

УДК 621.921

DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-72-81

Перенос металла на поверхность карбида кремния при микроцарапании титана и циркония*

В.А. Носенко¹, А.В. Авилов¹, С.В. Носенко¹, В.И. Бахмат¹, Ю.М. Быков²

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

² Волгоградский государственный технический университет, 400005, Волгоград, Волгоградская обл., Российская Федерация, В.И. Ленина пр-т, д. 28

Transfer of Metal on the Silicon Carbide Surface when Micro-Cutting Titanium and Zirconium

V.A. Nosenko¹, A.V. Avilov¹, S.V. Nosenko¹, V.I. Bakhmat¹, Y.M. Bykov²

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

² Volgogradsky State Technical University, 400005, Volgograd, Volgograd region, Lenin Ave., Bldg. 28



e-mail: nosenko@volpi.ru, avilov@volpi.ru, vto@volpi.ru, vera.bakhmat@mail.ru, bykov@vstu.ru



Основной причиной плохой обрабатываемости шлифованием сплавов титана и циркония является высокая адгезионная активность металлов, составляющих основу сплава. Контактное взаимодействие титана и циркония с карбидом кремния рассмотрено при моделировании процесса шлифования микроцарапанием специально подготовленными кристаллами. Состояние поверхности и приповерхностного слоя карбида кремния и налипшего металла исследовано с помощью растрового электронного микроскопа Versa 3D с увеличением от 1 000 до 100 000 крат. Концентрация металла на поверхности кристалла определена методом локального микрорентгеноспектрального анализа. Рассмотрены особенности изнашивания карбида кремния на различных скоростях и глубинах микроцарапания. Показано, что при микроцарапании титана и циркония кристаллом из карбида кремния происходит интенсивное налипание металла на вершину кристалла. Средние концентрации металлов на поверхности площадки износа карбида кремния при скорости микроцарапания 35 м/с различаются незначительно. С повышением скорости до 60 м/с перенос титана и циркония на поверхность карбида кремния увеличивается, причем в большей степени возрастает перенос титана. Установлено, что основным видом изнашивания карбида кремния при микроцарапании титана и циркония является скалывание микрообъемов кристалла.

Ключевые слова: микроцарапание, титан, цирконий, карбид кремния, морфология поверхности, перенос металла.



The main reason for poor grindability of titanium and zirconium alloys is the high adhesive activity of the metals that form the basis of the alloys. Contact interaction of titanium and zirconium with silicon carbide is studied when modeling the process of micro-cutting by specially prepared crystals. The condition of the surface and the surface boundary layer of the silicon carbide and the adhered metal is investigated using Versa 3D, a scanning electron microscope with magnification from 1,000 to 100,000 times. The concentration of metal on the crystal surface is determined by local micro X-ray analysis. Specific aspects of carbide silicon wear at different speeds and depths of micro-cutting are considered. It is shown that

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

when titanium and zirconium are micro cut by a silicon carbide crystal, intense metal adhesion to the top of the crystal occurs. The average metal concentrations on the surface of the silicon carbide wear pad at the micro-cutting speed of 35 m/sec differ insignificantly. With the increase of the speed to 60 m/sec, the transfer of titanium and zirconium to silicon carbide increases, and the transfer of titanium increases to a greater degree. It has been established that chipping of micro volumes of the crystal is the main type of silicon carbide wear when micro-cutting titanium and zirconium.

Keywords: micro-cutting, titanium, zirconium, silicon carbide, surface morphology, metal transfer.

Титан и цирконий принадлежат к числу распространенных конструкционных металлов, сплавы из которых применяют в атомной энергетике, авиационной и космической технике, ракетостроении, медицине и других отраслях промышленности. Титан ввиду низкой плотности, высокой удельной прочности и коррозионной стойкости используют для изготовления емкостей, химических реакторов, трубопроводов, арматуры, насосов, клапанов и других изделий, работающих в агрессивных средах. Цирконий имеет более высокую температуру плавления и достаточно инертен к тепловым нейтронам, поэтому его применяют для изготовления различных конструкций, включая ядерные реакторы [1, 2].

Из сплавов на основе титана и циркония изготавливают наиболее ответственные детали и изделия, качество поверхности которых формируется на заключительных операциях обработки; одна из наиболее важных операций — шлифование [3–6]. В связи с этим исследование процесса шлифования титановых и циркониевых сплавов является актуальной задачей современного машиностроения. В большей степени изучен процесс шлифования титана и его сплавов, в меньшей степени — циркония и сплавов на его основе [7–13].

Титан и цирконий относятся к адгезионно-активным металлам, поэтому одной из причин низкой стойкости абразивного инструмента при шлифовании сплавов на их основе является налипание металла на вершину абразивного материала [3, 7, 14, 15]. Тем не менее перенос

титана и особенно циркония на вершину абразивного материала изучен недостаточно.

Цель работы — исследование переноса металла на поверхность площадки износа кристалла карбида кремния при микроцарапании титана и циркония.

