

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №11 (173). С.32-40.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №11 (173). P.32-40.

Научная статья

УДК 621.923

doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-32-40

### Закономерности шаржирования обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании

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

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

Никита Денисович Сердюков<sup>3</sup>, ст. преподаватель

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

Валерия Евгеньевна Пузырькова<sup>5</sup>, ст. преподаватель

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Волжский политехнический институт (филиал), 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>

<sup>5</sup> puzirkova@inbox.ru, <http://orcid.org/0009-0002-0048-997X>

**Аннотация.** Одним из менее изученных процессов абразивной обработки, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные свойства изделия, является внедрение (шаржирование) продуктов износа абразивного инструмента в обработанную поверхность. В большей степени шаржирование изучено на операциях струйно-абразивной обработки, где внедрение свободной абразивной частицы в обработанную является более очевидным фактом. При шлифовании шаржирование абразивного материала в обработанную поверхность изучено в меньшей степени. Цель работы – экспериментальное изучение некоторых закономерностей шаржирования продуктов износа абразивного инструмента при шлифовании различных металлов и сплавов. В качестве обрабатываемых материалов выбрана группа химически чистых металлов, обладающих различной адгезионной активностью к абразивному материалу: титан, железо, кобальт, никель. Учитывая, что наиболее адгезионно активным материалом является титан, обрабатываемые материалы представлены группой промышленных титановых сплавов и менее адгезионно активными сплавами на основе железа и алюминия. Шлифование осуществляли абразивными инструментами из кубического нитрида бора, карбида кремния и корунда. Состояние обработанной поверхности исследовали на двухлучевом растровом электронном микроскопе Versa 3D LoVac. Для оценки интенсивности шаржирования использовали новые показатели: средняя относительная площадь и среднее относительное количество продуктов износа абразивных инструментов, шаржированных в обработанную поверхность. Установлено, что шлифование всех выбранных металлов и сплавов инструментами из различных абразивных материалов сопровождается шаржированием обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструментов. Внедренные частицы являются продуктами износа абразивного инструмента: фрагментами абразивных материалов, наполнителя, связки и сочетаниями указанных продуктов. При шлифовании металлов инструментом из КНБ интенсивность шаржирования снижается в направлении Ti, Ni, Fe, Co и согласуется с уменьшением интенсивности контактного взаимодействия перечисленных металлов с абразивным материалом. При шлифовании титановых сплавов инструментом из карбида кремния интенсивность шаржирования снижается в направлении от сплава BT22 к сплаву BT8.

**Ключевые слова:** шлифование, перенос материала, шаржирование, параметры шаржирования, карбид кремния, корунд, кубический нитрид бора

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта №45/649-24

*Для цитирования:* Носенко В.А., Кузнецов С.П., Сердюков Н.Д., Харламов В.О., Пузырькова В.Е. Закономерности шаржирование обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 32-40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-32-40

## Surface repletion patterns for the surfaces treated by wear products of an abrasive tool under grinding

Vladimir A. Nosenko<sup>1</sup>, D. Eng.  
Semyon P. Kuznetsov<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.  
Nikita D. Serdyukov<sup>3</sup>, senior lecturer  
Valentin O. Kharlamov<sup>4</sup>, Ph.D. Eng.  
Valeria E Puzyrkova<sup>5</sup>, senior lecturer

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Volzhsky Polytechnic Institute (branch), 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

<sup>5</sup> puzirkova@inbox.ru

**Abstract.** One of the less studied processes of abrasive machining, having a significant impact on the operational properties of the product, is the introduction (surface repletion) of the abrasive tool wear products into the treated surface. To a greater extent, surface repletion has been studied in the operations of the abrasive jetting, where a strongly adherent free abrasive particle to the treated surface is a more obvious fact. When under grinding, such treatment with strongly adherent abrasive material to the treated surface has been studied to a lesser extent. The purpose of the work is an experimental study of some surface repletion patterns for abrasive tool wear products under grinding of various metals and alloys. A group of chemically pure metals with different adhesive activity to abrasive materials has been selected as the processed materials: titanium, iron, cobalt, nickel. Given that titanium is the most adhesive active material, the processed materials are represented by a group of industrial titanium alloys and less adhesive alloys based on iron and aluminum. Grinding was carried out with abrasive tools made of cubic boron nitride, silicon carbide and corundum. The condition of the treated surface was examined using a Versa 3D LoVac two-beam scanning electron microscope. To assess the intensity of the surface repletion, new indicators were used: the average relative area and the average relative amount of wear products of abrasive tools strongly adherent to the treated surface. It has been found that the grinding of all selected metals and alloys with tools made of various abrasive materials is accompanied by the repletion of the treated surface with wear products of abrasive tools. Strongly adherent particles are the wear products of an abrasive tool: abrasive material particles, a filler, mixtures and combinations of these products. When grinding metals with a CBN tool, the intensity of repletion decreases for Ti, Ni, Fe, Co and is consistent with a decrease in the intensity of contact interaction of the listed metals with the abrasive material. When grinding titanium alloys with a silicon carbide tool, the repletion intensity decreases from VT22 alloy to VT8 alloy.

