

УДК 621.92

DOI:10.30987/2223-4608-2021-11-42-48

**В.А. Носенко**, д.т.н., **А.В. Фетисов**, к.т.н., **С.П. Кузнецов**, аспирант  
(Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Россия, Волгоградской обл., г. Волжский, ул. Энгельса, 42а)  
E-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

## **Морфология поверхности сплавов d-переходных металлов IV периода после шлифования кругом из кубического нитрида бора\***

*Проведены исследования при шлифовании сплавов на основе титана, ванадия, хрома, железа, кобальта и никеля. По состоянию обработанной поверхности сплавы разделены на группы. Исследованы закономерности изменения параметров шероховатости Ra и Rsm. Введен параметр средней плотности вершин зерен, формирующих элементы профиля шероховатости поверхности, показана связь введенного параметра с Ra. Установлено, что при шлифовании всех сплавов происходит шаржирование обработанной поверхности продуктами износа абразивного инструмента. Приведены электронные фотографии объектов. Определены возможные размеры внедренных кристаллов.*

**Ключевые слова:** сплавы металлов; шлифование; кубический нитрид бора; морфология; шероховатость; шаржирование.

**V.A. Nosenko**, Dr. Sc.Tech., **A.V. Fetisov**, Can.Sc.Tech., **S.P. Kuznetsov**, postgraduate student  
(Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of the Volgograd State Technical University,  
42a, Engels str., Volzhsky, Volgograd Region, Russia, 404121)

## **Morphology of the surface of d-transition metal alloys of the IV period after CBN grinding**

*Studies have been carried out when grinding alloys based on titanium, vanadium, chromium, iron, cobalt and nickel. According to the condition of the neat surface, the alloys are divided into groups. The regularities of changes in the roughness parameters of Ra and Rsm are investigated. The parameter of the average density of the peaks of the grains forming the elements of the surface roughness profile has been introduced, the relationship of the introduced parameter with Ra is shown. It is established that when grinding all alloys, the treated surface is impregnated by the wear products of the abrasive tool. Electronic photographs of objects are given. The possible sizes of embedded crystals are determined.*

**Keywords:** metal alloys; grinding; CBN; morphology; roughness; impregnation.

Формирование поверхности металлов и площадки износа вершин зерен шлифовальных порошков при абразивной обработке во многом обусловлено упругопластическим деформированием и адгезионными процессами, возникающими при взаимодействии обрабаты-

ваемого и абразивного материалов. Одним из наиболее адгезионно-активных материалов четвертого периода периодической системы является титан, обладающий комплексом уникальных свойств [1], обеспечивающих, несмотря на плохую обрабатываемость [2], широкое распространение в различных отраслях промышленности. Из титановых сплавов изготавливают ответственные детали, к качеству

\* Исследования выполнены при поддержке РФФИ в рамках проекта №19-38-90322/19.

поверхности которых предъявляют высокие требования, что определяет повышенный интерес к исследованию процесса шлифования сплавов [2 – 5].

К числу наиболее исследованных металлов относятся также сплавы на основе железа [8, 9] и никеля [5 – 7, 10]. В меньшей степени исследован процесс шлифования ванадиевых, хромистых и кобальтовых сплавов, используемых в качестве основы сплавов специального назначения.

Существенное влияние на качество обработанной поверхности и другие показатели процесса шлифования оказывают смазочно-охлаждающие технологические среды [11] и режимы шлифования [12]. Например, величина остаточных напряжений в наибольшей степени зависит от продольной скорости подачи заготовки, микротвердость поверхностного слоя от радиальной подачи абразивного инструмента [4].

В связи с возрастающими требованиями к качеству обработанной поверхности наиболее перспективными направлениями научных исследований являются: создание новых марок сплавов, в том числе, на основе титана, ванадия, ниобия, кобальта, никеля и других металлов, обладающих уникальными свойствами; расширение областей применения инструмента из сверхтвердых материалов, обеспечивающего наиболее высокие показатели качества обработанной поверхности; повышение стойкости абразивного инструмента из сверхтвердых материалов за счет повышения способности абразивного материала к самозатачиванию.