В качестве абразивного материала применяли карбид кремния зеленый, наиболее широко используемый для шлифования титановых сплавов [3, 7, 16]. Из крупных кристаллов карбида кремния зеленого, образующихся при плавке абразивного материала на ОАО «Волжский абразивный завод», алмазным отрезным кругом вырезали заготовки размером 2×2×5 мм. Затем их вставляли в специальные оправки и закрепляли композиционным пломбирочным материалом. Вершину кристалла затачивали на конус с углом при вершине 120°.

Подготовку поверхности металлов и микроцарапание осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке с ЧПУ CHEVALIER модели Smart-B1224III по методике, приведенной в работах [17, 18].

Индензор (оправку с кристаллом) устанавливали в отверстие на периферии стального диска диаметром 385 мм и поджимали винтом. Радиус траектории вращения вершины индензора составлял 400 мм. Таким образом моделировали работу единичного зерна шлифовального круга.

В качестве обрабатываемого материала использовали титановый сплав ВТ1-00, ГОСТ 19807–91 (далее — титан) и циркониевый сплав КТЦ-100, ТУ 95.46–82 (далее — цирконий),

Химический состав сплавов ВТ1-00 и КТЦ-100

Марка сплава	Массовое содержание химических элементов в сплаве, %						
	ВТ1-00	Ti	Fe	O	Si	C	N
99,47		0,15	0,10	0,08	0,05	0,04	0,11
КТЦ-100	Zr	Hf	Fe	Ca	Ni	N	Прочие примеси
	99,80	0,05	0,03	0,02	0,01	0,05	0,04

массовое содержание основного металла в которых составляло соответственно около 99,47 и 99,80 % (см. таблицу).

Поверхность образца сплава перед микроцарапанием шлифовали кругом из кубического нитрида бора на бакелитовой связке типоразмера 1А1 250×20×76,2×5 с характеристикой ЛКВ30В107100МВ. Шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,15$ мкм получали выхаживанием. Затем вместо эльборового круга устанавливали металлический диск с индентором. Микроцарапание осуществляли со скоростью 35 и 60 м/с.

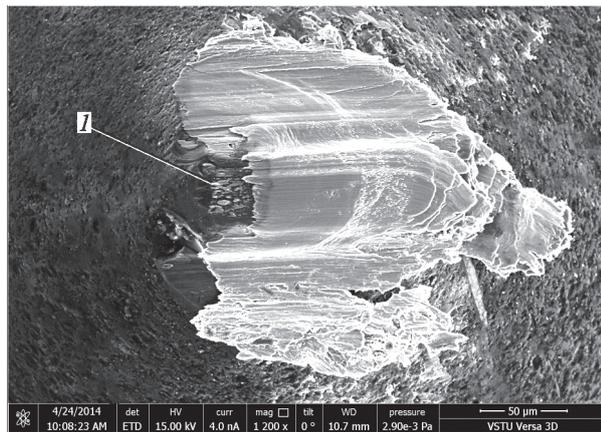
Морфологию площадки износа вершины кристалла исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac.

В Периодической системе химических элементов титан расположен в подгруппе IVB четвертого периода. Состояние валентных электронов изолированного атома отвечает конфигурации d^2s^2 . В конденсированном состоянии

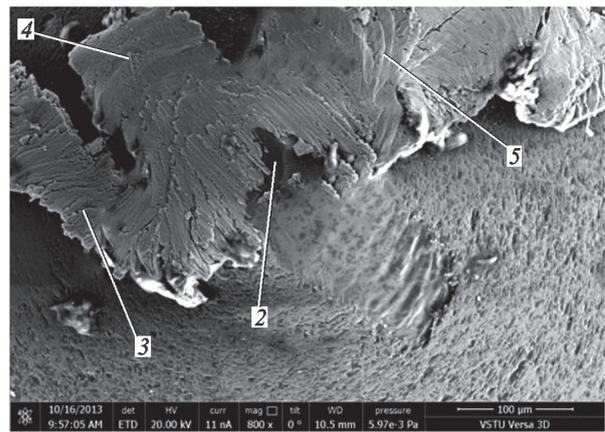
возможными вариантами электронной перестройки являются следующие переходы: $d \rightarrow p$, $s \rightarrow d$, $s \rightarrow p$. Переходы типа $d \rightarrow p$ для элементов подгруппы IVB оказываются энергетически невыгодными, так как результатом является конфигурация d^1 , менее устойчивая, чем d^2 [19]. В связи с нестабильностью электронных конфигураций атома титан при микроцарапании интенсивно переносится на поверхность абразивного материала, что является основной причиной плохой обрабатываемости шлифованием.

При микроцарапании титана индентором из карбида кремния металл налипает на вершину кристалла. На рис. 1, а направление движения микроцарапания слева направо, на рис. 1, б — сверху вниз под углом около 45° . Средняя глубина микроцарапания в обоих случаях составляет около 5...8 мкм.

