

УДК 621.921

Морфология поверхности карбида кремния после микроцарапания молибдена*

В.А. Носенко¹, А.В. Авилов¹, В.О. Харламов², В.И. Бахмат¹

¹ Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а

² ЦКП «ФХМИ» «Волгоградский государственный технический университет», 400005, Волгоград, пр. Ленина, д. 28

Morphology of the silicon carbide surface after micro cutting of molybdenum

V.A. Nosenko¹, A.V. Avilov¹, V.O. Kharlamov², V.I. Bakhmat¹

¹ Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University, 404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a

² Centre for Physicochemical Research Methods, Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Lenin Pr., Bldg. 28



e-mail: nosenko@volpi.ru, avilov@volpi.ru, harlamov_vo@mail.ru, vera.bakhmat@mail.ru



Вершина кристалла из карбида кремния зеленого имеет форму конуса с углом при вершине 120° и радиусом закругления 25...30 мкм. После микроцарапания молибдена на поверхности кристалла карбида кремния формируется площадка износа, покрытая почти параллельно расположенными микротрещинами, ширина которых достигает 0,4 мкм, глубина 3...5 мкм. Глубину микротрещин измеряли на вертикальной стенке микросечения, полученной методом ионного травления выбранного участка поверхности непосредственно в камере электронного микроскопа Versa 3D. Установлено, что молибден заполняет большинство трещин, образованных на площадке износа, проникая на глубину до 2...3 мкм при ширине трещины на границе проникновения металла около 40 нм. Наличие молибдена и глубина проникновения определены методом локального микрорентгеноспектрального анализа. На поверхности площадки износа возможно образование отдельных участков налипшего металла. Интенсивность переноса молибдена на площадку износа кристалла карбида кремния существенно меньше, чем при микроцарапании титана и ниобия.

Ключевые слова: карбид кремния, молибден, микроцарапание, площадка износа, морфология поверхности, электронный микроскоп.



The present research was carried out when molybdenum was micro cut by green silicon carbide crystals. The top of the crystal is cone-shaped with an apex angle of 120° and a radius of curve of 25–30 microns. After the micro cutting, a wear site is formed on the surface of the silicon carbide crystal that is covered with nearly parallel micro cracks. The width of the micro cracks is up to 0.4 microns, the depth is 3–5 microns. The depth of the micro cracks is measured on a micro cross-sectional vertical wall obtained by ion etching of a selected portion of the surface directly in the chamber of the electron microscope Versa 3D. It has been found that molybdenum fills the majority of the cracks formed at the wear site. It penetrates to the depth of 2–3 microns when the crack width at the metal penetration boundary is about 40 nm. The presence of molybdenum and the penetration depth is determined by lo-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-97043.

cal micro X-ray spectral analysis. The metal may adhere to the surface of the wear site and form patches. The rate of molybdenum transfer onto the wear site of the silicon carbide crystal is substantially less than when micro cutting titanium and niobium.

Keywords: silicon carbide, molybdenum, micro cutting, wear site, surface morphology, electronic microscope.

Молибден и его сплавы относятся к тугоплавким металлам и достаточно широко применяются в качестве конструкционных материалов. Из молибдена изготавливают различные детали самолетов и космических аппаратов. Сверхчистый молибден обладает сверхпроводимостью при температурах, близких к абсолютному нулю, и его используют для изготовления проводников. Молибден применяется в химической промышленности и атомной энергетике [1]. По прочностным свойствам молибден и его сплавы занимают второе место после вольфрама. Но удельная прочность молибдена, особенно при температурах менее 1 400 °С, оказывается выше вольфрама [2], что имеет большое значение при изготовлении деталей авиационной и космической техники.

Для абразивной обработки молибдена и его сплавов используют различные абразивные материалы. При шлифовании высокопрочных молибденовых сплавов применяют круги из карбида кремния и алмаза. При обработке технического молибдена, обладающего высокой пластичностью, можно использовать и электрокорунд, износостойкость которого в данном случае практически такая же, как и у карбида кремния [3].

Молибден расположен в 6В подгруппе пятого периода. В конденсированном состоянии электронная конфигурация атомов молибдена — $d^5 s^1$, что свидетельствует о ее достаточной атомной стабильности [4]. По интенсивности контактного взаимодействия с карбидом кремния молибден относится к группе относительно инертных металлов [5–7]. Тем не менее молибден способен вступать во взаимодействие с химическими элементами абразивных материалов, например кремнием, образуя силициды [8]. При шлифовании, когда контактные поверхности обрабатываемого и абразивного материалов подвергаются существенной активации, химическое взаимодействие возможно и между относительно инертными материалами.

