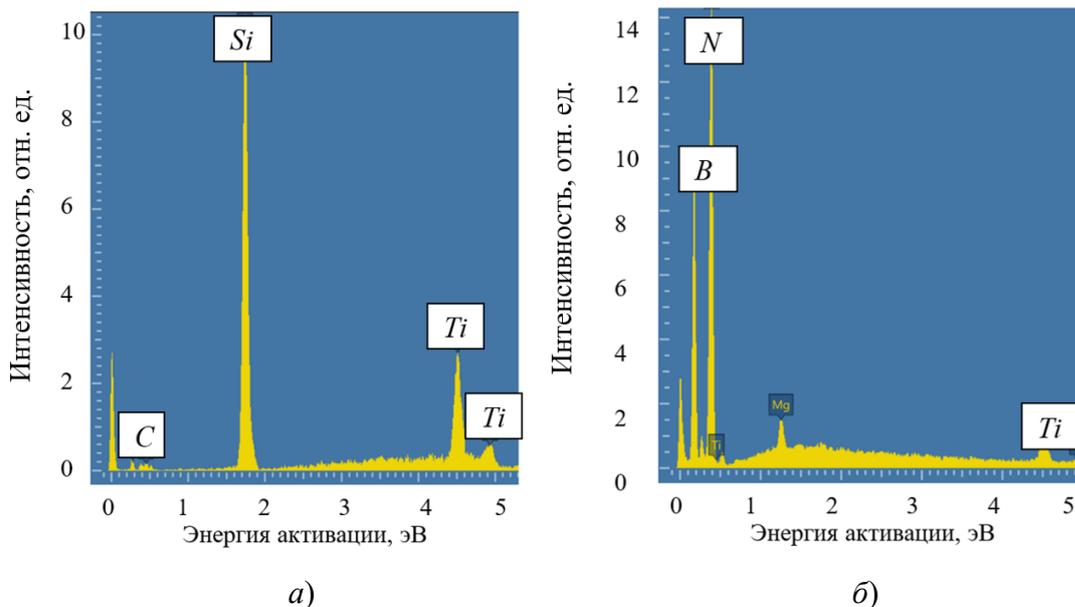


Рис. 2. Типовая спектрограмма объектов после царапания кристаллами из карбида кремния (*a*) и КНБ (*б*)

Fig. 2. Typical spectrogram of objects after scratching by crystals made of silicon carbide (*a*) and CBN (*b*)

Для наглядного представления о химическом составе внедренных объектов, интенсивность пика линий представлена в атомных долях (табл. 1). В карбиде кремния содержание атомов углерода в два раза превышает содержание атомов кремния. Установлено, что с увеличением энергии активации различие в атомных концентрациях кремния и углерода снижается [18]. Учитывая, что с увеличением энергии активации глубина зоны генерации рентгеновского характеристического излучения возрастает, соответственно, информация о содержании химических элементов усредняется в большем объеме анализируемого материала. В

результате различия в атомарных концентрациях кремния и углерода, обусловленные повышенной концентрацией углерода на поверхности кристалла с увеличением энергии активации снижаются. В составе КНБ присутствует магний, выступающий инициатором превращения гексагонального нитрида бора в кубическую модификацию [19].

Полученный в результате количественного анализа химический состав исследуемых объектов (табл. 1), позволяет идентифицировать объекты, как внедренные продукты износа карбида кремния и КНБ.

### 1. Химический состав объектов

#### 1. Chemical composition of objects

SiC			КНБ		
Химический элемент	Атомная доля, %, (рис. 1, а)	Атомная доля, % (рис. 1, б)	Химический элемент	Атомная доля, %, (рис. 1, в)	Атомная доля, % (рис. 1, б)
C	67,94	67,54	B	50,90	52,23
Si	31,81	27,29	N	48,69	47,50
O	–	3,11	Mg	0,20	–
Ti	0,25	2,06	Ti	0,22	0,27
Total	100,00	100,00	Total	100,00	100,00

### Перенос материала при шлифовании

Продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании являются кристаллы абразивных материалов, фрагменты связки и кристаллы абразивного материала со связкой. Инструменты из сверхтвёрдых материалов в своем составе содержат наполнители. В частности, используемые инструменты из КНБ в качестве наполнителя содержат шлифовальные порошки из электрокорунда. Поэтому в продуктах износа могут появиться кристаллы корунда в различном сочетании. Уровень яркости перечисленных объектов отличается несущественно, что не позволяет классифицировать на шлифованной поверхности по данному критерию. Перечисленные объекты объединены в одну группу.