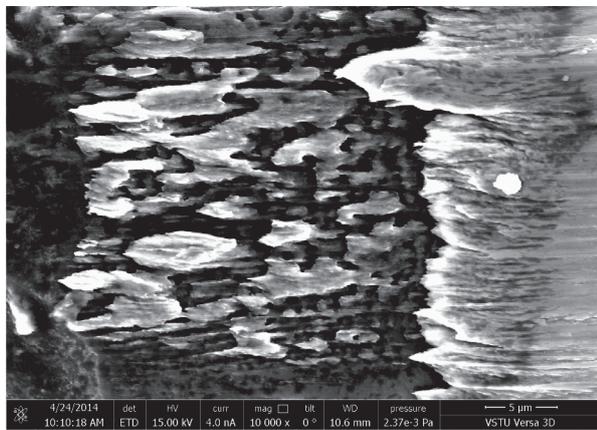
На первом инденторе выделяется относительно ровный фрагмент 1 площадки износа



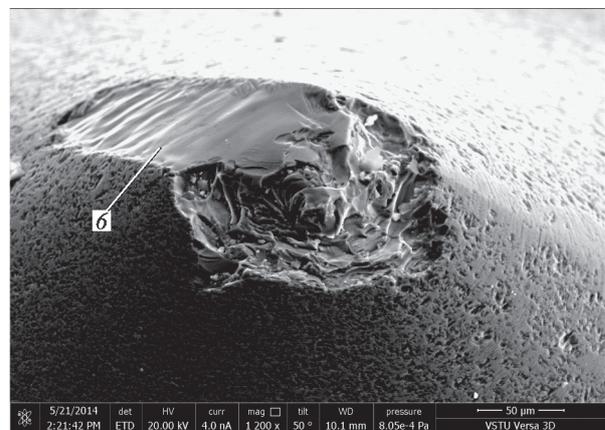
а



б



в



г

Рис. 1. Общий вид площадки износа карбида кремния после микроцарапания титана на скорости 35 м/с: а — $\times 1\,200$, $\alpha = 0^\circ$; б — $\times 800$, $\alpha = 0^\circ$; в — $\times 10\,000$, $\alpha = 0^\circ$; г — $\times 1\,200$, $\alpha = 50^\circ$

(см. рис. 1, *a*) в форме прямоугольника размером 24×29 мкм, показанный при увеличении ×10 000 на рис. 1, *в*. Остальная часть кристалла покрыта налипшим металлом. Видимая часть площадки износа составляет не более 3 % ее номинального размера.

Поверхность второго индентора также почти целиком покрыта налипшим металлом (см. рис. 1, *б*). Из-под слоя металла выступает вершина 3. Образующаяся стружка перемещается в направлении главного 4 и боковых 3, 5 движений.

После стравливания налипшего металла диаметр площадки износа обоих инденторов составил около 165...170 мкм. Состояние площадки износа свидетельствует о преимущественном изнашивании скалыванием (рис. 1, *г*).

Основные разрушения происходят на задней части площадки износа. У второго индентора с

задней части площадки износа скололся слой кристалла 6 шириной около 100 мкм и длиной более 300 мкм (см. рис. 1, *г*).

С увеличением скорости микроцарапания почти в 2 раза (с 35 до 60 м/с) существенных изменений в интенсивности налипания металла на площадку износа карбида кремния не наблюдается (рис. 2, *a*). Впереди площадки износа, как и на скорости 35 м/с, образуется большое количество налипшей стружки.

Тем не менее скорость оказала влияние на формирование площадки износа. Налипы такого вида появляются в основном при микроцарапании с глубиной не более 3...5 мкм в начальный период работы индентора или в первый период очередного обновления вершины кристалла в результате скалывания и образования новой выступающей вершины. Об этом свидетельствует и диаметр площадки износа, не превышающий 40 мкм.

