

УДК 621.923

DOI: 10.12737/article\_59d496eb7ba532.91441180

**В.А. Носенко**, д.т.н.,

**А.В. Фетисов**, к.т.н.,

(Волжский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

Россия, 404121, Волгоградской обл., г. Волжский, ул. Энгельса, 42а)

**С.В. Носенко**, к.т.н.,

(SIA "BBC-R", Atrbrīvošanas aleja 155A, Rēzekne, LV-4604, Latvija)

**В.О. Харламов**, к.т.н.,

(ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

Россия, 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28)

E-mail: nosenko@volpi.ru

## **Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов**

*Эксперименты выполнены при микроцарапании кристаллом карбида кремния и шлифовании кругом из карбида кремния тугоплавких d-переходных металлов. Рассмотрены особенности морфологии и химического состава контактируемых поверхностей, перенос материалов, износ шлифовального круга с учетом электронного строения атомов тугоплавких металлов.*

**Ключевые слова:** карбид кремния; тугоплавкие металлы; шлифование; микроцарапание; морфология; химический состав; перенос материала.

**V.A. Nosenko**, D. Eng.,

**A.V. Fetisov**, Can. Eng.,

(Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) FSBEI VE "Volgograd State Technical University",

42a, Engels Str., Volzhsky, Volgograd reg., 404121 Russia)

**S.V. Nosenko**, Can. Eng.,

(SIA "BBC-R", Atrbrīvošanas aleja 155A, Rēzekne, LV-4604, Latvija)

**V.O. Kharlamov**, Can. Eng.

(FSBEI VE "Volgograd State Technical University", 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005 Russia)

## **Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching**

*Peculiarities in the contact surfaces formation and material transfer at micro-scratching and grinding of refractory metals are investigated. There is shown a connection of metal quantity transferred to the area of crystal wear, a degree of ground surface charging with silicon carbide crystals and wear of an abrasive tool with the electron structure of atoms in refractory metals. It is defined, that the intensity of metal transfer in a crystal surface layer decreases with the increase of a principle quantum number of metal valence electrons. According to the intensity of the interaction silicon carbide during grinding and micro-cutting the refractory metals are classified into adhesion-active metals of IVB, VB sub-groups and inert metals of VIB subgroup of the Periodic Table.*

**Keywords:** silicon carbide; refractory metals; grinding; micro-scratching; morphology; chemical composition; material transfer.

Прогрессивное развитие техники и технологии требует постоянного совершенствования конструкционных материалов. Повышаются требования к прочности, жаростойкости, химической стойкости, устойчивости при облучении и другим эксплуатационным параметрам материалов, что достигается с использованием тугоплавких металлов.

Заключительной операцией обработки тугоплавких металлов и сплавов на их основе в большинстве случаев является шлифование. Одна из отличительных особенностей процесса – высокая активация контактируемых поверхностей, переводящая поверхностные слои абразивного и обрабатываемого материалов в неравновесное, возбужденное состояние. За активацией следует пассивация, в частности, в результате адгезионного взаимодействия. В общем случае под адгезией понимают все виды межатомного или межмолекулярного взаимодействия твердых тел [1].

Результатом адгезионного взаимодействия является перенос материалов. Обрабатываемый материал налипает на рабочую поверх-

ность шлифовального круга, кристаллы абразивного материала внедряются в обработанную поверхность, что снижает режущие свойства абразивного инструмента, показатели надежности и долговечности детали. Тем не менее, процессы контактного взаимодействия при шлифовании тугоплавких металлов изучены недостаточно.

Цель работы – исследование особенностей контактного взаимодействия и взаимопереноса материалов при шлифовании тугоплавких металлов.

Из тугоплавких металлов выбраны сплавы титана, циркония, гафния, ванадия, ниобия, тантала, хрома, молибдена и вольфрама. Для сравнения взяты сплавы железа, кобальта и никеля. Содержание основного металла в большинстве сплавов не менее 99,5 %, кроме сплава гафния, где почти один процент приходится на сопутствующий элемент – цирконий (табл. 1). Основой рассмотренных сплавов являются *d*-переходные металлы IVB, VB, VIB и VIIB подгрупп Периодической системы химических элементов.

### 1. Содержание основного элемента в сплавах

|                               |          |         |       |       |       |        |
|-------------------------------|----------|---------|-------|-------|-------|--------|
| Сплав                         | BT1-00   | КТЦ-100 | ГФИ1  | ВНМ-1 | Нб1   | ЭЛП-3  |
| Основа                        | Ti       | Zr      | Hf    | V     | Nb    | Ta     |
| % масс.                       | 99,47    | 99,70   | 98,8* | 99,90 | 99,78 | 99,96  |
| Сплав                         | RECr99,6 | МШЧ-2   | ВРН   | Э12   | К0    | НПОЭви |
| Основа                        | Cr       | Mo      | W     | Fe    | Co    | Ni     |
| % масс.                       | 99,60    | 99,77   | 99,93 | 99,04 | 99,98 | 99,80  |
| Примечание. * Не более 1 % Zr |          |         |       |       |       |        |

Все сплавы, кроме Э12, относятся к цветным металлам, поэтому в качестве абразивного материала выбран карбид кремния. Исследования проведены при шлифовании кругами и микроцарапании кристаллами из карбида кремния. Микроцарапание осуществляли кристаллами конической формы: угол конуса 120°, радиус вершины 19...22 мкм. Подготовку поверхности металлов и микроцарапание осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке CHEVALIER с ЧПУ мод. Smart-B1224III или универсальном плоскошлифовальном станке ЗГ71 [2].

Состояние рельефа и химический состав в нанослоях поверхности исследовали с использованием последних мировых достижений в области физических методов контроля качества поверхности на растровом двулуче-

вом электронном микроскопе FEI Versa 3D LoVac. Микроскоп оснащен электронной и ионной колоннами, позволяющими осуществлять всестороннее визуальное исследование объектов и химический анализ поверхности. Распределение химических элементов по глубине поверхностного слоя определяли методом послойного травливания или в микросечениях, подготавливаемых непосредственно в камере прибора [3, 4].