**Keywords:** grinding, material transfer, repletion, repletion parameters, silicon carbide, corundum, cubic boron nitride (CBN)

**Acknowledgments:** The study was carried out with the financial support of Volgograd State Technical University (from the funds of the Priority 2030 development program under agreement No. 075-15-2025-063) within the framework of scientific project No. 45/649-24

**For citation:** Nosenko V.A., Kuznetsov S.P., Serdyukov N.D., Kharlamov V.O., Puzyrkova V. E. Surface repletion patterns for the surfaces treated by wear products of an abrasive tool under grinding / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 11 (173). P. 32-40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-32-40

### Введение

Абразивная обработка и шлифование, в частности, сопровождаются различными формами взаимопереноса материалов, обусловленных химическим, диффузионным, адгезионным и механическим взаимодействиями абразивных материалов и инструментов [1, 2]. Одной из форм переноса является шаржирование, в результате которого фрагменты абразивного материала, в общем случае, продукты износа абразивного инструмента внедряются в обрабатываемую поверхность [3].

При контакте с шаржированными поверхностями абразивные включения способны изменить состояние поверхностного слоя. Под внешним воздействием шаржированные частицы формируют новое состояние поверхности, что вносит непредсказуемость в работу изделия. Образовавшиеся на поверхности детали царапины, лунки и кратеры изменяют геометрические, механические и химические свойства материала, что в большинстве случаев сопровождается снижением параметров надежности изделий [4]. Шаржирование изменяет структуру поверхностного слоя,

увеличивая вероятность образования усталостных трещин [5].

Абразивные частицы являются очагами развития питтинговой или межкристаллической коррозии, увеличивают коэффициент трения и температуру в зоне контакта, оказывают существенное влияние на смазочную способность масел [6]. Внедренные абразивные частицы, обнаруженные на поверхности медицинских протезов, влияют на условия эксплуатации и безопасность работы изделий [7]. Шаржирование возможно при обычном и глубинном шлифовании [8, 9], на операциях полирования и доводки [10, 11].

В наибольшей степени шаржирование абразивных зёрен или их фрагментов в обрабатываемую поверхность исследовано в процессах гидро-пневмо-абразивной обработки [4]. К факторам, влияющим на шаржирование, относят материал, размер, форму и механические свойства частиц, скорость перемещения, угол атаки. Данные о влиянии размера частиц носят противоречивый характер, сообщается об отсутствии влияния размера частицы на шаржирование [12] и увеличении шаржирования с ростом размера частиц [13]. Наблюдается более интенсивное внедрение при совпадении вектора скорости с осью изометричной частицы, если форма частиц близка к сферической, интенсивность шаржирования снижается [13]. Интенсивность шаржирования коррелирует с углом атаки, имея максимальное значение при 90°. В меньшей степени шаржирование изучено при шлифовании.

Цель работы – экспериментальное изучение некоторых закономерностей

шаржирования продуктов износа абразивного инструмента при шлифовании различных металлов и сплавов.

### Методика исследований

Заготовки обрабатывали на прецизионном профилешлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III [14]. Обрабатываемые материалы, характеристики абразивных инструментов и режимы шлифования (скорости шлифования и продольной подачи, глубина шлифования, припуск) представлены в табл. 1.

В качестве обрабатываемых металлов выбраны химически чистые металлы, титановые сплавы, стали и алюминиевый сплав. Химически чистые металлы представлены группой переходных металлов Ti, Fe, Co, Ni, содержание основного элемента более 99,6%. Металлы отличаются электронным строением атомов, соответственно, комплексом механических, химических, адгезионных свойств и обрабатываемостью шлифованием [13]. Алюминиевый сплав Д16 относится к группе высокопрочных дюралюминиевых сплавов с повышенным содержанием меди. Стали представлены двумя наиболее распространенными марками: сталь Ст45 и подшипниковая сталь ШХ15. Размеры образцов сталей и сплавов 100×10×50 мм, для химически чистых металлов – 50×10×50 мм. Характеристики абразивных инструментов и режимы обработки приведены в табл. 1.