На рис. 3 представлены 54 объекта, выделенные на шлифованной поверхности титанового сплава ВТ1-00 после шлифования абразивным инструментом из кубического нитрида бора. Последующее разделение выделенных объектов осуществляли методом рентгено-спектрального анализа, по результатам

которого выделены 4 группы: КНБ, корунд, связка и элементы рельефа шлифованной поверхности. На рис. 4, а приведена спектрограмма характеристического рентгеновского излучения частицы КНБ (объект 2 на рис. 3). Идентификацию подобных объектов делали по наличию пиков *B*, *N* и *Ti*. К данной группе отнесено 34 объекта, что составляет 65 % от общего количества.

Спектрограмма корунда дана на примере объекта 4 (рис. 4, б), где присутствуют два пика основных химических элементов: *Al* и *O*. Атомная концентрация элементов близка к пропорции 2:3 (табл. 2). В принадлежности к корунду идентифицированы 10 объектов, что составляет 19 % от общего числа предполагаемых продуктов износа. В отличие от корунда и нитрида бора в состав связки входит множество компонентов (рис. 4, в, г). Характерным набором элементов являются алюминий, кислород, углерод, магний, кальций, калий и натрий [20]. К связке отнесены пять объектов, что составляет около 9 % от общего числа выделенных предполагаемых продуктов износа.

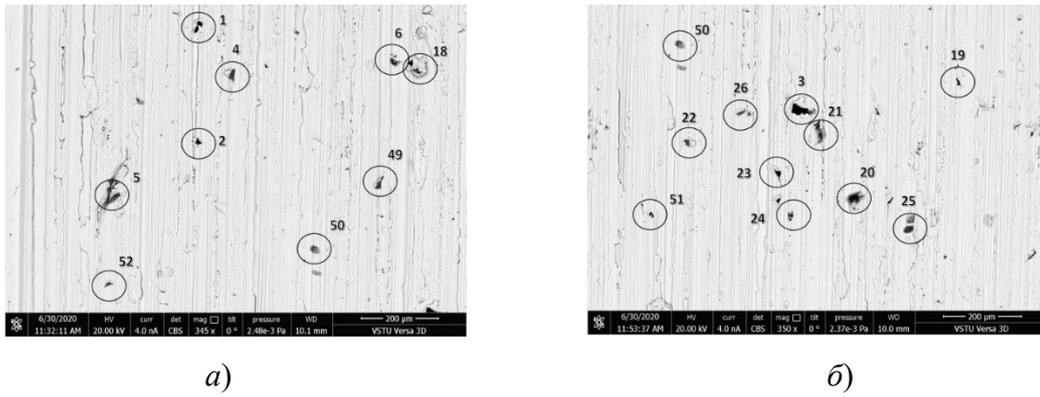


Рис. 3. Поверхность титана после шлифования кругом из КНБ с выделенными объектами  
Fig. 3. Titanium surface after grinding with a CBN wheel for selected objects

В результате исследований выделена ещё одна группа – элементы рельефа обработанной поверхности. Рентгенограмма этой группы не имеет интенсивных пиков химических элементов, за исключением титана и отличается повышенным фоном (рис. 4, д). Элементный состав таких объектов определен со значительной погрешностью (табл. 2,

объект 19). К элементам рельефа отнесены объекты 19, 31, 37 и 53, что составляет около 7 % от общего количества. Площадь указанных объектов не превышает 2 % от суммарной площади выделенных 54 объектов. Суммарная площадь продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность, составляет менее 0,01 %.