Самозатачивание реализуется в результате скалывания микрообъемов абразивного материала с образованием новых режущих кромок. Продукты износа абразивного инструмента могут быть перенесены на обработанную поверхность и внедрены в поверхностный слой. Кристаллические продукты износа, шаржированные в обработанную поверхность, являются концентраторами напряжений, снижающие усталостную прочность материала, особенно для изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Тем не менее, исследования о переносе материала и шаржировании обработанной поверхности при шлифовании кругами из сверхтвердых материалов, в частности, из кубического нитрида бора находятся в начальной стадии своего развития.

Цель работы – исследование морфологии обработанной поверхности сплавов на основе титана, ванадия, хрома, железа, кобальта, ни-

кея и переноса материала абразивного при шлифовании кругом из кубического нитрида бора.

В качестве обрабатываемых материалов были выбраны следующие сплавы: ВТ1-00 (титан не менее 99,5 %); ВнМ-0 (V не менее 99,6 %); сплав ЭРХ-1 (Cr не менее 99,9 %); сталь 10895 (Fe 99,8 %); сплав К0 (Co не менее 99,9 %); сплав Н1 (Ni не менее 99,9 %). Учитывая, что концентрация основного химического элемента в сплавах составляет 99,5...99,9 %, перечисленные сплавы отнесены к техническим металлам. В тексте статьи сплавы обозначены по наименованию основного металла.

Шлифование выполняли на прецизионном профишлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III кругом из кубического нитрида бора 1A1 350×16×127×5 CBN30 В126 100 % М V на режиме: скорость шлифования – 35 м/с; скорость продольной подача стола – 12 м/мин; радиальная подача – 0,005 мм/х; припуск 0,5 мм. Образцы закрепляли в лекальных тисках. Размер площади обрабатываемой поверхности 50×8 мм. В качестве СОТС использовался водный раствор препарата Лукойл Фрео MS 3050 EP, концентрация препарата – 7 %; расход жидкости – 14 л/мин.

Состояние рельефа и химический состав в нанослоях контактируемых поверхностей исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе FEI Versa 3D LoVac. Шероховатость поверхности измеряли профилографом SurfTest SJ-410 по ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Подробная методика исследований приведена в работе [13].

На формирование поверхности влияет склонность металла к взаимодействию с абразивным инструментом, энергия активации процесса и окружающая среда. Как правило, чем выше адгезионная активность материала, тем более развита обработанная поверхность. Кроме царапин, оставленных вершинами зерен шлифовального круга, на поверхности могут встречаться налипы металла, перенесенные с рабочей поверхности абразивного инструмента, следы адгезионного взаимодействия. Исходя из этого, выбранные материалы можно разделить на 2 группы: с наиболее развитой и однородной структурой поверхности. Поверхности сплавов титана и ванадия (рис. 1, а, б) покрыты налипами, навалами, выглаженными участками.

Обработанная поверхность остальных металлов отличается однородной структурой, полученной динамическим копированием профиля рабочей поверхности абразивного инструмента, например, при шлифовании хрома (см. рис. 1, в).

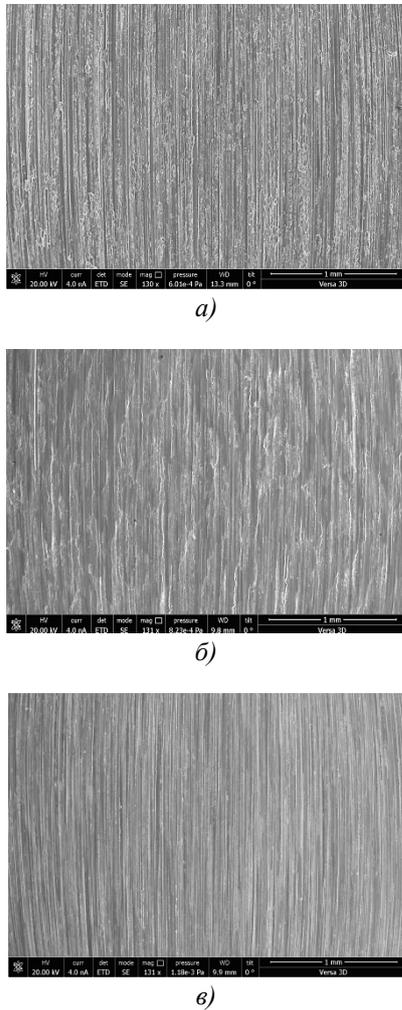


Рис. 1. Морфология обработанной поверхности: а – титан; б – ванадий; в – хром

Наименьшее значение среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности получено при шлифовании хрома, входящего в группу менее адгезионно активных металлов,  $Ra = 0,64$  мкм (рис. 2, а).