В результате химического взаимодействия металлов с карбидом кремния при шлифовании возможно образование карбидов или силицидов переходных металлов. Анализ химического взаимодействия выполнен в соответствии с положениями равновесной термодинамики. Взаимодействие в неравновесной системе рассматривается как химический

процесс, достигший равновесия в тонком при-  
контактном слое.

Для нормальных условий термодинамиче-  
ская вероятность протекания химической ре-  
акции определяется значением изобарно-  
изотермического потенциала  $\Delta G^0_T$ . Расчеты  
 $\Delta G^0_T$  выполнены графическим методом в ин-  
тервале температур 300... 2000 К для реакций  
образования карбидов и силицидов металлов:



Основным принципом выбора конкретных  
химических реакций является наличие необ-  
ходимых термодинамических данных, кото-  
рые взяты из справочников Зефирова А.П.,  
Гельда П.В. и Сидоренко Ф.А. По реакциям  
(1) и (2) рассчитаны  $\Delta G^0_T$  образования  
20 карбидов и 29 силицидов металлов [5].

Для большинства реакций  $\Delta G^0_T$  имеет от-  
рицательное значение, что свидетельствует о  
принципиальной возможности протекания  
данных реакций. Исключение составляют ре-  
акции образования карбидов с участием ме-  
таллов VIIIВ подгруппы, имеющие положи-  
тельные значения  $\Delta G^0_T$  (рис. 1). Силициды и  
карбиды металлов IVB подгруппы имеют  
близкую термодинамическую вероятность  
протекания химических реакций. Однако в  
связи с большей энергетической устойчиво-  
стью  $sp^3$ -конфигураций углерода в карбидах,  
они более устойчивы по сравнению с силици-  
дами. При высокой энергии активации про-  
цесса, характерной для шлифования, предпоче-  
тение следует отдать реакциям образования  
карбидов.

С переходом от металлов IVB к VB под-  
группе уровень локализации валентных элек-  
тронов в стабильные  $d^5$ -конфигурации увели-  
чивается, донорская способность металлов  
уменьшается [6]. Поэтому вероятность обра-  
зования карбидов с участием металлов IVB  
подгруппы выше. Термодинамическая вероят-  
ность образования силицидов ванадия и нио-  
бия выше, чем соответствующих карбидов.  
Для тантала, в связи с близкими значениями  
 $\Delta G^0_T$ , реакции образования карбидов и сили-  
цидов равновероятны.

У металлов VIIIВ подгруппы донорская  
способность атомов начинает уступать акцеп-  
торной. Такой металл, как никель, становится  
настолько сильным акцептором, что способен  
изменить акцепторную способность атомов  
неметалла на донорскую. Термодинамическая

вероятность образования этих карбидов очень  
низка,  $\Delta G^0_T$  во всем интервале температур  
имеет положительное значение. В связи с бо-  
лее низкой стабильностью конфигураций ва-  
лентных электронов в атоме кремния, термо-  
динамическая вероятность образования сили-  
цидов металлов выше карбидов.

Титан относится к числу наиболее адгези-  
онно активных металлов [5], поэтому при  
микроцарапании интенсивно налипают на  
вершину кристалла (рис. 2, а). Направление  
главного движения индентора слева направо.  
Состояние площадки износа на вершине кри-  
сталла при увеличении 10000 крат показано на  
рис. 2, б.

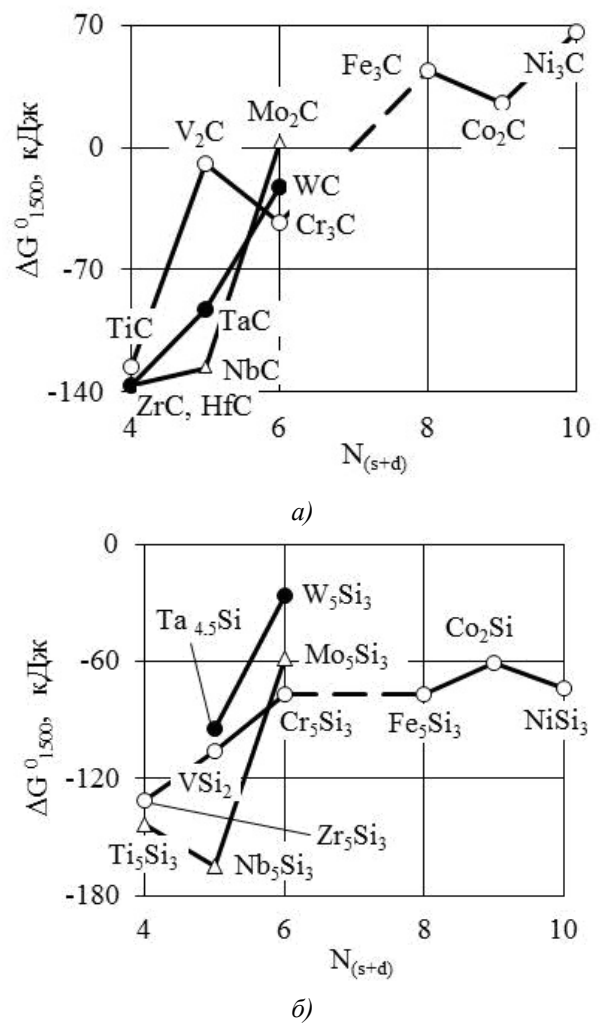
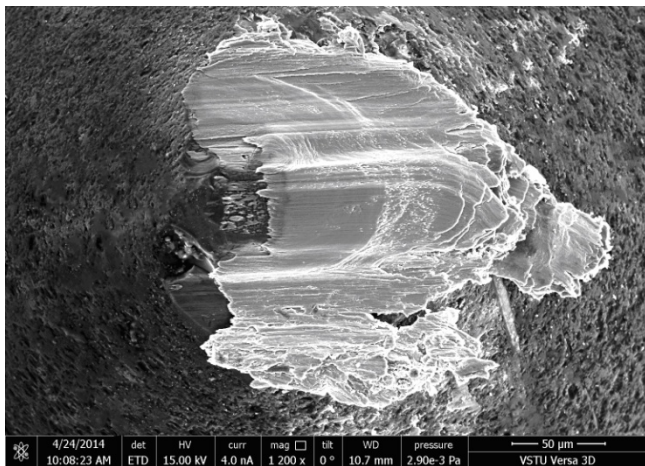