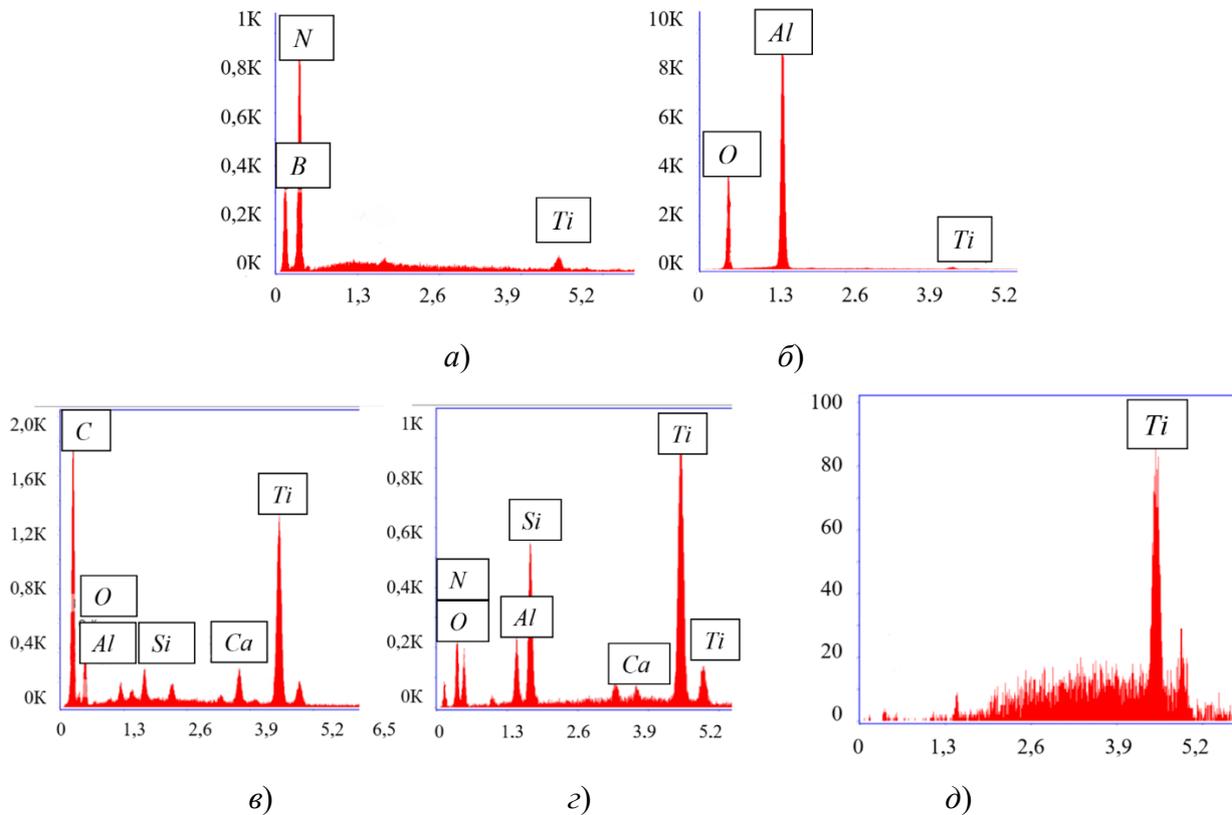


Рис. 4. Типовые спектрограммы объектов с низким градационным уровнем яркости:  
а – КНБ; б – корунд; в, г – связка; д – элементы рельефа

Fig. 4. Typical spectrograms of objects with low brightness gradation:  
а – CBN; б – corundum; в, г – bundle; д – relief elements

2. Химический состав объектов (рис. 3), атомные доли

2. Chemical composition of objects (Fig. 3), atomic fractions

Элемент	Объект 2, %	Объект 4, %	Объект 19, %	Объект 20, %	Объект 25, %
B	44,1	5,4	21,1	20,5	41,1
C	2,7	1,1	1,1	57,3	1
N	51,8	-	10,9	6,6	23,9
O	1,1	58,4	12,8	9,5	18,6
Na	-	-	-	1,2	1,4
Al	-	34,7	1,2	-	1,5
Si	-	-	-	-	3,6
Ca	-	-	-	1,3	-
Ti	-	-	52,8	2,8	7,7

При шлифовании кругом из карбида кремния выделено 70 объектов. Результаты рентгеноспектрального анализа представлены на рис. 6. На основании полученных рентгенограмм объекты разделены на три группы: элементы рельефа (рис. 5, а), карбид кремния (рис. 5, б) и фрагменты связки (рис. 5, в).

К элементам рельефа отнесены 24 объекта (34 %), карбид кремния – 37 объектов (53 %), керамическая связка – 9 объектов (13 %).

Суммарная площадь выделенных объектов 2207 мкм<sup>2</sup>, на объекты, идентифицированные как элементы рельефа, приходится 130 мкм<sup>2</sup>, что составляет 6 % от общей площади.