В этой группе металлов при шлифовании кобальта  $Ra$  возрастает в 1,6 раза, железа – почти в 2 раза, никеля – более чем в 2,5 раза. В группе адгезионно активных металлов наибольшее значение  $Ra$  получено при шлифовании титана – 1,72 мкм. На ванадии, по сравнению с титаном,  $Ra$  снижается на 35 % и соответствует значению, полученному при шлифовании железа.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что шероховатость обработанной по-

верхности зависит не только от адгезионной активности металла. Одним из важнейших шаговых параметров шероховатости поверхности является средняя ширина элементов профиля  $Rsm$ . Используя  $Rsm$ , можно оценить не только структурное состояние обработанной поверхности, но и структурное состояние рельефа рабочей поверхности шлифовального круга.

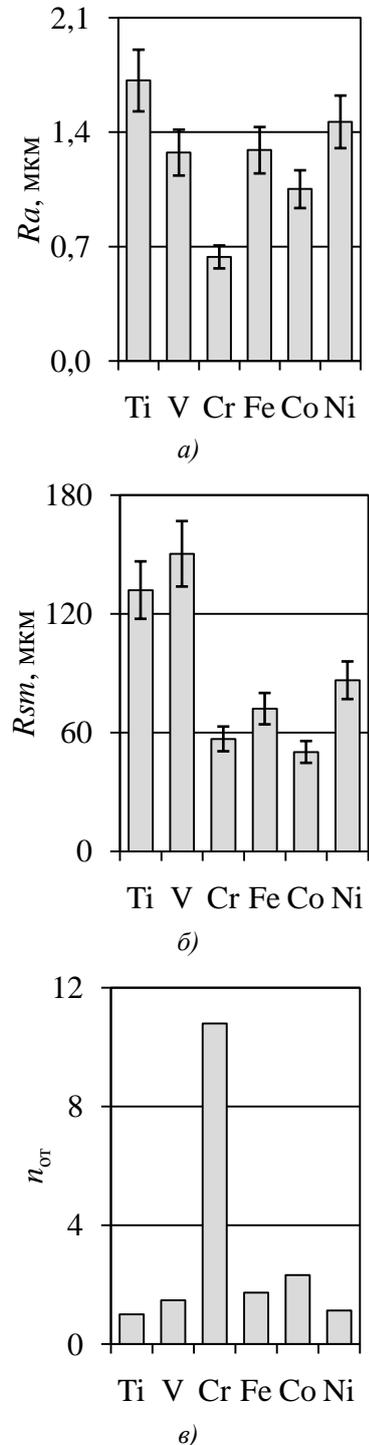


Рис. 2. Параметры шероховатости обработанной поверхности: а –  $Ra$ ; б –  $Rsm$ ; в – относительное среднее количество вершин зерен  $n_{от}$

Допускаем, что каждая впадина элемента профиля формируется наиболее выступающими вершинами зерен шлифовального круга. Одна вершина может сформировать только один элемент профиля. Количество вершин зерен, формирующих элементы профиля шероховатости на одном миллиметре длины профиля (высоты круга или ширины обработанной поверхности):

$$n_s = \frac{1000}{RSm} \text{ (мм}^{-1}\text{)}. \quad (1)$$

Шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  будет зависеть от плотности распределения таких вершин по высоте профиля. Очевидно, что чем выше плотность распределения, тем меньше  $Ra$ . В первом приближении плотность распределения вершин зерен оценим их средним количеством на 1 мкм максимальной высоты профиля  $Rz$ :

$$n_{sm} = \frac{n_s}{Rz} \text{ (мм}^{-1}\text{мкм}^{-1}\text{)}. \quad (2)$$

Согласно результатам исследований (см. рис. 2, б), максимальные значения  $Rsm$  получены при шлифовании адгезивно активных металлов (титан и ванадий), минимальные – при шлифовании более инертных (хром; кобальт; железо; никель). Средняя плотность вершин зерен на максимальной высоте профиля  $Rz$  на рис. 2, в представлена относительным показателем  $n_{от}$ , представляющим собой отношение текущего  $n_{sm}$  к наименьшему (в рассматриваемом примере –  $n_{sm}$  при шлифовании хрома).