## 1. Инструменты и режимы шлифования

### 1. Tools and grinding modes

Материал	Характеристика абразивного инструмента	Режимы обработки			
		v, м/с	t, мм/ход	s, м/мин	z, мм
Химически чистые металлы: Ti, Fe, Co, Ni	CBN30B126MV	35	0,005	12	0,5
Ст45	24AF70J8V	30	0,02	15	5
ШХ15	24AF70J8V	30	0,025	15	5
Д16	54CF100F10V	30	0,02	20	4
BT22, BT3-1, OT4-1, BT6, BT8, BT9	54CF100G10V	30	0,005	12	0,5

Градационный уровень яркости объекта в обратно-рассеянных электронах пропорционален среднему атомному номеру, поэтому продукты износа абразивного материала, состоящие из лёгких элементов, выделяются на фоне металла. На основе этого явления разработан способ измерения интенсивности шаржирования, суть которого заключается в получении изображений шлифованной поверхности в режиме обратно-рассеянных электронов [15]. Для выделения продуктов износа на полутоновом изображении необходимо определить порог бинаризации, зависящий от пары абразив-материал. После бинаризации частички продуктов износа абразивного материала имеют черную окраску на светлом (белом) фоне обрабатываемого металла. Контрастность выделения продуктов износа абразивного материала на поверхности обрабатываемого металла возрастает с увеличением различия между атомным (средним атомным) номером обрабатываемого металла и абразивного материала. Например, атомный номер титана 22. Средний атомный номер кубического нитрида бора 6, карбида кремния и корунда 10. При прочих равных условиях, контрастность выделения КНБ на поверхности титана будет выше. При шлифовании железа, кобальта и никеля (атомные номера соответственно 26, 27 и 28) контрастность выделения фрагментов абразивного материала, в связи с увеличением атомного номера металла, возрастает.

Для определения параметров шаржирования переходных металлов после шлифования кругом из КНБ анализировали 10 фотографий обработанной поверхности площадью 6,67 мм<sup>2</sup>. Для определения параметров шаржирования титановых сплавов после обработки кругом из карбида кремния анализировали 60 изображений обработанной поверхности, также имеющих площадь 6,67 мм<sup>2</sup>. На полученных изображениях определяли количество и площадь шаржирующих включений абразивного инструмента, на основании которых рассчитывали среднюю площадь и среднее количество шаржирующих частиц,

приведенных к 1 мм<sup>2</sup> обработанной поверхности, обозначенные, соответственно,  $Sc_i$  (мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) и  $Sn_i$  (мм<sup>-2</sup>), где  $i$  – номер фотографии или анализируемой площади обработанной поверхности. По найденным значениям  $Sc_i$  и  $Sn_i$  определяли генеральные средние относительной площади  $Sc$  (мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) и относительного количества  $Sn$  (мм<sup>-2</sup>) шаржирующих частиц, приведенных к 1 мм<sup>2</sup> обработанной поверхности.

Погрешность определения внедренных продуктов износа абразивного инструмента зависит, в том числе, от состояния рельефа обработанной поверхности. В условиях данных исследований суммарная погрешность относительной площади шаржированных объектов не превышает 2 % для КНБ и 6 % для карбида кремния. Большее влияние субмикрорельеф оказывает на количество внедренных объектов. Погрешность определения количества шаржирующих продуктов износа абразивного инструмента при шлифовании инструментом из карбида кремния достигает 30 %, инструментом из КНБ – не более 7 %. Статистическую погрешность рассчитывали исходя из логнормального закона распределения анализируемых параметров [8].

### Результаты, обсуждение результатов

Пример бинаризации полутоновых изображений продуктов износа абразивного инструмента из КНБ на поверхности титана на рис. 1. По изображениям продуктов износа (рис. 1, а) строили гистограммы распределения градационных уровней яркости (рис. 1, б), отображающих число пикселей изображения и соответствующий им оттенок серого. Для различных пар абразив-металл находили градационный уровень яркости с минимальным числом пикселей в промежутке между темными пикселями, отображающими абразивный материал (КНБ, SiC) и светлыми пикселями, отображающими элементы рельефа поверхности металла. Полученный уровень яркости принимали в качестве порога бинаризации и получали изображение с выделенными

продуктами износа (рис. 1, в). Аналогичные исследования выполнены при увеличении 130 крат (рис. 1, з, д). Для поверхностей,

обработанных кругами из КНБ, порог бинаризации 65, из карбида кремния – 75.