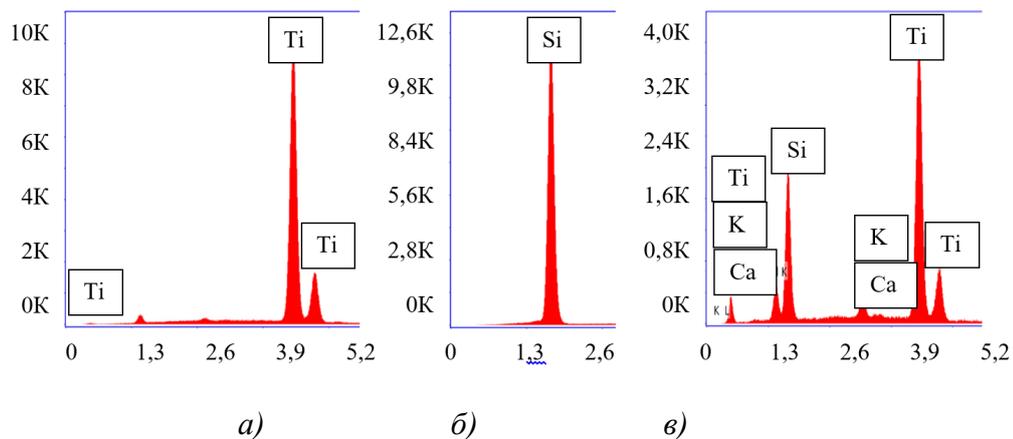


Рис. 5. Типовые спектрограммы объектов с низким градационным уровнем яркости:

а – элементы рельефа; б – карбид кремния; в – связка

Fig. 5. Typical spectrograms of objects with low radiation brightness:

a – relief elements; b – silicon carbide; c – a bundle

**Выводы**

Подтверждено, что при микроцарапании титана инденторами из КНБ и карбида кремния происходит перенос продуктов износа в поверхность царапины. Рентгеноспектральным анализом определен химический состав продуктов износа.

Установлено, что максимальные размеры кристаллов из карбида кремния,

внедренных в поверхность царапины, почти в два раза превосходят максимальный размер кристаллов из кубического нитрида бора.

На основе рентгеноспектрального микроанализа дана классификация продуктов износа абразивных инструментов, внедренных в обработанную поверхность титанового сплава при шлифовании инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора: абразивный материал (карбид кремния или кубический

нитрид бора), связка, наполнитель (зерна корунда в инструменте из кубического нитрида бора). Кроме перечисленных рентгеноспектральный анализ определил некоторые выделенные объекты, как ложные, выделение которых обусловлено рельефом поверхности.

Определена доля перечисленных объектов в общем количестве объектов, выделенных методом бинаризации изображения поверхности в обратно рассеянных электронах. При шлифовании абразивными инструментами из кубического нитрида бора / карбида кремния: основной абразивный материал – 65 % / 53 %, наполнитель (корунд) – 19 % / 0 %; связка – 9 % / 20 %, ложные объекты – 7 % / 34 %. Большое количество ложных выделенных продуктов износа при шлифовании инструментом из карбида кремния обусловлено меньшей разницей градиционных уровней яркости между карбидом кремния и элементами рельефа по сравнению с кубическим нитридом бора.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога / Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Базров Б.М. [и др.]; общ. ред. Суслов А. Г. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 799 с.: ил. ISBN 978-5-907104-23-5.
2. **Malkin S.** Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1989. 275 p. ISBN 0-85312-756-5
3. **Ichida Y.** Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline cBN Grinding Wheels // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 523. P. 137–142. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.137.
4. **Zhao Z., Fu Y, Xu J., Zhang Z.** Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in high-speed 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
5. **Лобанов Д. В., Секлетина Л.С., Янюшкин А.Р.** Комбинированная электроалмазная обработка алмазными кругами на металлической связке // Актуальные проблемы в машиностроении. 2019. Т. 6, № 1 – 4. С. 110–116. EDN XCMUJX.
6. **Ghosh A., Chattopadhyay A.K.** On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel // Industrial Diamond Review. 2007. Vol. 67. P. 59–64.
7. **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
8. **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. P. 2727–2742. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.004
9. **Mohan R, Ramachandran D.** A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. P. 965–974.
10. **Effects** of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H. Ding, W. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // Wear. 2020. DOI:203332. 10.1016/j.wear.2020.203332.
11. **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 - J MATER PROCESS TECHNOL. 2010. Vol. 210. P. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.
12. **Носенко В.А., Фетисов А.В., Сердюков Н.Д.** Морфология и химический состав поверхности титанового сплава после шлифования кругом из карбида кремния // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 12 (102). С. 22–28.
13. **Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В., Харламов В.О.** Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 10 (76). С. 9–18.
14. **Xu X., Yu Y., Huang H.** Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. 2003. Vol. 255. P. 1421–1426. DOI:
15. **Аналитическая** просвечивающая электронная микроскопия / Синдо Д., Оикава Т. М.: Техносфера, 2006. 256 с. ISBN: 5-94836-064-4.
16. **Пат. 2768518 РФ, МПК G01N 19/08 [и др.]** Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов / В.А. Носенко, С.П. Кузнецов, Н.Д. Сердюков; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2022.
17. **Носенко В.А., Белухин Р.А., Фетисов А.В., Морозова Л.К.** Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). – С. 35-39. EDN: VYWZTN.
18. **Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И.** Рентгеноспектральный микроанализ поверхности карбида кремния после микроцарапания титана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15, № 1. С. 69–79. EDN TGRQLF.
19. **Волков Г.Н., Гаршин А.П.** Сравнительные показатели абразивных порошков из кубического нитрида бора // Новые огнеупоры. 2020. №8. С. 31–40. ISSN 1683-4518 <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-8-31-40>.
20. **Sun X., Yu T., Chen Y., Zhang C., Ma Z.** Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites, // Ceramics International. 2019. Vol. 46. P. 5337–5343. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.10.286.