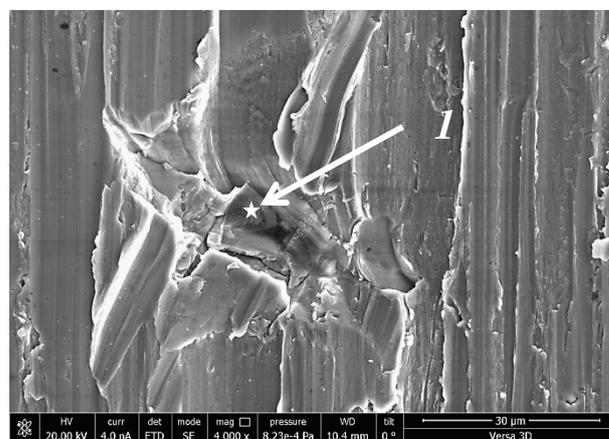
Минимальная относительная средняя плотность вершин зерен абразивного инструмента, оставивших след на обработанной поверхности в виде элемента профиля шероховатости  $n_{от}$ , получена при шлифовании титана, максимальная – при шлифовании хрома (см. рис. 2, в). В порядке увеличения  $n_{от}$  металлы располагаются следующим образом: титан; никель; ванадий; железо; кобальт; хром. В такой же последовательности металлы располагаются в порядке снижения параметра  $Ra$  (см. рис. 2, а).

Абразивный инструмент из кубического нитрида бора склонен к самозатачиванию в результате скалывания микрообъемов абразивного материала и образования новых режущих кромок [14]. Отделившиеся продукты износа могут быть перенесены на обработанную поверхность.

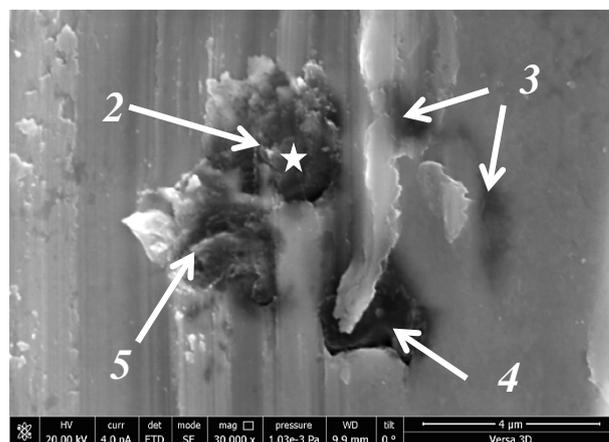
В результате исследования морфологии на

обработанной поверхности всех металлов обнаружены посторонние включения, которые отнесены к возможным продуктам износа абразивного инструмента (далее – продукты износа). Продукты износа представлены отдельными включениями или группой. Объекты могут быть частично или полностью внедрены в обработанную поверхность. Размеры объектов от долей микрона до величины, соизмеримой с зёрнами шлифовального круга.

В качестве примера на рис. 3, а показан продукт износа абразивного инструмента из кубического нитрида бора на поверхности ванадия. Длина видимого кристалла в направлении диагонали рисунка – 47 мкм, ширина – около 12 мкм.



а)



б)

Рис. 3. Продукты износа абразивного инструмента на поверхности:

а – ванадия; б – хрома

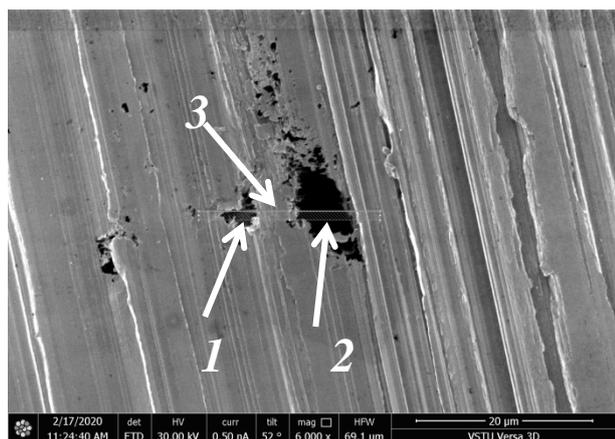
На рис. 3, б показано несколько фрагментов продуктов износа абразивного инструмента, обнаруженных на поверхности хрома. Фрагменты 2, 5 выступают над поверхностью металла, фрагмент 4 полностью вдавлен в металл

и частично прикрыт, очевидно, перенесенными на обработанную поверхность налипом металла или стружкой. Фрагменты 3 также полностью вдавлены в обработанную поверхность и покрыты металлом.