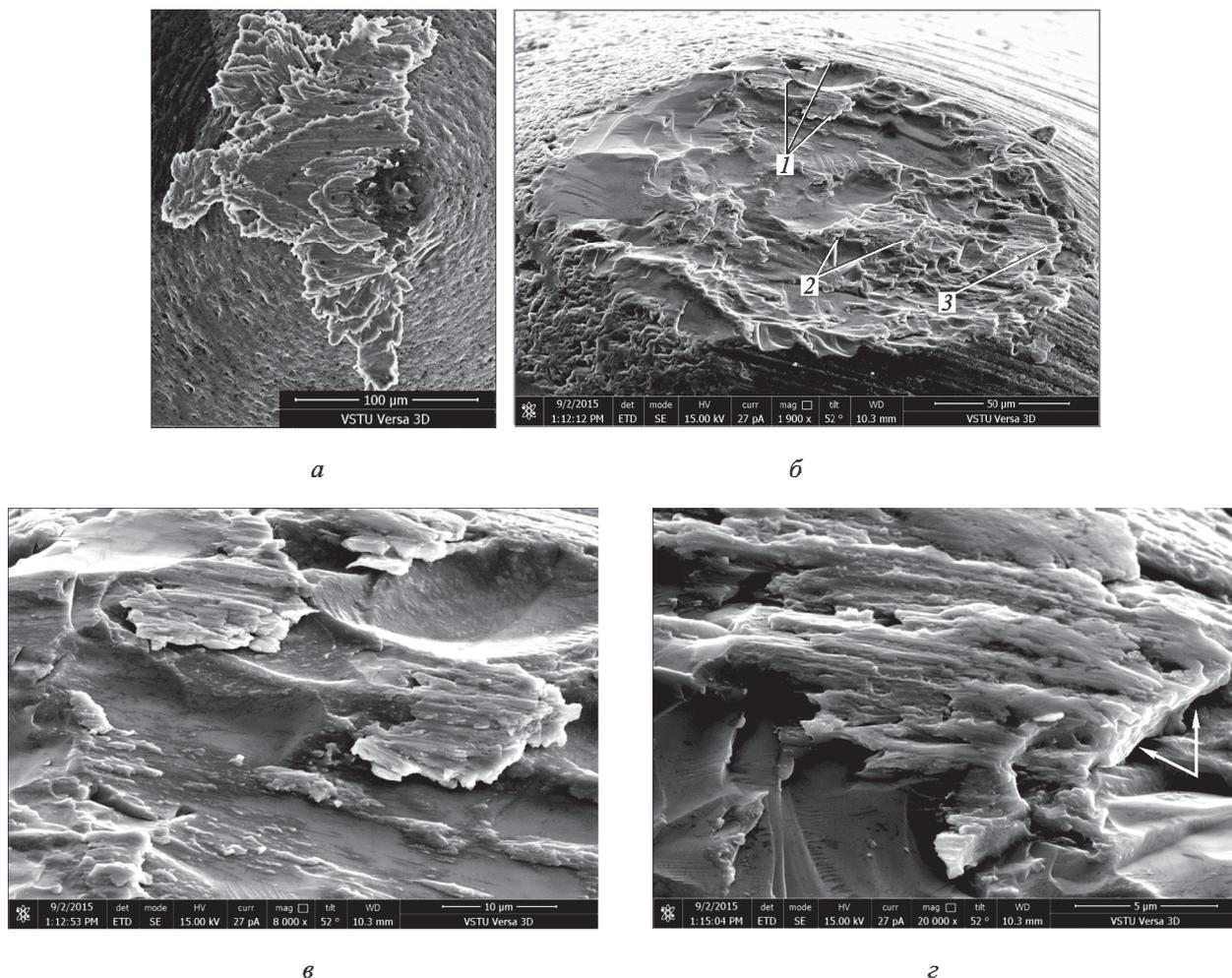
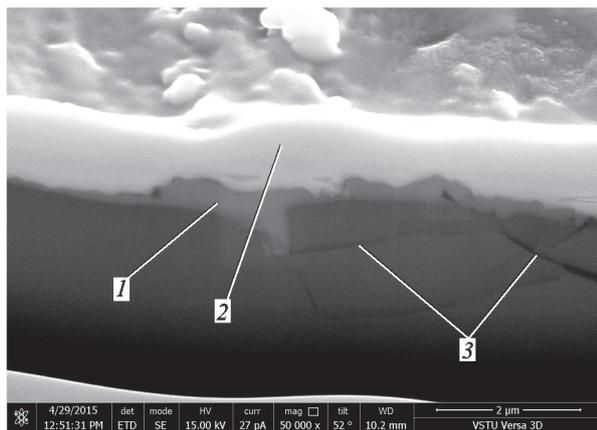
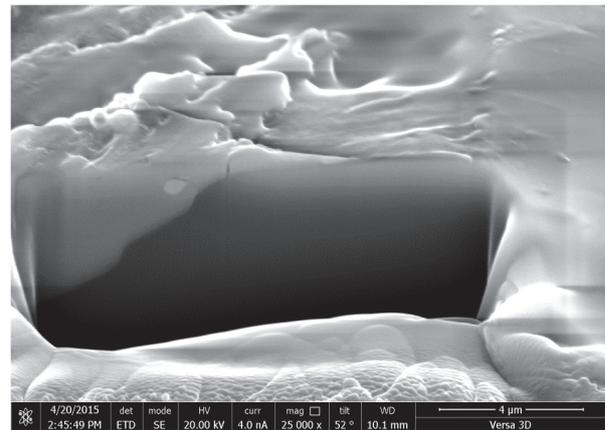


Рис. 2. Общий вид площадки износа карбида кремния после микроцарапания титана на скорости 60 м/с: *a* — ×1 000, α = 0°; *б* — ×1 900, α = 52°; *в* — ×8 000, α = 52°; *г* — ×20 000, α = 52°



а



б

Рис. 3. Микросечение площадки износа карбида кремния после микроцарапания титана на скорости 60 м/с: 1 — титан; 2 — платиновое покрытие; 3 — трещины

При работе на больших глубинах в результате преобладания изнашивания скалыванием над истиранием площадки износа имеют вид, представленный на рис. 2, б. Направление скорости главного движения индентора слева направо. Диаметр площадки на вершине кристалла около 200 мкм. Следы износа присутствуют и на передней конической поверхности кристалла в виде продольных полос в направлении вектора скорости микроцарапания.