## REFERENCES

1. The technologist's handbook/under the general editorship of Suslov, A.G. Bezlyazny V.F., Bazrov B.M. [et al.]; Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2019, 799 p.: ill. ISBN 978-5-907104-23-5.
2. Malkin S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1989. 275 p. ISBN 0-85312-756-5
3. Ichida Y. Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline cBN Grinding Wheels // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 523. P. 137–142. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.137.
4. 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
5. Lobanov D. V., Sekletina L.S., Yanushkin A.R. Combined electrodiamond processing with diamond wheels on a metal bond // Actual problems in mechanical engineering, 2019, vol. 6, No. 1-4. pp. 110–116. EDN XCMUJX.
6. Ghosh A., Chattopadhyay A.K. On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel // Industrial Diamond Review. 2007. Vol. 67. P. 59–64.
7. 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
8. 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. P. 2727–2742. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.004
9. Mohan R, Ramachandran D. A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. P. 965–974.
10. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H. Ding, W. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // Wear. 2020. DOI:203332. 10.1016/j.wear.2020.203332.
11. 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 - J MATER PROCESS TECHNOL. 2010. Vol. 210. P. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.
12. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Serdyukov N.D. Morphology and chemical composition of titanium alloy surface after grinding with silicon carbide disk. // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 12 (102), pp. 22–28.
13. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V., Kharlamov V.O. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 10 (76), pp. 9–18.
14. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. 2003. Vol. 255. P. 1421–1426. DOI:
15. Analytical transmission electron microscopy / Shindo D., Oikawa T. M.: Technosphere, 2006, 256 p. ISBN: 5-94836-064-4.
16. Pat. 2768518 of the Russian Federation, IPC G01N 19/08 [et al] A method for determining the degree of caricature of metal surfaces with abrasive grains from superhard abrasive materials / V.A. Nosenko, S.P. Kuznetsov, N.D. Serdyukov; FSBEI VO VolgSTU. 2022.
17. Nosenko V.A., Belukhin R.A., Fetisov A.V., Morozova L.K. A test complex based on a precision CNC profile grinding machine CHEVALIER model SMART-B1224 III // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2016, no. 5 (184). pp. 35–39. EDN: VYWZTN.
18. Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. X-ray spectral microanalysis of the silicon carbide surface after micro-scratching of titanium // Bulletin of the South Ural State University. Issue: Mechanical engineering, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 69–79. EDN TGRQLF
19. Volkov G.N., Garshin A.P. Comparative indicators of abrasive powders of cubic boron nitride of different grades // Novie ognepori, 2020, no. 8, pp. 31–40. ISSN 1683-4518 <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-8-31-40>.
20. Sun X., Yu T., Chen Y., Zhang C., Ma Z. Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites, // Ceramics International. 2019. Vol. 46. P. 5337–5343. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.10.286.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 13.12.2024; approved after reviewing 16.12.2024; assepted for publication 24.12.2024.