Одним из качественных показателей интенсивности взаимодействия является состояние контактируемых поверхностей [9–12]. В условиях шлифования основные трудности возникают при оценке состояния поверхности кон-

такта вершин зерен, расположенных на рабочей поверхности абразивного инструмента. Поэтому контактное взаимодействие пары абразив–металл исследуют при моделировании процесса шлифования, например, методом микроцарапания специально подготовленными кристаллами [11–17].

Абразивные материалы, в частности карбид кремния, применяются и в качестве антифрикционных материалов [18]. Работа трения при царапании единичным кристаллом может достигать 95 % общей работы резания [19]. Учитывая высокие значения температуры и давления, возникающие при микроцарапании за время $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с, взаимодействие вершины зерна с металлом можно рассматривать как трение в экстремальных условиях, что усиливает научную и практическую значимость проводимых исследований.

Морфологию площадки износа вершины кристалла исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac.

В качестве абразивного материала использовали карбид кремния зеленый производства ОАО «Волжский абразивный завод». Из крупных кристаллов карбида кремния вырезали заготовки размером $2 \times 2 \times 5$ мм, вставляли в специальные оправки и закрепляли композиционным пломбирочным материалом. Вершину кристалла затачивали на конус с углом при вершине 120°.

Микроцарапание осуществляли на плоскошлифовальном станке по методике, изложенной в [11, 20]. Индентор (оправку с кристаллом) устанавливали в отверстие на периферии стального диска и поджимали винтом. Диаметр диска 235 мм. Радиус траектории вращения вершины индентора составлял 125 мм. Таким образом, была смоделирована работа единичного зерна шлифовального круга. Скорость вращения шпинделя шлифовального станка $n = 2\,740$ об/мин, что соответствует скорости резания 35 м/с.

В качестве обрабатываемого материала использовали молибденовый сплав марки МШЧ-2 (далее — молибден), содержащий не менее 99,77 % мас. основного металла (см. таблицу). Остальные химические элементы относятся к

Массовое содержание химических элементов в сплаве МШЧ-2, %

Mo	Fe	Al	N	Si	C	O	S	P	W
99,77	0,005	0,001	0,002	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004	0,2

примесям, из которых наибольшая доля приходится на W, расположенный, как и Mo, в подгруппе 6В. В состав примеси входят еще две группы элементов, не представленные в таблице: Mg, Zn, Cu, H, As и Pb, Sn, Cd, Bi. Массовое содержание каждого из перечисленных элементов первой группы не более 0,001 %, второй — не более 0,0001 %.

Поверхность образца молибдена перед микроцарапанием шлифовали кругом из кубического нитрида бора на бакелитовой связке 1А1 250×20×76,2×5 ЛКВ30В107100МВ. Шероховатость обработанной поверхности сплава Ra 0,15 мкм получали выхаживанием. Затем вместо эльборового круга в планшайбе закрепляли металлический диск с индентором. Микроцарапание осуществляли с продольной подачей стола на скорости 7 м/мин. Первоначальная глубина микроцарапания составляла 15 мкм.

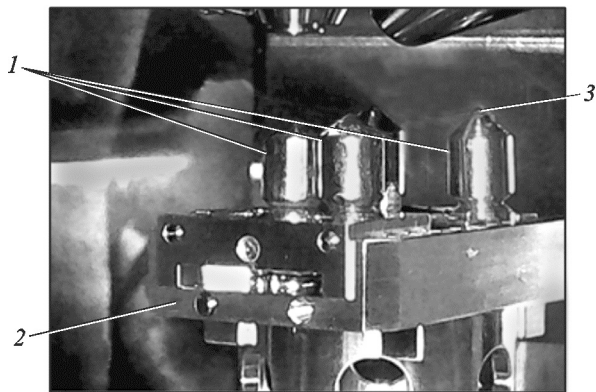


Рис. 1. Предметный столик с инденторами в камере двухлучевого электронного микроскопа Versa 3D

Подготовленные инденторы 1 устанавливали в струбцине на предметном столике 2, помещали в камеру электронного микроскопа и анализировали состояние площадки износа на вершине кристалла 3 после микроцарапания молибдена (рис. 1). Для получения объемного изображения состояния поверхности исследовали с различных сторон, поворачивая столик вокруг своей оси и наклоном в горизонтальной плоскости на угол до 60°.