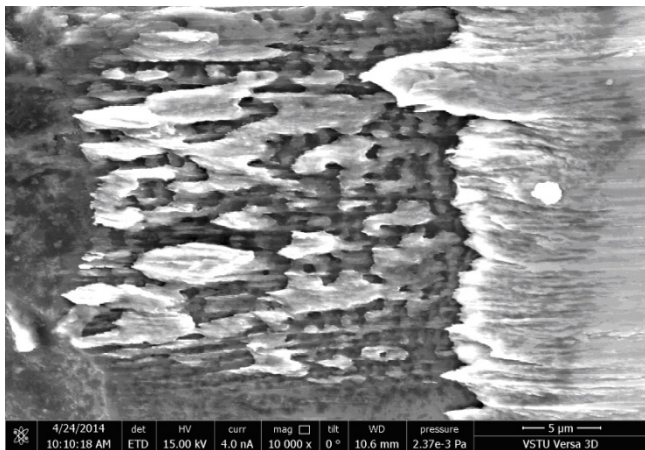
Рис. 1. Зависимость  $\Delta G^0_{1500}$  химических реакций об-  
разования карбидов (а) и силицидов (б) от числа  
валентных электронов  $N_{(s+d)}$

Химический состав площадки износа опре-  
деляли в нижней её части методом сканирова-  
ния по линии 1 в направлении сверху вниз  
(рис. 3, а), по линии 2 (рис. 3, б) в направле-  
нии слева направо, шаг сканирования –

50 мкм. В диапазоне до 1,5 мкм по линии 1 наблюдается повышенная концентрация титана (рис. 3, в). В интервале 1,7...4,0 мкм электронный луч сканирует относительно чистый участок поверхности. Средняя концентрация титана в данном интервале  $1,7 \pm 0,3$  % атом. Сканирование по линии 2 начинается с относительно чистого участка, средняя концентрация титана около  $1,4 \pm 0,4$  % атом. Далее следует участок с налипшим титаном, концентрация которого доходит до 98 % атом. На рис. 3, в линия сканирования 2 ограничена 6 мкм.



а)



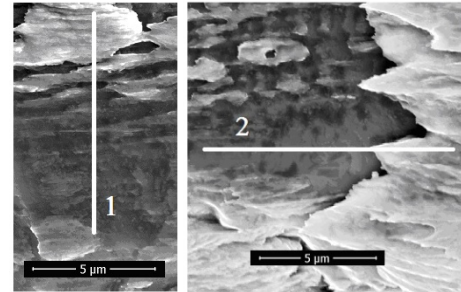
б)

Рис. 2. Вершина кристалла с налипшим металлом (а) и площадка износа (б) после микроцарапания титана

Средняя концентрация титана на поверхности площадки износа определена методом сканирования по площади и достигает 10 % атом.

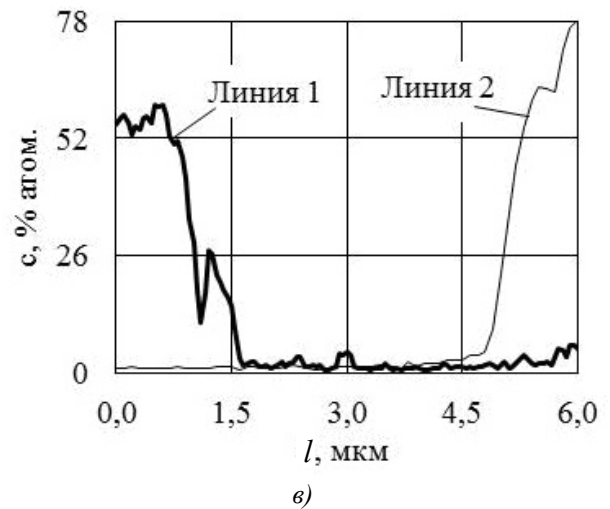
При микроцарапании ниобия на вершине кристалла формируется площадка износа, покрытая налипшим металлом. Металл налипает непосредственно на площадку износа, переднюю и боковые поверхности вершины. В ре-

зультате механического воздействия и адгезивно-усталостных процессов происходит хрупкое разрушение площадки износа с отделением макро- и микрокристаллов карбида кремния, некоторые из которых переносятся на поверхность царапины, что подтверждено микрорентгеноспектральным анализом.