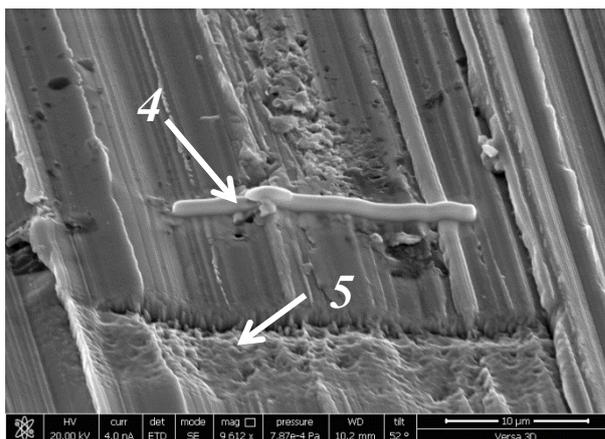
Химический состав продуктов износа определяли методом локального микрорентгеноспектрального анализа на участках поверхности, отмеченных звездочками (см. рис. 3). Установлено, что основными химическими элементами материала продуктов износа являются

ся бор и азот при одинаковой атомной доле химических элементов, что позволяет считать исследованные объекты кристаллами кубического нитрида бора.

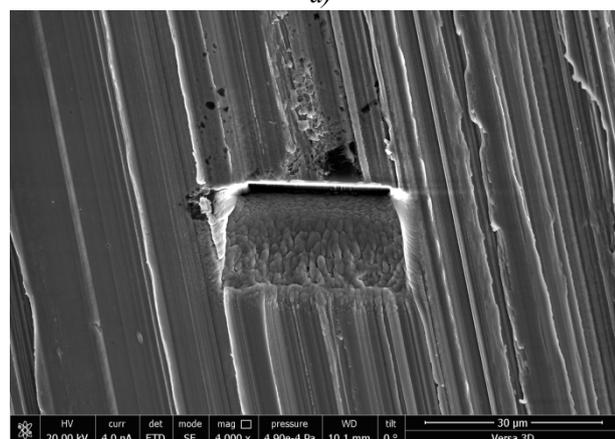
Продукты износа различных размеров могут быть сосредоточены на одном участке поверхности. Наиболее крупные видимые фрагменты объектов на рис. 4, а выделены стрелками 1 и 2. Например, длина и ширина видимой части объекта 2, соответственно, 8 и 4 мкм.



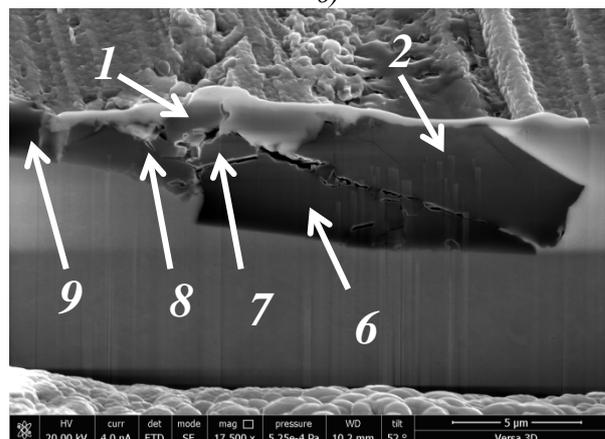
а)



б)



в)



г)

**Рис. 4. Этапы подготовки микросечения на поверхности кобальта:**

а – исходный вид сверху; б – нанесение платинового покрытия; в – вид готового сечения сверху; г – вид сечения под углом 52°

Микроскоп FEI Versa 3D LoVac оборудован двумя колоннами, что позволяет подготавливать микросечения методом травления непосредственно в камере микроскопа и проводить исследования поперечного сечения объектов с любым направлением среза. Для обеспечения качественного среза, исключающего завалы кромки на границе поверхности, на линию предполагаемого сечения 3 (см. рис. 4, а) наносят платиновое покрытие 4 (рис. 4, б). Травление поверхности осуществляется ионами галлия, направление плоскости сечения формируется перпендикулярно обработанной поверх-

ности.