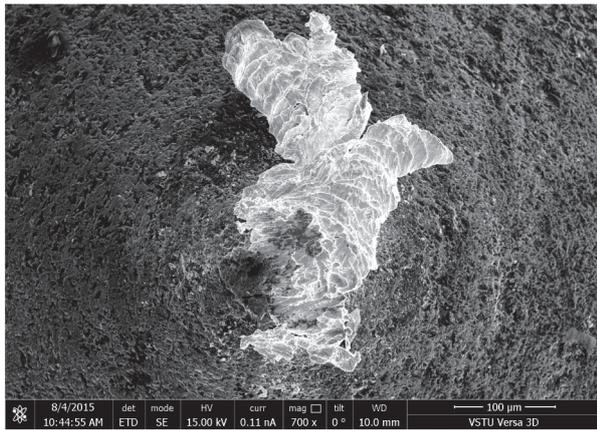
На рис. 2, в и г показаны налипы 1–3 при соответствующем увеличении $\times 8\,000$ и $\times 20\,000$. Длина налипов в направлении траектории скорости главного движения 10...20 мкм. Состояние видимой торцевой части некоторых налипов свидетельствует о неполном их прилегании к поверхности карбида кремния. Например, зазор в направлении стрелок на рис. 2, г составляет около 1 мкм. Толщина торцевой части налипа от 0,3 до 0,8 мкм. В нижней части фрагмента площадки износа (рис. 2, в) присутствует большое количество относительно небольших и едва различимых (при увеличении $\times 8\,000$) налипов, значительная часть которых плотно прилегает к поверхности кристалла.

В отдельных микросечениях, выполненных на фрагментах поверхности карбида кремния, изнашиваемых истиранием, обнаружены трещины, распространяющиеся в глубину микросечения (рис. 3, а). Титан, налипший на поверхность карбида кремния в рассматриваемом сечении и в микросечении на рис. 3, б, плотно прилегает к поверхности абразивного материала.

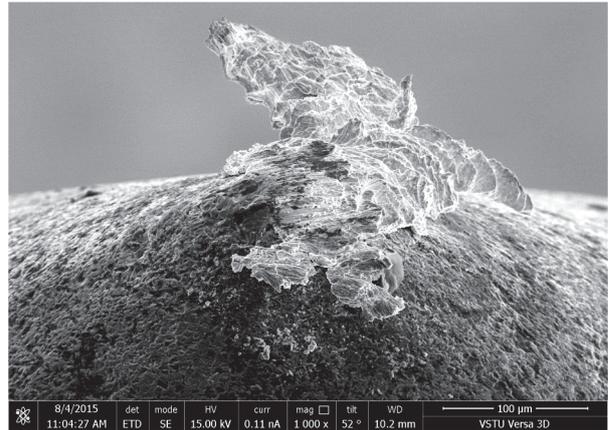
В соответствии с электронным строением исследуемых металлов атомная стабильность электронных конфигураций циркония как химического элемента с более высоким квантовым числом должна быть несколько выше, чем у титана. Учитывая, что при микроцарапании титана большой налип металла на передней поверхности кристалла можно получить только в первый период работы индентора, при микроцарапании циркония на образце сделана только одна дорожка царапин.

При обработке циркония на скорости 60 м/с со средней глубиной 5...8 мкм так же, как и при микроцарапании титана, образуется большой налип металла на передней поверхности кристалла, представляющий собой сходящую по передней поверхности стружку (рис. 4, а). Направление движения кристалла снизу вверх под углом около 60° к горизонтали. Объемное представление о прилипшей стружке дает фотография, сделанная под углом 52° (рис. 4, б). Задняя часть площадки износа в направлении стрелки 1 скололась более чем на половину (рис. 4, в). Стрелка указывает на задний край скола, видимый под углом 52° . В действительности от площадки износа осталась небольшая полоска со стороны передней части, фрагмент которой с увеличением $\times 100\,000$ показан на рис. 4, г. Как и при микроцарапании титана, поверхность площадки износа разделена на блоки толщиной около 0,6 мкм.