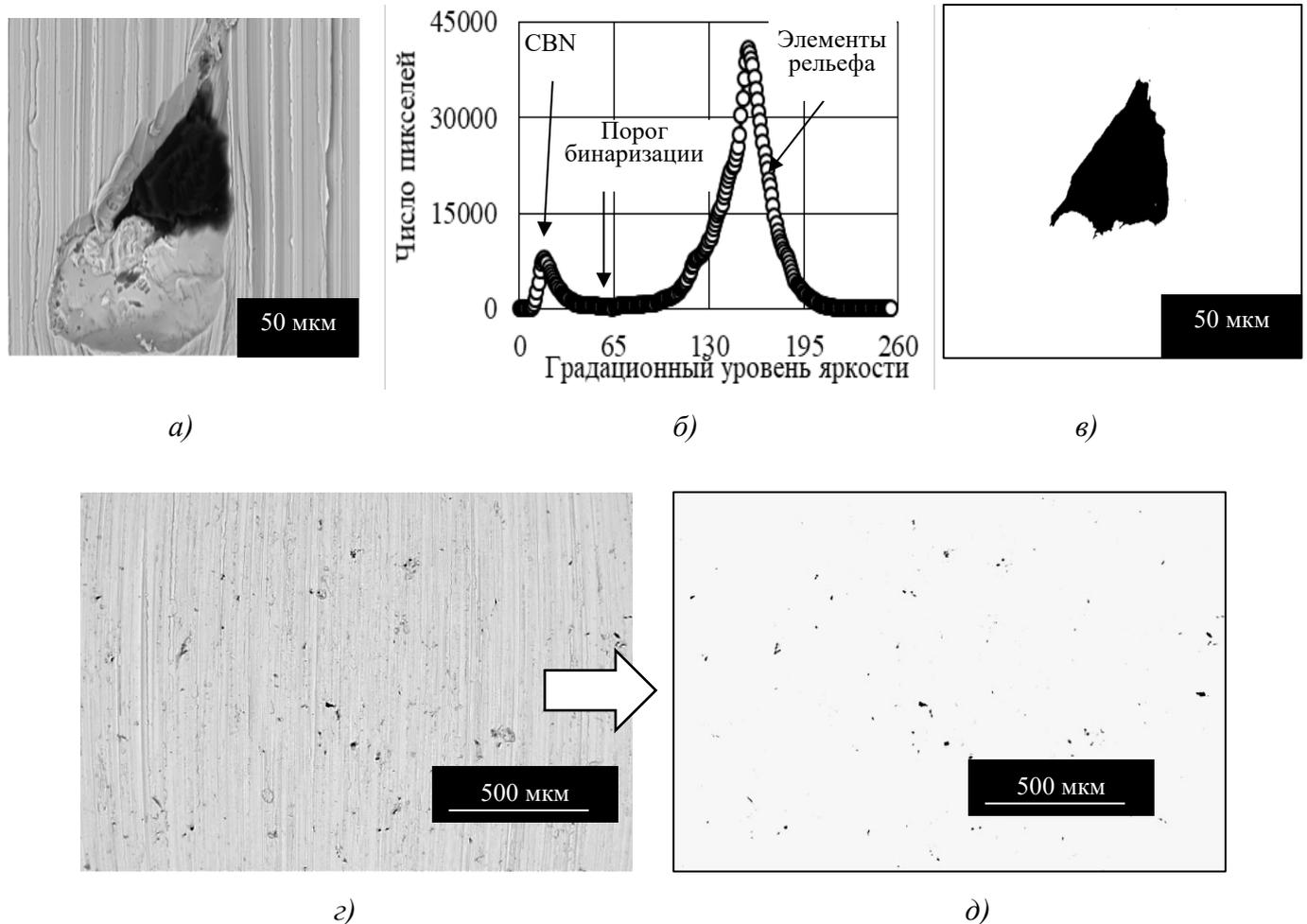
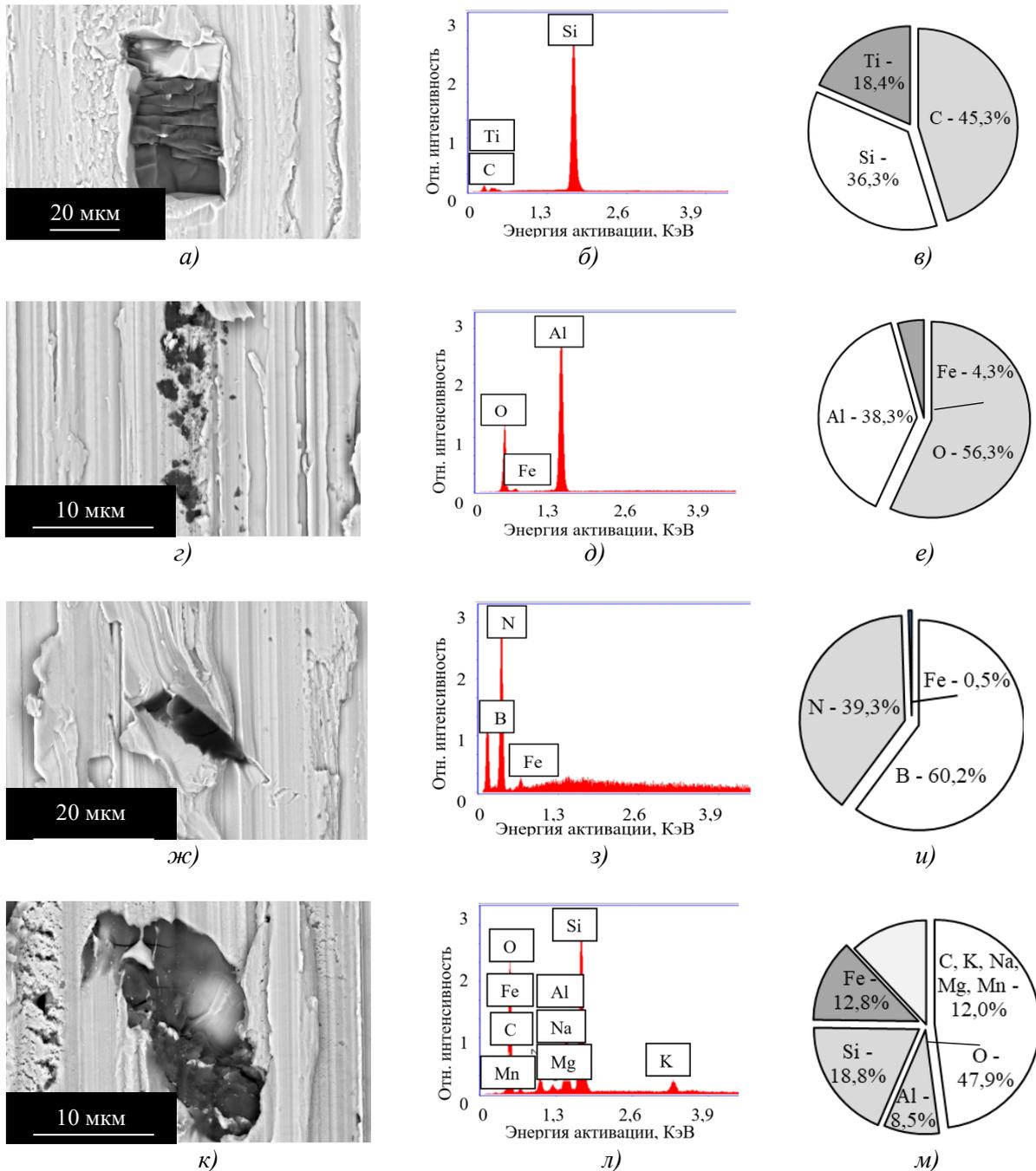