Первый этап травления также показан на рис. 4, б. Стрелкой 5 выделена движущаяся в направлении к границе сечения линия ионного травления. Подготовка плоскости сечения осуществляется в два этапа: черновое травление и чистовое. На рис. 4, в показан вид поверхности травления в плане (вид сверху), на рис. 4, г – под углом 52°. Стрелками 1 и 2 показаны фрагменты продуктов износа абразивного инструмента, видимая часть которых выделена под теми же номерами на рис. 4, а. В действительности выделенные фрагменты яв-

ляются частями единого зерна кубического нитрида бора.

Некоторые сомнения вызывает более светлый фон фрагментов 1, 7 и 8 по сравнению с остальными. Для проверки высказанного предположения о принадлежности всех представленных фрагментов к единому целому, исследован их химический состав. Установлено, что все фрагменты содержат приблизительно в одинаковых атомных долях химические элементы бор и азот. В материале фрагментов 1, 7 и 8 атомные доли бора и азота составляют по 25 %, в остальных фрагментах – приблизительно по 40 %. Содержание кобальта снижается от фрагментов 1, 7, 8 к остальным с 40 до 4...10 %. Зона генерации рентгеновского характеристического излучения кобальта в кубическом нитриде бора достигает 3 мкм (при 20 кВт). Исходя из этого, можно предположить, что существенное снижение концентрации бора и азота, увеличение концентрации кобальта в материале фрагментов 1, 7, 8 по сравнению с остальными обусловлено их малой толщиной.

Таким образом, первоначально объект состоял не менее чем из семи фрагментов, соединенных в единое целое. Длина видимой части объекта около 22 мкм. Разделение объекта на отдельные фрагменты произошло при переносе на обработанную поверхность в результате соударения с другими вершинами зерен шлифовального круга.

### Выводы

1. На основании морфологического анализа поверхности *d*-переходных металлов и рабочей поверхности абразивного инструмента по степени уменьшения интенсивности адгезивно-когезионного взаимодействия с инструментом из кубического нитрида бора *d*-переходные металлы классифицированы на 2 группы: титан и ванадий; никель, хром, железо и кобальт.

2. Для оценки среднего арифметического отклонения профиля *Ra* металлов введена средняя плотность вершин зерен, формирующих элементы профиля шероховатости на 1 мкм максимальной высоты профиля *Rz*:  $n_{sm} = 1/(R_{sm} \cdot R_z)$ , мм<sup>-1</sup>мкм<sup>-1</sup>. Установлено, что для исследованных металлов среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости обработанной поверхности *Ra* снижается с увеличением  $n_{sm}$ .

3. При шлифовании всех исследованных металлов установлено внедрение продуктов

износа абразивного инструмента в обработанную поверхность. После шлифования кругом из кубического нитрида бора размеры продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность, изменяются от долей микрона до размера, соизмеримого с размерами шлифовального порошка абразивного инструмента.

4. Внедренные в обработанную поверхность продукты износа абразивного инструмента в результате соударения с вершинами зерен шлифовального круга подвергаются дальнейшему разрушению с образованием более мелких фрагментов. Реальный размер внедренных в поверхностный слой продуктов износа абразивного инструмента может в несколько раз превышать размер видимой части фрагмента.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Свойства** элементов: справочник / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия. – 1985. – 672 с.
2. **Nosenko, V.A., Nosenko, S.V., Puzirkova, V.E.** Grinding of Titanium Alloys // Key Engineering Materials. – 2021. – Vol. 887. – P. 287-293.
3. **Nosenko, V.A., Fetisov, A.V., Nosenko, S.V., Puzyrkova, V.E.** Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surface in Interaction with Titanium Alloy under Micro-Scratching Conditions // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 329. – Article number 02010.
4. **Zhao, T., Shi, Y., Sampsa, L., Zhou, J.** Investigation of the Effect of Grinding Parameters on Surface Quality in Grinding of TC4 Titanium Alloy // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 11. – P. 2131-2138.
5. **Xu, X., Yu, Y., Huang, H.** Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. – 2003. – Vol. 255. – № 7-12. – P. 1421-1426.
6. **Nosenko, V.A., Feyisov, A.V., Puzyrkova, V.Ye.** Morphology and chemical composition of silicon carbide surfaces interacting with iron, cobalt, and nickel in microscratching // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 363-368.
7. **Nosenko, V.A., Fetisov, A.V., Kuznetsov, S.P.** Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface // MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 329 (4). – Article number 03050.
8. **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. – Vol. 454-455. – Article number 203332.
9. **Nosov, N.V.** Investigation of impact of cutting oils on formation of surface defects during grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – Article number 022104.
10. **Miao, Q., Ding, W., Gu, Y., Xu, J.** Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of dif-