После микроцарапания молибдена на поверхности кристалла карбида кремния формируется площадка износа диаметром 220...230 мкм (рис. 2, а). Если рассматривать вершину кристалла как режущее лезвие, площадка износа будет ее задней поверхностью. Левая часть площадки износа покрыта налипшим металлом 1.

Направление движения вершины кристалла в главном движении резания справа налево. Тогда коническая поверхность вершины кристалла, прилегающая к левой части полуокружности площадки износа, будет передней поверхностью, по которой сходит стружка 2.

Площадка износа покрыта микротрещинами большого и малого размеров, заполненных молибденом. Трещины ориентированы в одном направлении приблизительно под углом 25...30° относительно вертикали. Ширина трещины 1 в месте, указанном стрелкой (рис. 2, б), достигает 400 нм, ширина трещин 2 и 3 составляет около 32 и 24 нм. На поверхности площадки износа различимы и более мелкие трещины.

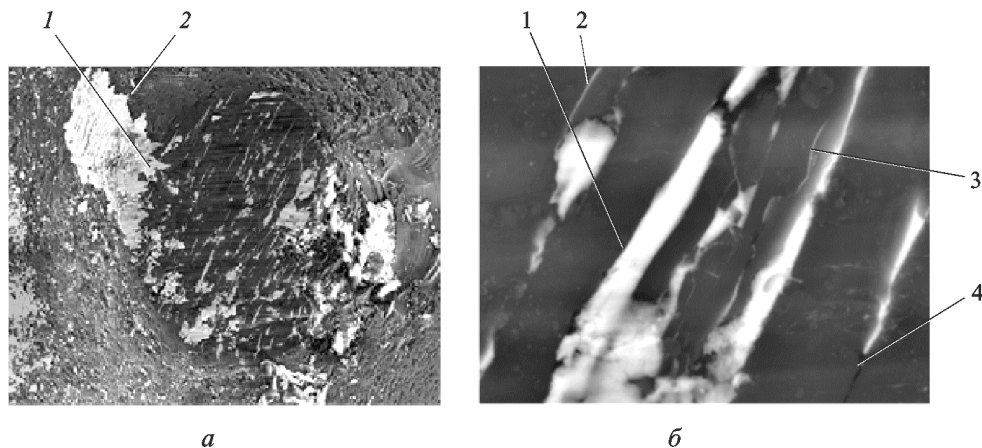


Рис. 2. Площадка износа кристалла карбида кремния:
а — ×1000, α = 0°; б — ×50 000, α = 0°

Большинство трещин, даже очень мелких, заполнены металлом. Тем не менее можно выделить и трещины, в которых металл отсутствует, например, трещина 4, но их количество намного меньше.

В отдельных участках поверхности присутствуют налипсы металла, но в целом перенос металла на поверхность карбида кремния при микроцарапании молибдена существенно меньше, чем при микроцарапании титана [15, 16] или ниобия [17].

Поверхность площадки износа после удаления налипшего металла травлением в растворе азотной кислоты показана на рис. 3, а. Положение площадки износа несколько отличается от ее положения на рис. 2. Если на рис. 2 продольные линии почти параллельны горизонтали, то на рис. 3 они составляют с горизонталью угол около 20° . Это объясняется различной исходной ориентацией площадки износа.

Скол 1 (см. рис. 3, а), образовавшийся в правой части площадки износа, распространяется и на коническую поверхность кристалла 2. Длина скола по образующей конической поверхности составляет более 200 мкм.

При увеличении $10\,000\times$ и наклоне площадки износа (рис. 3, б) продольные линии, совпадающие с направлением движения кристалла, становятся более рельефными. Волнообразное формирование поверхности площадки износа является результатом механического истирания карбида кремния при микроцарапании молибдена. Ширина выступа А, выделенного на рис. 3, б, составляет около 1,9 мкм.

Практически вся поверхность площадки износа покрыта продольными трещинами, располагающимися под углом около 20° к вертикали, которые выделяются в отдельные блоки [21]. Толщина блоков, например, 1 и 2 приближается

соответственно к 0,6 и 0,3 мкм. На некоторых блоках имеются трещины, почти перпендикулярные к ранее рассмотренным, в частности трещина 3.