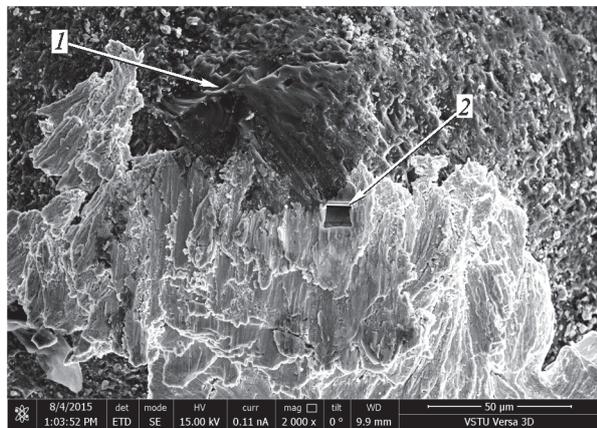
На границе площадки износа и налипа металла, выделенного стрелкой 2 (см. рис. 4, в), сделано микросечение, фотография вертикальной стенки которого (рис. 4, д) свидетельствует



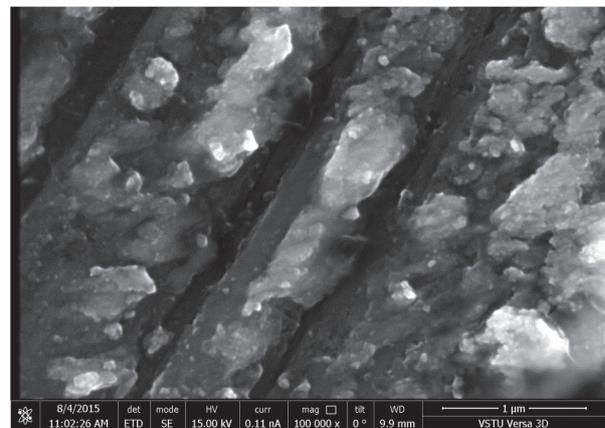
a



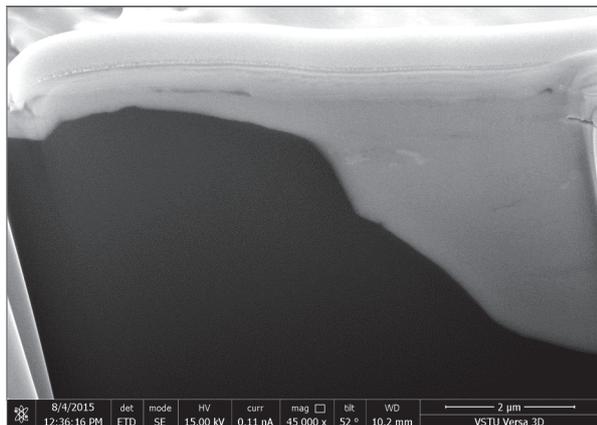
б



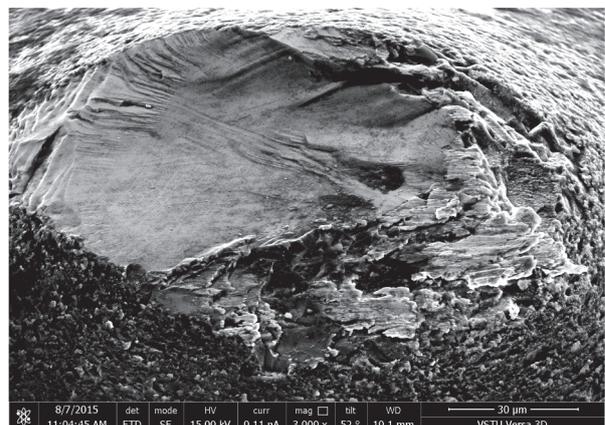
в



г



д



е

Рис. 4. Вид площадки износа карбида кремния после микроцарапания циркония на скорости 60 м/с: *a* — $\times 700$, $\alpha = 0^\circ$; *б* — $\times 1\,000$, $\alpha = 52^\circ$; *в* — $\times 2\,000$, $\alpha = 52^\circ$; *г* — $\times 100\,000$, $\alpha = 0^\circ$; *д* — $\times 45\,000$, $\alpha = 52^\circ$; *е* — $\times 3\,000$, $\alpha = 52^\circ$

о плотном контакте металла с поверхностью кристалла.

С увеличением продолжительности или глубины микроцарапания происходит разрушение площадки износа (рис. 4, *e*). Резание в таком

случае осуществляется отдельными микрорезцами, выступающими на поверхности кристалла. В абразивной обработке данный процесс называют самозатачиванием. Работа шлифовального круга в режиме самозатачивания в

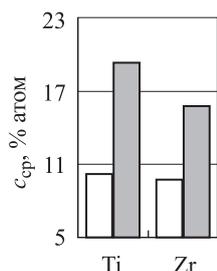


Рис. 5. Диаграмма средней концентрации $c_{ср}$ титана и циркония на поверхности площадки износа карбида кремния при различной скорости микроцарапания:
□ — 35 м/с; ■ — 60 м/с

большинстве случаев (кроме операций чистой обработки) считается благоприятным процессом, существенно увеличивающим стойкость инструмента.

Среднюю концентрацию металла, перенесенного на поверхность кристалла карбида кремния, определяли методом локального микро-рентгеноспектрального анализа сканированием поверхности площадки износа по площади [17, 18]. Установлено, что при микроцарапании на скорости 35 м/с с учетом доверительного интервала на средние арифметические значения концентрации титана и циркония различаются не-

значительно (рис. 5). С увеличением скорости микрорезания до 60 м/с перенос титана и циркония на поверхность площадки износа возрастает соответственно в 1,8 и 1,6 раза. В результате концентрация титана при микроцарапании со скоростью 60 м/с в среднем на 20 % превышает концентрацию циркония.