а)

б)



в)

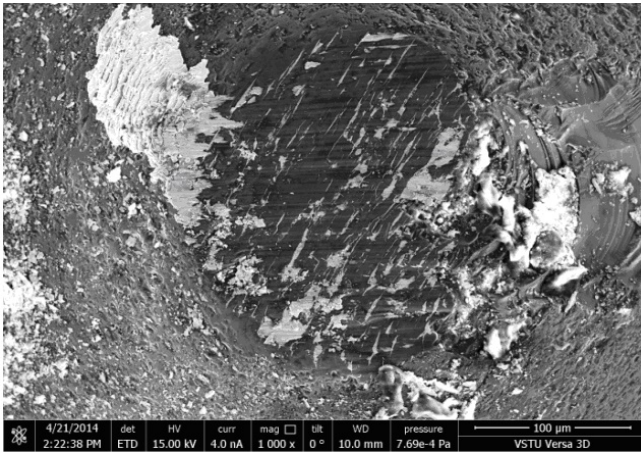
Рис. 3. Участки поверхности с линиями сканирования (а, б) и концентрация титана  $c$  по длине сканирования  $l$  (в)

На вершине кристалла при микроцарапании молибдена формируется относительно плоская отполированная площадка износа, покрытая микротрещинами и следами выкрашивания (рис. 4, а). Металл концентрируется в микротрещинах и других дефектах поверхности. При сканировании по линии АВ (рис. 4, б) пики концентраций молибдена (рис. 4, в) соответствуют положению центра трещины на линии сканирования. Концентрация молибдена на относительно чистых участках поверхности снижается почти до нуля, что свидетельствует о невысокой адгезионной активности молибдена к карбиду кремния.

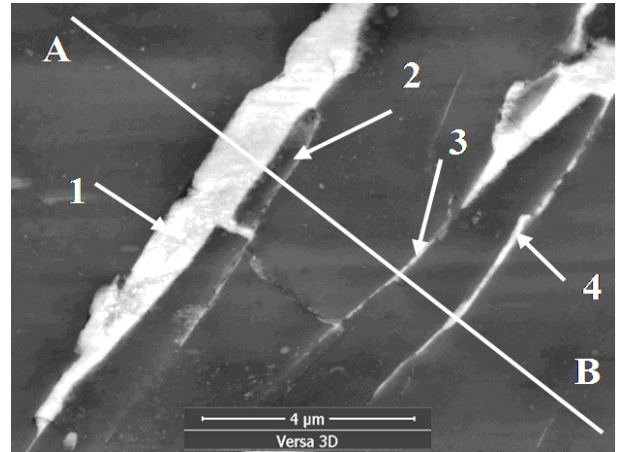
По линии сканирования АВ методом ионного травления подготовлено микросечение, проходящее через трещины 2 и 3. Предварительно, на выделенную поверхность наносили платина содержащее металлоорганическое со-

единение шириной около 2 мкм. Затем сфокусированным пучком ионов галлия осуществляли черновое травление. На сформированном поперечном срезе проводили чистовую обработку плоскости, находящуюся под защитным слоем платинового покрытия.

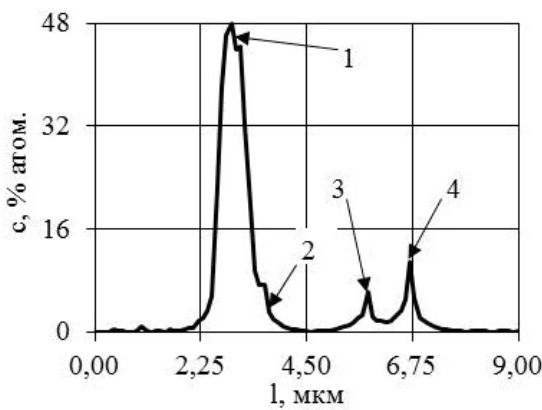
На рис. 4, *з* трещины 2 и 3 обозначены соответственно А и В, платиновое покрытие выделяется белым цветом. Глубина трещины А составляет около 2,7 мкм, трещины В – 4,5 мкм. Трещина В на глубину около 2,6 мкм заполнена материалом светлого тона.



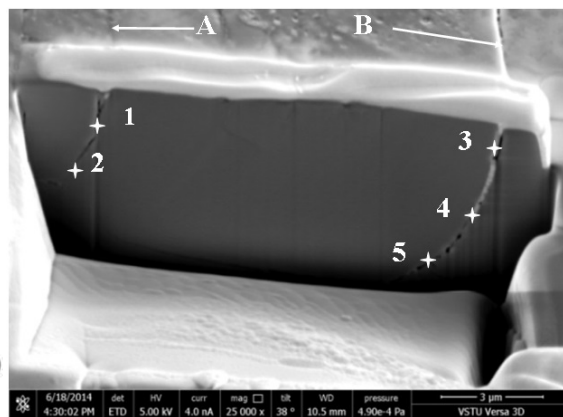
*а)*



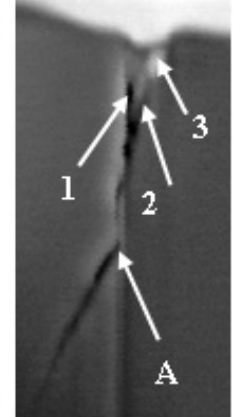
*б)*



*в)*



*з)*



*д)*

**Рис. 4.** Площадка износа кристалла карбида кремния после микроцарапания молибдена (*а, б*), микросечение поверхности (*з, д*) и диаграмма распределения молибдена по линии сканирования *АВ* (*в*)

Содержание молибдена определяли в точках 1 – 5 по траектории внутренних трещин А и В. В точках 1 и 2 трещины А молибден не обнаружен. В точке 3 трещины В концентрация молибдена около 9 % атом. В точке 4, на границе предполагаемого проникновения молибдена в трещину (глубина около 2,6 мкм), концентрация снижается до 4 % атом. Ширина трещины на границе проникновения материала 35...40 нм. В точке 5 молибдена нет.

Более детальные исследования трещины А показали, что перед выходом на поверхность трещина разделяется на две составляющие 1 и 2 (рис. 4, *д*). На участке разделения ширина трещины 90...100 нм. На поверхность площадки износа выходит только трещина 2, ши-

рина которой в месте выхода около 100 нм. На глубину 130 нм трещина заполнена металлом. Об этом свидетельствуют результаты микроанализа: концентрация молибдена на глубине около 70 нм достигает 10 % атом. На глубине 130...150 нм ширина трещины 2 уменьшается до 30 нм.