В результате многократно повторяющихся контактов с металлом происходит хрупкое разрушение площадки износа. Например, размер выкрашиваний 4 и 5 составляет соответственно около 0,3 и 32 мкм².

Методом ионного травления получено микросечение площадки износа (рис. 4, а). Предварительно на выбранный участок поверхности наносили слой платинового покрытия 1. В результате чернового травления на поверхности площадки износа образуется углубление, по форме напоминающее прямоугольную призму с треугольным основанием. Полировка вертикальной стенки, т. е. окончательная подготовка поверхности шлифа к проведению морфологического анализа, выполнена на чистовом режиме травления.

Микрошлиф проходит через две трещины 2 и 3. Ширина трещины 3 заметно больше трещины 2. Глубина трещины 3 составляет около 4,5 мкм, трещины 2 — 2,7 мкм. Трещина 3 на глубину около 2,6 мкм заполнена молибденом. Толщина трещины на границе проникновения металла составляет около 40 нм.

Наличие в трещине молибдена подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа в точках, изображенных на рис. 4, а. Точки 1 и 2 выбраны на трещине 2, внешний вид которой позволяет говорить об отсутствии металла. Точки 3–5 расположены на трещине 3. Точка 3 выбрана на участке, заполненном металлом, точка 4 — на визуальной границе проникновения металла в трещину, точка 5 — на участке в конце трещины.

Энергия рентгеновского характеристичес-

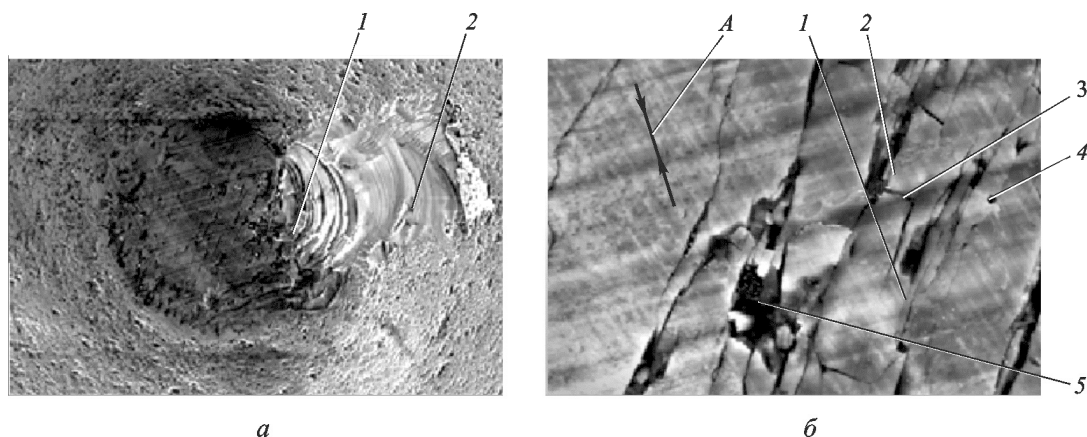


Рис. 3. Площадка износа после травления налипшего молибдена в растворе азотной кислоты: а — $\times 800$, $\alpha = 0^\circ$; б — $\times 10\,000$, $\alpha = 38^\circ$

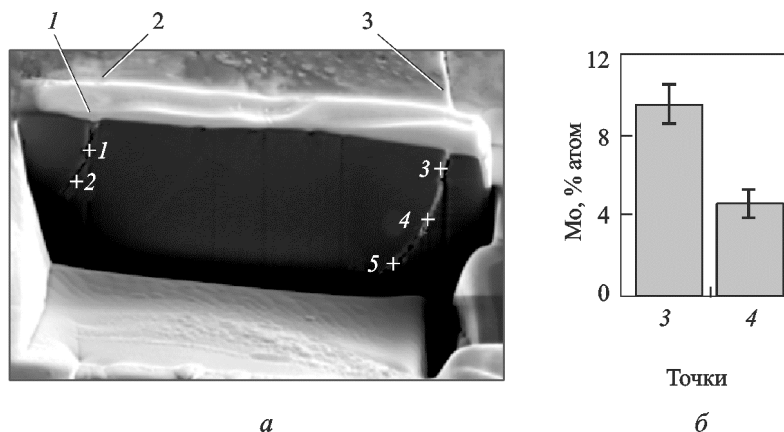


Рис. 4. Микросечение с точками химического микроанализа (а) и диаграмма концентрации молибдена в точках 3 и 4 (б)