Рис. 1. Бинаризация полутонового изображения

Fig. 1. Binarization of a grayscale image

Изображения объектов, внедренных в обработанную поверхность, типовые спектрограммы и результаты количественного элементного анализа включений (круговые диаграммы) приведены на рис. 2. Установлено, что содержание химических элементов соответствует химическому составу соответствующих абразивных материалов: карбиду кремния (рис. 2, б, в), корунду (рис. 2, д, е), КНБ (рис. 2, з, и). На всех спектрограммах присутствуют химические элементы обрабатываемого металла (алюминий, титан, железо, кобальт, никель).

После шлифования абразивным инструментом из КНБ, в обработанной поверхности обнаружены фрагменты керамической связки (рис. 2, л, м) и корунд. В кругах из КНБ корунд используется в качестве наполнителя. Полученные спектрограммы корунда аналогичны спектрограммам на рис. 2, д. Фрагменты связки отличаются большим содержанием кислорода, кремния и алюминия. В состав так же входят натрий, калий, магний, марганец в количестве от 1 до 4 % ат., что соответствует рецептуре керамических связок, в состав которых входят:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ .



**Рис. 2. Абразивные частицы, шаржирующие поверхность: изображение частицы (а, з, ж, к); спектрограммы (б, д, з, л); круговые диаграммы количественного содержания химических элементов (в, е, и, м):**  
а – в – карбид кремния-VT22; з – е – корунд-St45; ж – и – КНБ-N; к – м – элементы связки-SHX15

**Fig. 2. Abrasive particles strongly adherent to the surface: particle image (a, c, g, k); spectrograms (b, d, z, l); pie charts of the quantitative content of chemical elements (c, e, i, m):**  
a – b – silicon carbide-VT22; g – e – corundum-St45; g – i – CBN-N; k – m – combination elements-SHX15

Встречаются единичные крупные кристаллы размером до 30 мкм, не покрытые металлом. Такие объекты, как правило, имеют следы перемещения, в отдельных случаях под углом к направлению главного движения. Часть продуктов износа абразивного инструмента может быть внедрена в поверхность

металла целиком, не выступая над поверхностью (рис. 2, к). Такое положение свидетельствует о взаимодействии частицы с абразивными зёрнами шлифовального круга, что возможно после скалывания в результате контакта с частью кристалла, оставшегося в связке, или с вершиной последующего зерна. Объекты

могут располагаться группами различных размеров. Шаржированные в обработанную поверхность продукты износа, расколовшиеся в результате внедрения в обрабатываемую поверхность на множество частиц приведены на рис. 2, *г* и 3, *е, ж, з*.

Другая характерная форма расположения продуктов износа (рис. 3, *в, ж*) отличается высокой концентрацией единичных зёрен на площади около 3000 мкм<sup>2</sup>. Как правило, в этом случае кристаллы внедрены в поверхность и могут располагаться вдоль направления главного движения. Большая часть внедренных продуктов износа абразивного инструмента представлена единичными включениями, которые полностью (рис. 3, *г*) или частично (рис. 3, *з*) покрыты металлом. Линейный размер видимой части включений от 0,5 до 2 мкм.