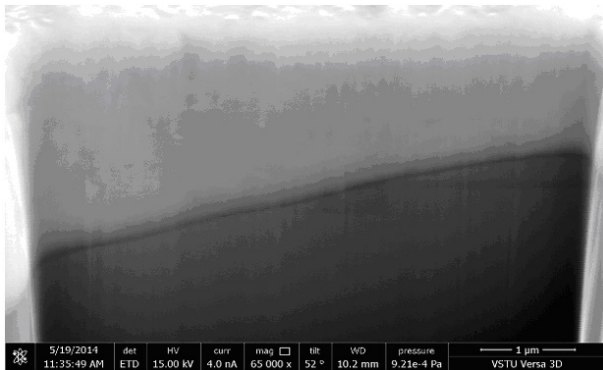
Очевидно, что через щель шириной 30...40 нм дальнейшее продвижение металла затруднено.

Аналогичным образом проведены исследования морфологии и химического состава площадки износа карбида кремния при микроцарапании остальных металлов. Установлено, что затекание металла внутрь трещины происходит еще при микроцарапании вольфрама.

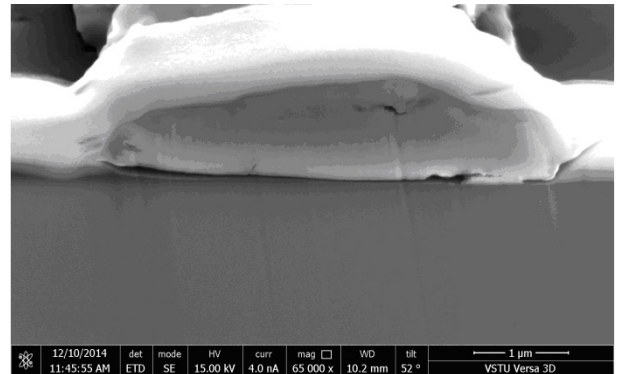
Интенсивность схватывания налипшего металла с кристаллом оценивали качественно по плотности прилегания налива. Состояние контакта анализировали при наклоне предметного столика на угол до  $52^\circ$  и методом микросечений налива и кристалла.

Налипы титана прилегают к площадке износа карбида кремния плотно, без зазоров (рис. 5, а). Подобным образом ведут себя цирконий и ванадий. Налипы ниобия не столь

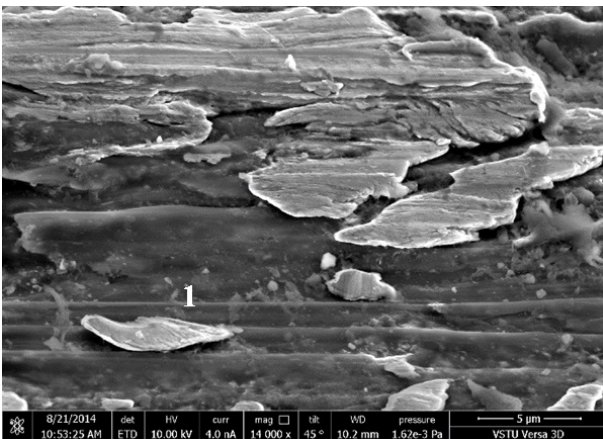
плотно прилегают к поверхности кристалла и на участках имеются зазоры (рис. 5, б). Налипы кобальта на поверхности корунда выглядят отдельными лепестками, разбросанными на поверхности площадки износа карбида кремния (рис. 5, в). Состояние торцевой части микросечения 1 свидетельствует об отсутствии сплошного контакта металла с кристаллом (рис. 5, г).



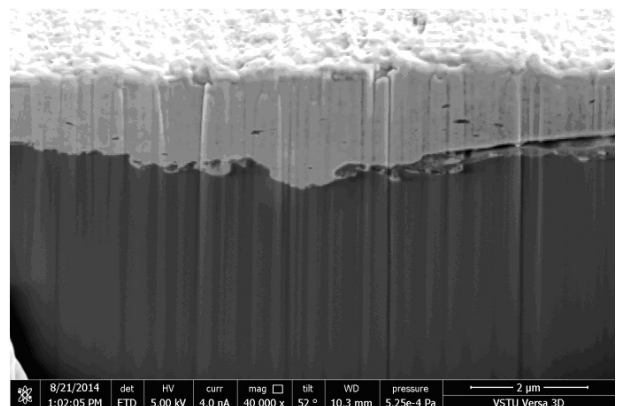
а)



б)



в)



г)

**Рис. 5. Состояние поверхности контакта налива металла с площадкой износа:**

а – титан; б – ниобий; в, г – кобальт

По степени прилегания налива к поверхности площадки износа кристалла металлы классифицированы на две группы: прилегающие плотно (титан, цирконий, ванадий) и с зазором (остальные металлы).

Суммарную интенсивность переноса металла на поверхность площадки износа кристалла оценивали сканированием по площади (рис. 6, а). Результаты получены как среднее арифметическое измерение концентрации металла на 3 – 4-х площадках износа.

В связи с достаточно большой дисперсией значимое отличие между металлами IVB подгруппы титаном и цирконием не получено. В подгруппе VB концентрация ванадия на пло-

щадке износа больше концентрации ниобия. Наименьший перенос металла наблюдается при микроцарапании тантала. Из этого следует, что перенос металла в подгруппе уменьшается с увеличением главного квантового числа валентных электронов атома металла.

В периодах концентрация титана значительно не отличается от концентрации ванадия, концентрация ниобия от концентрации циркония. В подгруппе VIB концентрация вольфрама больше концентрации молибдена, т.е. с увеличением главного квантового числа валентных электронов атомов металла перенос металла на площадку износа возрастает.

Как было показано ранее, при микроцара-

паний молибдена и вольфрама металлы оседают в основном в трещинах и других разрушениях поверхности кристалла. При микроцарапании вольфрама, в связи с его высокой твердостью, формируется более развитая поверхность площадки износа с большим количеством дефектов, где в основном сосредотачиваются металлы подгруппы VIB. Данный факт следует рассматривать, как основную причину более высокой концентрации вольфрама на поверхности площадки износа карбида кремния.