Выводы

1. При микроцарапании титана и циркония кристаллом из карбида кремния происходит интенсивное налипание металла на вершину кристалла. При скорости микроцарапания 35 м/с средние концентрации титана и циркония на поверхности площадки износа карбида кремния различаются незначительно. С увеличением скорости до 60 м/с перенос титана и циркония на поверхность карбида кремния возрастает, о чем свидетельствует повышение концентрации металлов почти в 1,5 раза. В большей степени возрастает концентрация титана.

2. Основным видом изнашивания карбида кремния при микроцарапании титана и циркония является скалывание микрообъемов кристалла.

Литература

- [1] Николаев А.И., Ларичкин Ф.Д., Герасимова Л.Г., Глущенко Ю.Г., Новосельцева В.Д., Маслова М.В., Николаева О.А. *Титан и его соединения: ресурсы, технологии, рынки, перспективы*. Апатиты, РАН, Кольский научный центр, ИХТРЭМС КНЦ РАН, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина, 2011. 152 с.
- [2] Вернадский В.И. *Аналитическая химия циркония и гафния*. Москва, Наука, 1965. 241 с.
- [3] Носенко В.А., Носенко С.В. *Технология шлифования*. Волгоград, ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. 425 с.
- [4] Макаров В.Ф. *Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов*. Санкт-Петербург, Лань, 2013. 329 с.
- [5] Носенко В.А., Ларионов Н.Ф., Егоров Н.И., Волков М.П. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования. *Вестник машиностроения*, 1989, № 5, с. 17–21.
- [6] Салов П.М., Салов Д.П. *Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов*. Чебоксары, Чебоксарский политехнический ин-т (филиал) МГОУ, 2010. 332 с.
- [7] Саютин Г.И., Носенко В.А. *Шлифование деталей из сплавов на основе титана*. Москва, Машиностроение, 1987. 80 с.
- [8] Саютин Г.И., Носенко В.А., Богомолов Н.И. Выбор инструмента и СОЖ при шлифовании титановых сплавов. *СТИН*, 1981, № 11, с. 15–17.
- [9] Кремень З.И., Поповский Д.А., Юрьев В.Г. Шлифование титановых сплавов шлифовальными кругами на основе эльбора и алмаза. *Вестник машиностроения*, 2013, № 5, с. 66–69.
- [10] Горелов В.А., Жуплов М.В., Фадин Д.М., Яковлев М.Г. Исследование сил резания в процессе шлифования титанового сплава ВТ3-1. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2012, т. 1, № 1, с. 73–77.

- [11] Никитин К.Н., Шлепов И.А., Блюхер Г.М., Климов А.А. Влияние различных способов механической обработки на коррозионное поведение циркониевых изделий. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2012, № 1 (72), с. 54–59.
- [12] Носенко В.А. Взаимодействие титана, циркония и гафния с карбидом кремния при шлифовании кругами с наполнителями. *СТИН*, 1997, № 4, с. 34–36.
- [13] Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с периодической правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2010, № 10, с. 66–71.
- [14] Носенко С.В., Носенко В.А., Кременецкий Л.Л. Влияние правки абразивного инструмента на состояние рельефа обработанной поверхности титанового сплава при встречном глубинном шлифовании. *Вестник машиностроения*, 2014, № 7, с. 64–68.
- [15] Худобин Л.В., Унянин А.Н. *Минимизация засаливания шлифовальных кругов*. Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет, 2007. 299 с.
- [16] Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2010, № 11, с. 57–61.
- [17] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава [Электронный ресурс]. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 2014, т. 2, № 3, с. 66–71.
- [18] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Микрорентгеноспектральные исследования поверхности корунда после микроцарапания титана. *Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*, 2014, вып. 12, № 21 (148), с. 29–32.
- [19] Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. *Электронная локализация в твердом теле*. Москва, Наука, 1976. 339 с.