Представленные разновидности формы и расположения продуктов износа свойственны всем парам абразив-металл. Размер шаржированных включений во многом определяется интенсивностью износа абразивного инструмента. Например, на поверхности кобальта, коэффициент шлифования которого более 60, не обнаружено кристаллов КНБ более 5 мкм (рис. 3, *з*). На обработанных поверхностях сталей размер шаржированных кристаллов корунда достигает 20 мкм (рис. 2, *к*, рис. 3, *б*). После шлифования титановых сплавов абразивным инструментом из карбида кремний обнаружены кристаллы карбида кремния с линейными размерами около 30 мкм. При шлифовании титана инструментом из КНБ продукты износа абразивного инструмента, шаржированные в обработанную поверхность, достигали 20 мкм (рис. 3, *д*).

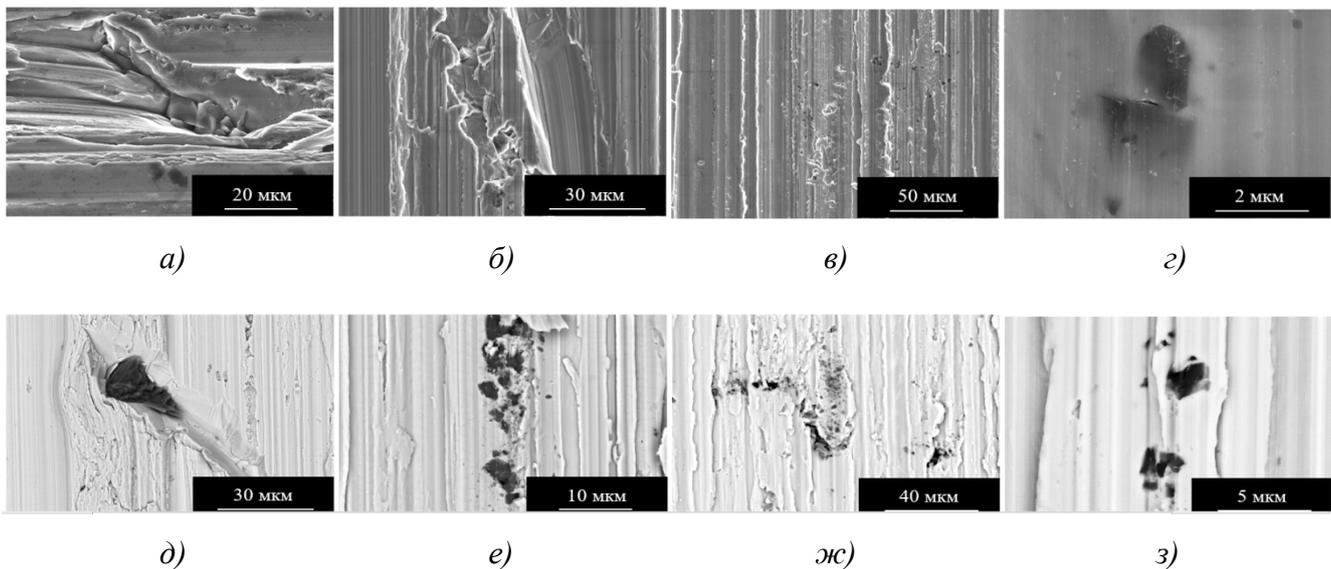


Рис. 3. Изображения продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность полученные в режиме: вторичных электронов (*а, б, в, г*); обратно-рассеянных электронов (*д, ж, з*):  
*а* – D16; *б* – Fe; *в* – ШХ15; *г* – Ti; *д* – Ti; *е* – Ст45; *ж* – ШХ15; *з* – Co

Fig. 3. Images of wear products strongly adherent to the treated surface obtained in the mode of: secondary electrons (*a, b, c, d*); reversibly scattered electrons (*e, w, h*):  
*a* – D16; *b* – Fe; *c* – WX15; *d* – Ti; *д* – Ti; *е* – St45; *в* – SHX15; *з* – Co

Из анализа морфологии шаржирующих частиц следует, что фактором, во многом определяющим интенсивность шаржирования, является износ шлифовального круга. Условия шлифования влияют на количество, размер и форму продуктов износа, вероятность их внедрения и удаления с обработанной поверхности.

При шлифовании химически чистых металлов средняя относительная площадь внедренных частиц  $S_c$  (мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup>) снижается в

направлении от Ti к Ni, Fe, Co в пропорции 1:3; 7:7; 7:73. Среднее приведенное количество шаржирующих частиц  $S_n$  (мм<sup>2</sup>) снижается в той же последовательности, пропорция представлена соотношением 1:1; 5:3; 5:29,5.