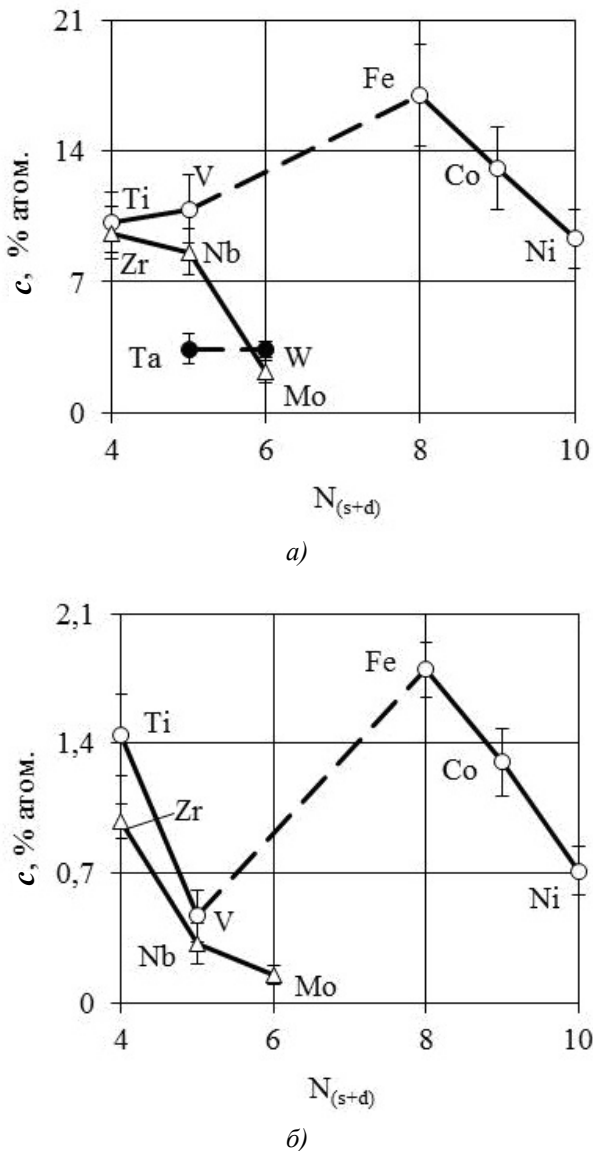


Рис. 6. Зависимость концентрации атомов металла *c* от числа  $N_{(s+d)}$ -валентных электронов в периодах после микроцарапания (а) и после удаления налипшего металла (б):

○ – 4 период; Δ – 5 период; ● – 6 период

Методом химического травления в растворах кислот металл был удален с поверхности

кристаллов. После травления концентрация металла снижается почти на порядок (рис. 6, б). Произошли изменения закономерности переноса металла в периодах. С переходом от металлов подгруппы IVB к VB наблюдается снижение переноса металла на площадку износа карбида кремния. В подгруппах с увеличением числа валентных (s+d)-электронов количество металла, оставшегося после травления в поверхностном слое площадки износа, также снижается. С переходом от металла первой половины 4-го периода к железу наблюдается более существенное, почти трехкратное повышение содержания металла.

Перенос карбида кремния на обработанную поверхность металлов исследовали при шлифовании без охлаждения кругом из карбида кремния 64CF60MB. Режим обработки: скорость шлифования – 30 м/с; продольная подача стола – 12 м/мин; подача на глубину – 0,01 мм/ход. Интенсивность контактного взаимодействия оценивали по количеству перенесенного кремния [7].

На основании статистического анализа (сравнение дисперсий и средних арифметических) можно утверждать, что в подгруппе IVB содержания кремния на шлифованной поверхности уменьшается от титана к гафнию, т.е. с увеличением главного квантового числа *n*-валентных электронов атомов металла (рис. 7, а). Такая же закономерность наблюдается и для металлов подгруппы VIB, но количество переносимого кремния почти на порядок меньше, чем при шлифовании металлов подгруппы IVB. В подгруппе VB содержание кремния увеличивается с ростом главного квантового числа. В периодах содержание кремния возрастает от металлов подгруппы IVB к металлам подгруппы VB и снижается у металлов подгруппы VIB.

С переходом от последнего элемента первой половины периода хрома к первому металлу восьмой подгруппы второй половины периода железу содержание кремния не изменяется. С увеличением количества валентных электронов на *d*-подоболочке концентрация кремния снижается у кобальта и возрастает у никеля, превосходя содержание кремния на поверхности железа [8].

Из сопоставления результатов по переносу металлов на площадку износа карбида кремния (см. рис. 6) и кристаллов карбида кремния на шлифованную поверхность (см. рис. 7, а) следует, что в подгруппе IVB с увеличением главного квантового числа взаимоперенос материалов снижается. Подобная закономер-

ность просматривается и в подгруппе VIB, кроме переноса вольфрама, содержание атомов которого больше атомов молибдена. Но причина данного факта не в более высокой адгезионной активности вольфрама к карбиду кремния, а в большем количестве дефектов на площадке износа карбида кремния, где оседает металл в результате механического защемления. На поверхности кристалла без трещин и выкрашивания концентрация вольфрама меньше.