кого возбуждения электронов атома молибдена: $Mo K\alpha = 17,481$ эВ, $Mo L\alpha = 2,293$ эВ. В целях повышения чувствительности измерения концентрации химических элементов в тонких химически модифицированных слоях необходимо использовать минимальное напряжение активации. С другой стороны, с уменьшением напряжения происходит повышение уровня шума, что снижает чувствительность. Поэтому энергия возбуждения должна быть не менее, чем в 2 раза выше энергии активации. Исходя из этого, ускоряющее напряжение электронов активации принято равным 5 кВ, что соответствует интенсивности излучения $Mo L\alpha$ [22].

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в трещине 2 металла нет. Молибден содержится только в точках 3 и 4 (рис. 4, б). Причем концентрация молибдена на границе заполнения трещины (точка 4) приблизительно в

два раза меньше, чем в точке 3. В точке 5 молибден отсутствует.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

После микроцарапания молибдена кристаллом карбида кремния на вершине кристалла формируется относительно плоская площадка износа с отдельными участками налипшего металла. Интенсивность переноса металла при микроцарапании молибдена меньше, чем при микроцарапании титана и ниобия.

По границам блоков на поверхности площадки износа образуются микротрещины, ориентированные в одном направлении.

В отличие от титана и ниобия молибден способен проникать в образовавшиеся микротрещины. При глубине микротрещин 3...5 мкм глубина проникновения металла достигает 2...3 мкм.

Литература

- [1] Лыкасов А.А., Рысс Г.М., Жихарев В.М. *Металлургия вольфрама и молибдена*. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2007. 78 с.
- [2] Полторацкий Л.М., Юрьев А.Б., Сидорова О.Д., Громов В.Е. *Методы исследования микроструктуры и механических свойств металлов и сплавов*. Новокузнецк, СибГИУ, 2008. 162 с.
- [3] Носенко В.А. *Шлифование адгезионно-активных металлов*. Москва, Машиностроение, 2000. 262 с.
- [4] Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. *Электронная локализация в твердом теле*. Москва, Наука, 1976. 339 с.
- [5] Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов при шлифовании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2001, № 5, с. 85–91.
- [6] Носенко В.А. К вопросу об интенсивности контактного взаимодействия d-переходных металлов с карбидом кремния при шлифовании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2002, № 5, с. 78–84.
- [7] Носенко В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2005, № 1, с. 73–77.

- [8] Geib K.M., Wilson C., Long R.G., Wilmsen C.W. Reaction between SiC and W, Mo, and Ta at elevated temperatures. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68 (6), pp. 2796–2800.
- [9] Абдуллаев О.Р., Габельченко А.И., Иванников П.В., Якунин А.С. Исследование кубического нитрида бора методами ЦКЛ и ЦКЛВСП в растровом электронном микроскопе. *Наукоемкие технологии*, 2013, т. 14, № 11, с. 084–088.
- [10] Кондрашов В.А., Розанов Р.Ю., Неволин В.К., Царик К.А. Исследование морфологии поверхности карбида кремния 6H-SiC после высокотемпературного травления в восстановительной среде. *Известия высших учебных заведений. Электроника*, 2014, № 5 (109), с. 24–32.
- [11] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2014, № 3, с. 66–71. URL: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf> (дата обращения 15 апреля 2015).
- [12] Носенко В.А., Авилов А.В., Морозов А.В., Бахмат В.И. Электронно-микроскопические и микрорентгеноспектральные исследования площадки износа карбида кремния после микроцарапания кобальта. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15418> (дата обращения 3 апреля 2015).
- [13] Носенко В.А., Авилов А.В., Афанасьева К.В., Бахмат В.И. Исследование поверхности карбида кремния после взаимодействия с кобальтом при микроцарапании. *Новый университет. Серия: Технические науки*, 2014, № 9(31), с. 68–71. URL: http://www.universityjournal.ru/docs/TN_9_14.pdf (дата обращения 10 апреля 2015).
- [14] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Микрорентгеноспектральные исследования поверхности корунда после микроцарапания титана. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2014, т. 12, № 21(148), с. 29–32.
- [15] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Структура и химический состав поверхности карбида кремния после микроцарапания титана. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2014, № 4, с. 14–20. URL: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-4-3.pdf> (дата обращения 3 апреля 2015).
- [16] 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. Сер. Машиностроение*, 2015, т. 15, № 1, с. 69–79.
- [17] Носенко В.А., Авилов А.В., Кудряшова А.В., Амиралиева Е.А. Морфология поверхности карбида кремния после взаимодействия с ниобием. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6. URL: www.science-education.ru/120-16952 (дата обращения 5 апреля 2015).
- [18] Михеев Р.С., Коберник Н.В., Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И. Триботехнические свойства антифрикционных покрытий на основе композиционных материалов. *Перспективные материалы*, 2015, № 3, с. 48–54.
- [19] Богомолов Н.И. О работе трения в абразивных процессах. *Труды ВНИИАШ*, 1965, № 1, с. 72–79.
- [20] Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования. Волгоград, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2011. 424 с.
- [21] Зарецкая Г.М., Лавров И.В., Филоненко Н.Е. *Искусственные абразивные материалы под микроскопом. Фазовый состав и микроструктура*. Ленинград, Недра, 1981. 160 с.
- [22] Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. New York, Cambridge University Press, 2005. 216 p.