При шлифовании титановых сплавов  $S_c$  снижается от сплава ВТ22 к сплаву ВТ8. В связи с тем, что в группе сплавов ВТ6, ВТ3-1, ВТ9, ОТ4-1 средние значения  $S_c$  между сплавами не имеют значимого отличия, сравнительный анализ сделан для двух сплавов ВТ22 и

ВТ8. Графики распределения площади шаржированных включений продуктов износа абразивного инструмента из карбида кремния  $S_c$  при шлифовании сплавов ВТ22 и ВТ8 на рис. 4. На поверхности сплава ВТ22 размеры внедренных частиц заметно больше, чем на поверхности ВТ8. В результате среднее значение параметра  $S_c$  при шлифовании сплава ВТ22 в 3,2 раза больше, чем при шлифовании сплава ВТ8. Существенно отличаются и предельные значения выборок: максимальная площадь шаржированных включений на сплаве ВТ22 в 2,5 раз больше, минимальная площадь – почти в 9 раз. Распределения  $S_c$  для обоих сплавов асимметричные с удлиненной левой ветвью.

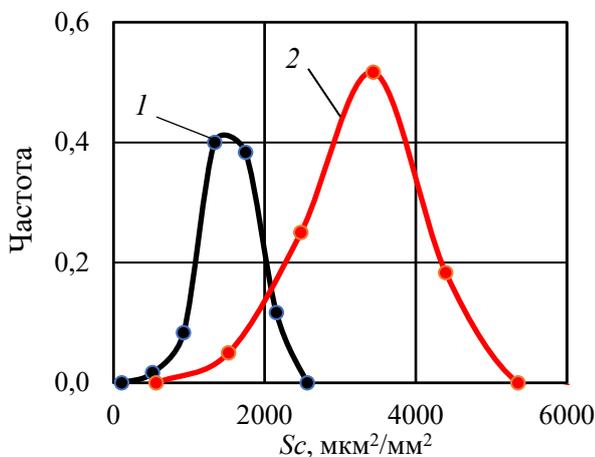


Рис. 4. Плотность распределения площади  $S_c$  шаржирующих продуктов износа абразивного инструмента из карбида кремния при шлифовании сплавов ВТ8 (1) и ВТ22 (2)

Fig. 4. Area distribution density  $S_c$  of the strongly adherent wear products of an abrasive tool made of silicon carbide during grinding of alloys VT8 (1) and VT22 (2)

### Выводы

Установлено, что шлифование стали, алюминиевого и титановых сплавов, химически чистых металлов инструментами из различных абразивных материалов (карбид кремния, корунд, кубический нитрид бора) сопровождается шаржированием обработанной поверхности продуктами износа абразивных инструментов. На основе рентгеноспектрального микроанализа установлено, что внедренные частицы являются фрагментами абразивных материалов, наполнителя, связки и сочетаниями указанных продуктов.

При шлифовании химически чистых металлов кругом из КНБ интенсивность шаржирования, оцениваемая средней приведенной площадью  $S_c$ , мкм<sup>2</sup>/мм<sup>2</sup> и средним

приведенным количеством  $S_n$ , мм<sup>2</sup> частиц продуктов износа абразивных инструментов, снижается в направлении Ti, Ni, Fe, Co для показателя  $S_c$  в пропорции 1:3; 7:7; 7:73, для показателя  $S_n$  в пропорции 1:1; 5:3; 5:29,5 и согласуется с уменьшением интенсивности контактного взаимодействия перечисленных металлов с абразивным материалом.

При шлифовании титановых сплавов кругом из карбида кремния наблюдается тенденция снижения средней площади шаржированных продуктов износа абразивного инструмента в направлении от сплава ВТ22 к сплаву ВТ8 –  $S_c$  снижается в 3,2 раза.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога: под общ. ред. А.Г. Суслова. Москва: Издательство «Инновационное машиностроение», 2019. 800 с. ISBN 978-5-907104-23-5. EDN WNWHDF.
2. **Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В., Харламов В.О.** Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микропаянии тугоплавких металлов // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 10 (76). С. 9–17. EDN ZSQEXD.
3. **Holmberg J., Fast Berglund J., Wretland A., Klason A., Persson R.** Milling or grinding for manufacturing of an Alloy 718 gas turbine component? A comparison of surface integrity and productivity. // Procedia CIRP. 2024. Vol. 123. P. 7–12. 10.1016/j.procir.2024.05.004.
4. **Ali A., Khan A., Ali M.** Effect of Process Parameters on Abrasive Contamination during Water Abrasive Jet Machining of Mild Steel. // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 264–265. P. 1015–1020. 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1015.
5. **Kosa E., Gökşenli A.** A mathematical model for erosive abrasive wear analysis by using abrasive size and material hardness // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. 2023. Vol. 19 No. 6. P. 1376–1386. <https://doi.org/10.1108/MMMS-12-2022-0286>
6. **Kim A., Kainuma S., Yang M.** Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting // Metals. 2021. 11. 2065. 10.3390/met11122065.
7. **Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A.** The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 369–374. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369. EDN IBKTBP.
8. **Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Кузнецов С.П., Харламов В.О.** Интенсивность шаржирования титанового сплава продуктами износа инструмента из карбида кремния при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 1. С. 108–117. DOI 10.31857/S0235711925010139. EDN EPMIKC.
9. **Smielak B., Klimek L.** The Influence of Material Type and Hardness on the Number of Embedded Abrasive Particles during Airborne-Particle Abrasion // Materials. 2022. 15. 2794. 10.3390/ma15082794.
10. **Li H., Zhang Z., Shi C., Zhou H., Feng J., Tong D., Meng F.** Novel green chemical mechanical polishing by controlling pH values and redox reaction for achieving atomic surface of a nickel alloy // Applied Surface