References

- [1] Nikolaev A.I., Larichkin F.D., Gerasimova L.G., Glushchenko Iu.G., Novosel'tseva V.D., Maslova M.V., Nikolaeva O.A. *Titan i ego soedineniia: resursy, tekhnologii, rynki, perspektivy* [Titanium and its compounds: resources, technologies, markets and prospects]. Apatity, RAN, Kol'skii nauchnyi tsentr, IKhTREMS KNTs RAN, Luzin Institute for Economic Studies, 2011. 152 p.
- [2] Vernadskii V.I. *Analiticheskaia khimiia tsirkoniia i gafniia* [Analytical chemistry of zirconium and hafnium]. Moscow, Nauka publ., 1965. 241 p.
- [3] Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiia shlifovaniia* [Grinding technology]. Volgograd, IUNL VolgGTU publ., 2011. 425 p.
- [4] Makarov V.F. *Sovremennye metody vysokoeffektivnoi abrazivnoi obrabotki zharoprochnykh stalei i splavov* [Modern methods of high-efficiency abrasive machining of heat-resistant steels and alloys]. Sankt-Petersburg, Lan' publ., 2013. 329 p.
- [5] Nosenko V.A., Larionov N.F., Egorov N.I., Volkov M.P. Vybhor kharakteristiki abrazivnogo instrumenta i SOZh dlia glubinnogo shlifovaniia [The selection characteristics of the abrasive tool and the coolant for deep grinding]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1989, no. 5, pp. 17–21.
- [6] Salov P.M., Salov D.P. *Ratsional'noe ispol'zovanie rabochei poverkhnosti abrazivnykh krugov* [Rational use of the working surface of the abrasive wheels]. Cheboksary, Cheboksarskii politekhnicheskii in-t (filial) MGOU publ., 2010. 332 p.
- [7] Saiutin G.I., Nosenko V.A. *Shlifovanie detalei iz splavov na osnove titana* [Grinding parts of alloys based on titanium]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 80 p.
- [8] Saiutin G.I., Nosenko V.A., Bogomolov N.I. Vybhor instrumenta i SOZh pri shlifovanii titanovykh splavov [The choice of tool and cutting fluid for grinding titanium alloys]. *СТИН* [Russian Engineering Research]. 1981, no. 11, pp. 15–17.
- [9] Kremen' Z.I., Popovskii D.A., Iur'ev V.G. Shlifovanie titanovykh splavov shlifoval'nymi krugami na osnove el'bora i almaza [Glazing titanium alloys by diamond-dressed and borazon-dressed wheels]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2013, no. 5, pp. 66–69.

- [10] Gorelov V.A., Zhuplov M.V., Fadin D.M., Iakovlev M.G. Issledovanie sil rezaniia v protsesse shlifovaniia titanovogo splava VT3-1 [Analysis of cutting forces in the course grinding of the titanium alloy]. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSTU Stankin]. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 73–77.
- [11] Nikitin K.N., Shlepov I.A., Bliukher G.M., Klimov A.A. Vliianie razlichnykh sposobov mekhanicheskoi obrabotki na korrozionnoe povedenie tsirkonievnykh izdelii [Effect of different methods of mechanical treatment on the corrosion behaviour of zirconium products]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Materialovedenie i novye materialy* [Problems of atomic science and technology. Series: Materials science and new materials]. 2012, no. 1 (72), pp. 54–59.
- [12] Nosenko V.A. Vzaimodeistvie titana, tsirkoniia i gafniia s karbidom kremniia pri shlifovanii krugami s napolniteliami [The interaction of titanium, zirconium and hafnium with silicon carbide for grinding wheels with fillers]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 1997, no. 4, pp. 34–36.
- [13] Nosenko V.A. Unidirectional and opposing deep grinding of titanium alloy with periodic wheel adjustment. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 10, pp. 1016–1021.
- [14] Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. Vliianie pravki abrazivnogo instrumenta na sostoianie rel'efa obrabotannoi poverkhnosti titanovogo splava pri vstrechnom glubinnom shlifovanii [Influence of abrasive tool dressing on state of relief of machined surface of titanium alloy at counter deep grinding]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 7, pp. 64–68.
- [15] Khudobin L.V., Unianin A.N. *Minimizatsiia zasalivaniia shlifoval'nykh krugov* [Minimizing the clogging of grinding wheels]. Ul'ianovsk, Ul'ianovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet publ., 2007. 299 p.
- [16] Nosenko V.A., Nosenko S.V. Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 11, pp. 1124–1128.
- [17] 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, vol. 2, no. 3, pp. 66–71.
- [18] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Mikrorentgenospektral'nye issledovaniia poverkhnosti korunda posle mikrotsarapaniia titana [Microengineering study the surface of corundum after macrocarpaea titanium]. *Izvestiia VolgGTU. Seriya Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii* [Izvestia VSTU. Ser. Progressive technologies in mechanical engineering]. 2014, is. 12, no. 21 (148), pp. 29–32.
- [19] 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.

Статья поступила в редакцию 25.03.2016

Информация об авторах

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

НОСЕНКО Сергей Владимирович (Волжский) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, ул. Энгельса, д. 42а, e-mail: vto@volpi.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, ул. Энгельса, д. 42а, e-mail: vera.bakhmat@mail.ru).

БЫКОВ Юрий Михайлович (Волгоград) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». Волгоградский государственный технический университет (400005, Волгоград, Волгоградская обл., Российская Федерация, В.И. Ленина пр-т, д. 28, e-mail: bykov@vstu.ru).

Information about the authors

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

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

NOSENKO Sergey Vladimirovich (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: vto@volpi.ru).

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

BYKOV Yuriy Mikhailovich (Volgograd) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering. Volgogradsky State Technical University (400005, Volgograd, Volgograd region, Lenin Ave., Bldg. 28, e-mail: bykov@vstu.ru).