References

- [1] Lykasov A.A., Ryss G.M., Zhikharev V.M. *Metallurgiya vol'frama i molibdena* [Metallurgy tungsten and molybdenum]. Cheliabinsk, IuUrGU publ., 2007. 78 p.
- [2] Poltoratskii L.M., Iur'ev A.B., Sidorova O.D., Gromov V.E. *Metody issledovaniia mikrostruktury i mekhanicheskikh svoistv metallov i splavov* [Methods for studying the microstructure and mechanical properties of metals and alloys]. Novokuznetsk, SibGIU publ., 2008. 162 p.
- [3] Nosenko V.A. *Shlifovanie adgezionno-aktivnykh metallov* [Grinding adhesively-active metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 262 p.

- [4] Samsonov G.V., Priadko I.F., Priadko L.F. *Elektronnaia lokalizatsiia v tverdom tele* [Electron localization in a solid]. Moscow, Nauka publ., 1976. 339 p.
- [5] Nosenko V.A. Kriterii intensivnosti vzaimodeistviia abrazivnogo i obrabatyvaemogo materialov pri shlifovanii [The criterion of intensity of the interaction of abrasive and processed materials in grinding]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2001, no. 5, pp. 85–91.
- [6] Nosenko V.A. K voprosu ob intensivnosti kontaktnogo vzaimodeistviia d-perekhodnykh metallov s karbidom kremniia pri shlifovanii [On the question of the intensity of the contact interaction of d-transition metals with silicon carbide in grinding]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2002, no. 5, pp. 78–84.
- [7] Nosenko V.A. Vliianie kontaktnogo vzaimodeistviia na iznos abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii [The impact on the wear of contact interaction of abrasive tools for grinding]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2005, no. 1, pp. 73–77.
- [8] Geib K.M., Wilson C., Long R.G., Wilmsen C.W. Reaction between SiC and W, Mo, and Ta at elevated temperatures. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(6), pp. 2796–2800.
- [9] Abdullaev O.R., Gabel'chenko A.I., Ivannikov P.V., Iakunin A.S. Issledovanie kubicheskogo nitrida bora metodami TsKL i TsKLVSR v rastrovom elektronnom mikroskope [Investigation of Cubic Boron Nitride Using the Colour Cathodoluminescence (CCL) and High Resolution Spectral Analysis in a Scanning Electron Microscope]. *Naukoemkie tekhnologii* [Science Intensive Technologies]. 2013, vol. 14, no. 11, pp. 084–088.
- [10] Kondrashov V.A., Rozanov R.Iu., Nevolin V.K., Tsarik K.A. Issledovanie morfologii poverkhnosti karbida kremniia 6H-SiC posle vysokotemperaturnogo travleniia v vosstanovitel'noi srede [Investigation of the morphology of the surface of silicon carbide 6H-SiC after high etching in a reducing atmosphere]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika* [News of Higher Schools. Electronics]. 2014, no. 5(109), pp. 24–32.
- [11] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Morfologiya poverkhnosti korunda posle mikrotsarapaniia titanovogo splava [Morphology of a Surface of corundum after a microscratching of titanium alloy]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, no. 3, pp. 66–71. Available at: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf> (accessed 15 April 2015).
- [12] Nosenko V.A., Avilov A.V., Morozov A.V., Bakhmat V.I. Elektronno-mikroskopicheskie i mikrorentgenospektral'nye issledovaniia ploschadki iznosa karbida kremniia posle mikrotsarapaniia kobal'ta [Electron-microscopic and microx-ray spectral researches of a site of wear of carbide of silicon after a cobalt microscratching]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 6. Available at: www.science-education.ru/120-15418 (accessed 3 April 2015).
- [13] Nosenko V.A., Avilov A.V., Afanas'eva K.V., Bakhmat V.I. Issledovanie poverkhnosti karbida kremniia posle vzaimodeistviia s kobal'tom pri mikrotsarapanii [The research of the surface of silicon carbide after the interaction with cobalt at microscratching]. *Novyi universitet. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [New University. Technical Sciences]. 2014, no. 9(31), pp. 68–71. Available at: http://www.universityjournal.ru/docs/TN_9_14.pdf (accessed 10 April 2015).
- [14] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Mikrorentgenospektral'nye issledovaniia poverkhnosti korunda posle mikrotsarapaniia titana [Microprobe studies corundum surface after mikrotsarapaniya titanium]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd State Technical University]. 2014, vol. 12, no. 21(148), pp. 29–32.
- [15] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Struktura i khimicheskii sostav poverkhnosti karbida kremniia posle mikrotsarapaniia titana [Structure and chemical composition of a surface of carbide of silicon after a microscratching of titanium]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, no. 4, pp. 14–20. Available at: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-4.pdf> (accessed 3 April 2015).
- [16] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Rentgenospektral'nyi mikroanaliz poverkhnosti karbida kremniia posle mikrotsarapaniia titana [X-ray spectral microanalysis