Science. 2024. 657, 159787. <https://doi.org/10.1016/j.ap-susc.2024.159787>

11. **Guo J., Qin P., Li Q., Zhu X., Dai G., Wang C., Cheung C. F.** A new magnetic enhanced chemical mechanical polishing method for quartz glass slender holes // Journal of Materials Processing Technology. 2024. 327, 118361. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118361>

12. **Dube N., Hutchings I.** Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel // Wear. 1999. Vol. 233. P. 246–256.

13. **Bremerstein T., Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel C., Uhlmann E., Blug B., Amann T.** Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results // Wear. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51. 10.1016/j.wear.2015.08.013.

14. **Носенко В.А., Белухин Р.А., Фетисов А.В., Морозова Л.К.** Испытательный комплекс на базе прецизионного профилировального станка с ЧПУ CHEVALIER модели smart-B1224 III // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). С. 35–39. EDN VYWZTN.

15. **Патент РФ № 2768518** C1, МПК G01N 19/08, G01N 23/04, G01N 23/18. Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов: № 2021114763: заявл. 25.05.2021; опублик. 24.03.2022 / В. А. Носенко, С. П. Кузнецов, Н. Д. Сердюков.

## REFERENCES

1. **Technologist's Handbook:** under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Publishing House "Innovative Mechanical Engineering", 2019. 800 p. ISBN 978-5-907104-23-5. EDN WNWDF.

2. **Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V., Kharlamov V.O.** Intensity of contact interaction and material transfer during grinding and microscratching of refractory metals // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017, no. 10 (76). pp. 9–17. EDN ZSQEXD.

3. **Holmberg J., Fast Berglund J., Wretland A., Klason A., Persson R.** Milling or grinding for manufacturing of an Alloy 718 gas turbine component? A comparison of surface integrity and productivity. // Procedia CIRP. 2024. Vol. 123. P. 7–12. 10.1016/j.procir.2024.05.004.

4. **Ali A., Khan A., Ali M.** Effect of Process Parameters on Abrasive Contamination during Water Abrasive Jet Machining of Mild Steel. // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 264–265. P. 1015–1020. 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1015.

5. **Kosa E., Gökşenli A.** A mathematical model for erosive abrasive wear analysis by using abrasive size and

material hardness // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. 2023. Vol. 19 No. 6. P. 1376–1386. <https://doi.org/10.1108/MMMS-12-2022-0286>

6. **Kim A., Kainuma S., Yang M.** Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting // Metals. 2021. 11. 2065. 10.3390/met11122065.

7. **Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A.** The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 369–374. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369. EDN IBKTBP.

8. **Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Kuznetsov S.P., Kharlamov V.O.** The intensity of titanium alloy repletion by wear products of silicon carbide tools under grinding // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2025. no. 1. pp. 108–117. DOI 10.31857/S0235711925010139. EDN EPMIKC.

9. **Smielak B., Klimek L.** The Influence of Material Type and Hard-ness on the Number of Embedded Abrasive Particles during Airborne-Particle Abrasion // Materials. 2022. 15. 2794. 10.3390/ma15082794.

10. **Li H., Zhang Z., Shi C., Zhou H., Feng J., Tong D., Meng F.** Novel green chemical mechanical polishing by controlling pH values and redox reaction for achieving atomic surface of a nickel alloy // Applied Surface Science. 2024. 657. 159787. <https://doi.org/10.1016/j.ap-susc.2024.159787>

11. **Guo J., Qin P., Li Q., Zhu X., Dai G., Wang C., Cheung C. F.** A new magnetic enhanced chemical mechanical polishing method for quartz glass slender holes // Journal of Materials Processing Technology. 2024. 327, 118361. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118361>

12. **Dube N., Hutchings I.** Influence of particle fracture in the high-stress and low-stress abrasive wear of steel // Wear. 1999. Vol. 233. P. 246–256.

13. **Bremerstein T., Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel C., Uhlmann E., Blug B., Amann T.** Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results // Wear. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51. 10.1016/j.wear.2015.08.013.

14. **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.

15. **RF Patent No. 2768518** C1, IPC G01N 19/08, G01N 23/04, G01N 23/18. Method for determining the degree of metal surfaces repletion with abrasive grains from superhard abrasive materials: No. 2021114763: application 05/25/2021: published 03/24/2022 / V.A. Nosenko, S.P. Kuznetsov, N. D. Serdyukov.

**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 03.08.2025; одобрена после рецензирования 30.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 03.08.2025; approved after reviewing 30.08.2025; assepted for publication 10.09.2025.