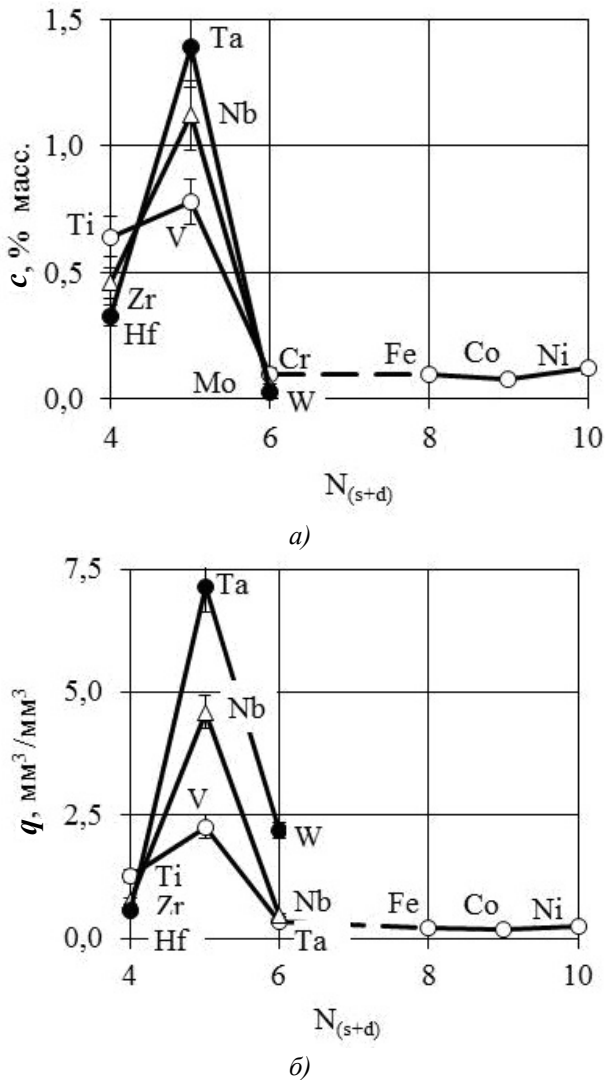


Рис. 7. Зависимость концентрации кремния  $c$  на шлифованной поверхности (а) и удельного износа круга  $q$  (б) от числа валентных электронов  $N_{(s+d)}$

Различия в закономерностях взаимопереноса материалов наблюдаются при микроцарапании и шлифовании металлов подгруппы VB: количество металла, переносимого на площадку износа карбида кремния, с увеличением главного квантового числа валентных электронов атомов металлов снижается, пере-

нос абразивного материала на обработанную поверхность возрастает.

Удельный износ круга  $q$  в каждом периоде с увеличением количества валентных электронов возрастает при переходе от металлов IVB к металлам VB подгруппы и снижается к металлам подгруппы VIB (рис. 7, б). С увеличением главного квантового числа валентных электронов  $q$  уменьшается в IVB подгруппе и увеличивается в подгруппах VB и VIB. Таким образом, износ круга при шлифовании  $d$ -переходных металлов находится также в периодической зависимости от числа валентных электронов.

Для металлов IVB и VB подгрупп наблюдается одинаковый характер изменения удельного износа круга и количества переносимого кремния: в подгруппе IVB износ круга и содержание кремния на поверхности металла уменьшаются с увеличением  $n$ , в подгруппе VB – увеличиваются. Таким образом, при шлифовании адгезионно-активных металлов в подгруппах износ круга снижается с уменьшением содержания кремния на шлифованной поверхности, характеризующего интенсивность суммарного адгезионно-когезионного взаимодействия пары абразив–металл [9].

У металлов VIB подгруппы наблюдается обратная зависимость удельного износа круга от главного квантового числа валентных электронов: с ростом  $n$  перенос абразивного материала снижается,  $q$  – увеличивается (см. рис. 7, б).

С увеличением  $n$  возрастает атомная стабильность электронной конфигурации, соответственно уменьшается склонность атомов к различного рода взаимодействиям. Поэтому в направлении от хрома к вольфраму уменьшается коэффициент трения карбида кремния по металлам при склерометрировании [5] и перенос кремния при шлифовании металлов кругом из карбида кремния. Но данный фактор, как показывают результаты экспериментов, не будет определять изнашивание круга.

Адгезионные процессы при шлифовании металлов VIB подгруппы практически не развиваются, о чем убедительно свидетельствуют оптические и электронно-микроскопические исследования морфологии площадок износа карбида кремния и обработанной поверхности металлов. Например, рельеф и субмикрорельеф поверхности металлов VIB подгруппы после шлифования достаточно чистый и совершенно не сопоставим с состоянием поверхности металлов IVB и VB подгрупп.

Таким образом, при шлифовании металлов



VIB подгруппы физико-химическое взаимодействие зерна с металлом не является определяющим фактором в изнашивании абразивного материала.

На изнашивание инструмента в данном случае существенное влияние оказывает связующая стабильность электронной конфигурации, контролирующая силы сцепления атомов в конденсированном состоянии. Например, в нормальных условиях предел прочности на разрыв  $\sigma_b$  хрома, молибдена и вольфрама равен соответственно 380, 560 и 1470 МПа. У металлов подгрупп титана и ванадия  $\sigma_b$  изменяется в интервале, соответственно, 250...440 МПа и 250...500 МПа [10]. Почти четырехкратный рост прочности металлов в подгруппе VIB существенно увеличивает энергетические затраты на разрушение металла. В связи с этим, при шлифовании металлов подгруппы VIB с увеличением  $n$  износ инструмента возрастает.

### Выводы

По интенсивности взаимопереноса материалов тугоплавкие металлы подразделяются на адгезионно-активные (титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал) и инертные (хром, молибден, вольфрам).

При обработке металлов IVB (титан, цирконий, гафний) и VIB (хром, молибден, вольфрам) подгрупп Периодической системы интенсивность взаимопереноса материалов снижается с увеличением главного квантового числа  $n$  валентных электронов атомов металла. В подгруппе VB (ванадий, ниобий, тантал) с увеличением  $n$  интенсивность переноса металла на площадку износа кристалла снижается, абразивного материала на шлифованную поверхность – возрастает.