- of the surface of carbide of silicon after the microscratching of titanium]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical engineering]. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 69–79.
- [17] Nosenko V.A., Avilov A.V., Kudriashova A.V., Amiralieva E.A. Morfologiya poverkhnosti karbida kremniia posle vzaimodeistviia s niobium [The morphology of surface of the crystal of silicon carbide after interaction with niobium]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/120-16952> (accessed 5 April 2015).
- [18] Mikheev R.S., Kobernik N.V., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K., Kobeleva L.I. Tribotekhnicheskie svoystva antifriktsionnykh pokrytii na osnove kompozitsionnykh materialov [Tribotechnical properties of antifriction coatings based on composite materials]. *Perspektivnyye materialy* [Journal of Advanced Materials]. 2015, no. 3, pp. 48–54.
- [19] Bogomolov N.I. O rabote treniia v abrazivnykh protsessakh [On the work of friction in abrasive processes]. *Trudy VNIASH* [Proceedings VNIASH]. 1965, № 1, pp. 72–79.
- [20] Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniia* [Grinding Technology]. Volgograd, VPI (filial) VolGTU, 2011. 424 p.
- [21] Zaretskaia G.M., Lavrov I.V., Filonenko N.E. *Iskusstvennye abrazivnye materialy pod mikroskopom. Fazovyi sostav i mikrostruktura* [Artificial abrasive material under a microscope. The phase composition and microstructure]. Leningrad, Nedra publ., 1981. 160 p.
- [22] Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. New York, Cambridge University Press, 2005. 216 p.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Информация об авторах

НОСЕНКО Владимир Андреевич (Волжский) — доктор технических наук, профессор, зам. директора по учебной работе, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: nosenko@volpi.ru).

АВИЛОВ Александр Викторович (Волжский) — кандидат технических наук, доцент, зам. зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: avilov@volpi.ru).

ХАРЛАМОВ Валентин Олегович (Волжский) — кандидат технических наук, ведущий инженер ЦКП «ФХМИ». «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Волгоград, пр. Ленина, д. 28, e-mail: harlamov_vo@mail.ru).

БАХМАТ Вера Ивановна (Волжский) — лаборант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: vera.bakhmat@mail.ru).

Information about the authors

NOSENKO Vladimir Andreevich (Volzhsky) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Deputy Director for Teaching and Learning, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: nosenko@volpi.ru).

AVILOV Alexander Viktorovich (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Deputy Head, Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: avilov@volpi.ru).

KHARLAMOV Valentin Olegovich (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Lead Engineer, Centre for Physicochemical Research Methods. Volgograd State Technical University (400005, Volgograd, Lenin Pr., Bldg. 28, e-mail: harlamov_vo@mail.ru).

BAKMAT Vera Ivanovna (Volzhsky) — Research Assistant, Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: vera.bakhmat@mail.ru).