ferent nickel-based superalloys // *Wear*. – 2019. – Vol. 426-427. – P. 1624-1634.

11. Носенко, В.А., Ларионов, Н.Ф., Егоров, Н.И., Волков, М.П. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубокого шлифования // *Вестник машиностроения*. – 1989. – №5. – С. 17-21.

12. *Справочник технолога* / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

13. 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 // *Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*. – 2016. – №5 (184). – С. 35-39.

14. Macerol, N., Franca, L.F.P., Krajnik, P. Effect of the grit shape on the performance of vitrified-bonded CBN grinding wheel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 277. – Article number 116453.

## REFERENCES

1. Properties of elements, handbook, edited by M.E. Dritsa, M.: Metallurgy, 1985, 672 p.

2. Nosenko, V.A., Nosenko, S.V., Puzirkova, V.E. Grinding of Titanium Alloys // *Key Engineering Materials*, 2021, Vol. 887, P. 287-293.

3. Nosenko, V.A., Fetisov, A.V., Nosenko, S.V., Puzyrkova, V.E. Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surface in Interaction with Titanium Alloy under Micro-Scratching Conditions // *MATEC Web of Conferences*, 2020, Vol. 329, Article number 02010.

4. Zhao, T., Shi, Y., Sampsa, L., Zhou, J. Investigation of the Effect of Grinding Parameters on Surface Quality in Grinding of TC4 Titanium Alloy // *Procedia Manufacturing*, 2017, Vol. 11, P. 2131-2138.

5. Xu, X., Yu, Y., Huang, H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // *Wear*, 2003, Vol. 255, no. 7-12, P. 1421-1426.

6. Nosenko, V.A., Feyisov, A.V., Puzyrkova, V.Ye. Mor-

phology and chemical composition of silicon carbide surfaces interacting with iron, cobalt, and nickel in microscratching // *Solid State Phenomena*, 2018, Vol. 284, P. 363-368.

7. Nosenko, V.A., Fetisov, A.V., Kuznetsov, S.P. Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface // *MATEC Web of Conferences*, 2020, Vol. 329 (4), Article number 03050.

8. 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, Vol. 454-455, Article number 203332.

9. Nosov, N.V. Investigation of impact of cutting oils on formation of surface defects during grinding // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709, Article number 022104.

10. Miao, Q., Ding, W., Gu, Y., Xu, J. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys // *Wear*, 2019, Vol. 426-427, P. 1624-1634.

11. Nosenko, V.A., Larionov, N.F., Egorov, N.I., Volkov, M.P. The selection characteristics of the abrasive tool and the coolant for deep grinding // *Vestnik mashinostroeniya*, 1989, no. 5, pp. 17-21.

12. *Technologist's handbook* / under general editorship by A.D. Suslov, M.: Innovatsionnoye mashinostroenie, 2019, 800 p.

13. Nosenko, V.A. Belukhin, R.A., Fetisov, A.V., Morozova, L.K. Test complex based on precision profile grinding machine with CNC CHEVALIER model SmartB1224 // *Izvestia VolgogSTU. Ser. Progressivnie tehnologii v mashinostroenii*, Volgograd, 2016, no. 5 (184), pp. 35-39.

14. Macerol, N., Franca, L.F.P., Krajnik, P. Effect of the grit shape on the performance of vitrified-bonded CBN grinding wheel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 277. – Article number 116453.

Рецензент д.т.н.  
Сергей Михайлович Братан

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-910-293-62-96.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 15.11.2021. Выход в свет 30.11.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

12+