При обработке адгезионно активных металлов износ шлифовального круга во многом зависит от интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразив–металл и возрастает с увеличением содержания кремния, перенесенного на поверхность металла. При обработке инертных металлов подгруппы VB износ круга определяется связующей стабильностью электронных конфигураций атомов металла и возрастает с увеличением главного квантового числа валентных электронов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Бернлинер, Э.Д.

Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 576 с.

2. Носенко, В.А. Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ мод. Smart-B1224 III / В.А. Носенко, Р.А. Белухин, А.В. Фетисов, Л.К. Морозова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – №5 (184). – С. 35-39.

3. Носенко, В.А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авиллов, В.И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66-71. – Режим доступа: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

4. Носенко, В.А. Морфология поверхности карбида кремния после микроцарапания молибдена / В.А. Носенко, А.В. Авиллов, В.О. Харламов, В.И. Бахмат // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №6. – С. 66-73.

5. Носенко, В.А. Шлифование адгезионно активных металлов. – М.: Машиностроение. – 2000. – 262 с.

6. Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твердом теле / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. – М.: Наука. 1976. – 339 с.

7. Носенко, В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – №5. – С. 85-91.

8. 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.

9. Носенко, В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – №1. – С. 73-77.

10. Свойства элементов: справочник / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия. – 1985. – 672 с.

### REFERENCES

1. Chichinadze, A.V. *Friction, Wear and Lubrication (Tribology and Triboengineering)* / A.V. Chichinadze, E.M. Bernliener, E.D. Brown et al.; under the general editorship of A.V. Chichinadze. – M.: Mechanical Engineering. – 2003. – pp. 576.

2. Nosenko, V.A. Test complex based on NC precision profile grinding machine of model Smart-B1224 III / V.A. Nosenko, R.A. Belukhin, A.V. Fetisov, L.K. Morozova // *Proceedings of Volgograd State Technical University*. – 2016. – No. 5 (184). – pp. 35-39.

3. Nosenko, V.A. Corundum surface morphology after titanium alloy micro-scratching / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko, A.V. Avilov, V.I. Bakhmat // *Mechanical Engineering: network digital scientific journal*. – 2014. – No. 3. – pp. 66-71. – Access mode: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

4. Nosenko, V.A. Silicon carbide surface morphology after molybdenum micro-scratching / V.A. Nosenko, A.V. Avilov, V.O. Kharlamov, V.I. Bakhmat // *Proceedings of Higher Education Institutions. Mechanical Engineering*. – 2015. – No. 6. – pp. 66-73.

5. Nosenko, V.A. *Adhesion-Active Metal Grinding*. – M.: Mechanical Engineering. – 2000. – pp. 262.

6. Samsonov, G.V. *Electron Localization in Solids* / G.V. Samsonov, I.F. Pryadko, L.F. Pryadko. – М.: Science. 1976. – pp. 339.

7. Nosenko, V.A. Interaction intensity criterion of worked and grinding materials at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2001. – No. 5. – pp. 85-91.

8. Nosenko, V.A. To problem of contact interaction intensity of d-transition metals with silicon carbide at grinding /

V.A. Nosenko, // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2002. – No. 5. – pp. 78-84.

9. Nosenko, V.A. Contact interaction impact upon abrasive tool wear at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2005. – No. 1. – pp. 73-77.

10. *Elements Properties: Reference Book* / under the editorship of M.E. Drits. – М.: Metallurgy. – 1985. – pp. 672.

Рецензент д. ф-м.н. В.Г. Кульков

УДК 62-1/-9

DOI: 10.12737/article\_59d496ebddec57.65109772

А.В. Морозов, к.т.н.,

В.Г. Гусев, д.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru; ntk\_2005@rambler.ru

## Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга

*Выполнено компьютерное моделирование в современном САЕ-комплексе Cosmos Works напряженного состояния режущей поверхности и центрального отверстия шлифовального инструмента с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности. На основе результатов моделирования разработан прочный инструмент, позволяющий проводить дискретное шлифование на интенсивных режимах резания.*

**Ключевые слова:** шлифовальный круг; высокочастотная дискретизация; компьютерное моделирование; режущая поверхность; напряженное состояние; механическая прочность.

A.V. Morozov, Can. Eng.,

V.G. Gusev, D. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir 87, Gorky Str., Vladimir 600000)

## Stressed state simulation of discrete abrasive disk cutting surface

*Grinding disks with high frequency discretization of a cutting surface allow not only breaking a cutting process and decreasing its thermal intensity, but decreasing a vibration level of a technological system which has a positive effect upon quality of a surface worked. But, for realization of intensive grinding modes these tools should possess a mechanical strength not only in the central hole, but that of a discrete cutting surface. In this connection in modern CAE-complex CosmosWorks a computer simulation of a stressed state of a cutting surface and a central hole of the grinding disk subjected to a high-frequency discretization is carried out. On the basis of the simulation results there is developed a durable tool allowing the fulfillment of discrete grinding in intensive modes.*

**Keywords:** grinding disk; high-frequency discretization; computer simulation; cutting surface; stressed state; mechanical strength.

Применение новых способов шлифования [1, 2] и конструкций шлифовальных инструментов [3, 4] с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности позволяет уменьшить уровень вибрации системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка», износ абразивного и алмазного правящего инструмента [5, 6], а также назначать более высокие режимы резания при отсутствии термического повреждения обработанного поверхностного слоя [7, 8].

Шлифовальный круг с высоко частотной

дискретизацией режущей поверхности представляет собой абразивную основу 1, в которой с помощью лазерного луча или абразивно-жидкостной струи высокого давления вырезано большое количество отверстий 2 малого радиуса  $r = 0,25 \dots 2,5$  мм (рис. 1, а, б). Окружной шаг  $T_0$  и радиус  $r$  малых отверстий определяются исходя из степени снижения температуры шлифуемой поверхности заготовки, а осевой шаг  $T_{oc}$  – неравенством  $3r < T_{oc} < 4r$ , что обеспечивает отсутствие сплошного резания в течение каждого оборота