

УДК 621.923

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-22-28

В.А. Носенко, д.т.н.,

А.В. Фетисов, к.т.н.,

Н.Д. Сердюков, аспирант

(Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО ВГТУ,
404121, Волгоградская область, г. Волжский, ул. Энгельса 42а)

E-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru; fetisov@volpi.ru

Морфология и химический состав поверхности титанового сплава после шлифования кругом из карбида кремния

Приведены результаты исследований морфологии шлифованной поверхности титанового сплава ВТ9. Показаны электронные фотографии налипов металла и кристаллов карбида кремния. Определены размеры этих объектов. В результате переноса абразивного материала концентрация кремния в нанослоях обработанной поверхности возрастает в 2 раза по сравнению с исходным содержанием в сплаве.

Ключевые слова: шлифование; титановый сплав; карбид кремния; налипы металла; морфология; рентгеноспектральный микроанализ; химический состав.

V.A. Nosenko, Dr.Sc. Tech.,

A.V. Fetisov, Can.Sc.Tech.,

N.D. Serdyukov, Post graduate student

(Volga Polytechnic Institute (Branch) of FSBEI HE VSTU, 42a, Engels Str., Volgzhsky, Volgograd region)

Morphology and chemical composition of titanium alloy surface after grinding with silicon carbide disk

The investigation results of the ground surface morphology of titanium alloy TT9 are presented. There are shown electronic photos of metal pickups and silicon carbide crystals. The dimensions of these objects are defined. As a result of abrasive displacement a silicon concentration in nano-layers of the surface worked increases twice as compared with the initial composition in the alloy.

Keywords: grinding; titanium alloy; silicon carbide; metal pickup; morphology; X-ray spectrum microanalysis; chemical composition.

Введение

Титановые сплавы относятся к числу труднообрабатываемых металлов, что обусловлено их высокой адгезионной активностью к абразивному материалу [1, 2]. Валентные электроны изолированного атома титана имеют конфигурацию d^2s^2 . В конденсированном состоянии образуются флуктуирующие d^3s^- , d^4s^0 - и d^1s^2p -состояния, что определяет склонность атома титана к взаимодействию с другими химическими элементами [3].

В общем случае под адгезией понимают все виды межатомного или межмолекулярного взаимодействия между твердыми телами [4]. В зависимости от строения кристаллов и условий взаимодействия в зоне контакта происходит образование химических (металлические, ионные, ковалентные) или физических (силы Ван-дер-Ваальса) связей. Вследствие адгезионной активности титана и его сплавов, при обработке шлифованием происходит налипание металла на вершины зерен шлифовального круга [5, 6], что вызывает увеличе-

ние теплонапряженности процесса резания и вероятности образования шлифовочных прижогов. Помимо адгезионной активности титан обладает относительно низкой теплопроводностью. Температура в зоне шлифования при обработке титановых сплавов почти в 2 раза выше, чем при обработке сталей [7].

Важным резервом для улучшения обрабатываемости шлифованием титана и его сплавов является подбор наименее адгезионно активного абразивного инструмента и введение в зону контакта специальных сред. Наибольшее распространение при обработке титановых сплавов, ввиду его относительно низкой адгезионной активности, в качестве абразивного материала получил карбид кремния [8].

Об интенсивности адгезионного взаимодействия на границе контакта взаимодействующих тел можно судить по взаимопереносу материалов. При шлифовании кругом из карбида кремния возможен перенос абразивного материала на обработанную поверхность. Интенсивность переноса определяют по содержанию кремния, например, методом локального микрорентгеноспектрального анализа. Интенсивность переноса металла на площадку износа кристалла абразивного материала контролируют по содержанию химических элементов, входящих в состав обрабатываемого материала [5].

Перенос продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность рассмотрен при шлифовании в различных условиях кругами из карбида кремния на бакелитовой связке [9]. В работах [10, 11] приведены некоторые результаты исследований морфологии и химического состава обработанной поверхности при глубинном шлифовании титанового сплава высокопористыми кругами на керамической связке. Отмечается возможность переноса на шлифованную поверхность кристаллов карбида кремния. При маятниковом шлифовании кругами из карбида кремния на керамической связке морфология и химический состав обработанной поверхности исследованы недостаточно. Особую актуальность приобретает исследование морфологии и химического состава обработанной поверхности в связи с постоянным совершенствованием средств наблюдения и контроля.

Методика исследований

Исследования выполнены на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Versa 3D DualBeam, в котором сосредоточены по-

следние мировые достижения в области контроля качества обработанной поверхности.

На станке с ЧПУ мод. CHEVALIER Smart-V1224 III обрабатывали заготовки из титанового сплава BT9 [12]. Размер обрабатываемой поверхности 100×10 мм. Шлифование осуществляли методом врезной подачи кругом из карбида кремния 1 350x20x127 64CF80L7V с охлаждением СОЖ «Волтес». Режимы обработки: скорость круга – 30 м/с; скорость продольной подачи – 12 м/мин; радиальная подача – 0,005 мм/ход, без выхаживания; припуск – 0,5 мм.

Перед исследованием на электронном микроскопе поверхности образцов очищали в ультразвуковой мойке Elmasonic S40H. Продолжительность очистки в 95 %-ном растворе этилового спирта – 30 мин, частота ультразвуковых волн – 30 кГц.

Результаты исследований и обсуждение

Титан относится к группе адгезионно активных металлов. При взаимодействии с зерном шлифовального круга сплав налипает на вершину зерна, в том числе, в виде стружки, приваренной к передней поверхности. На последующем контакте налипший металл переносится и размазывается по обработанной поверхности, характерный вид которой приведен на рис. 1, а.

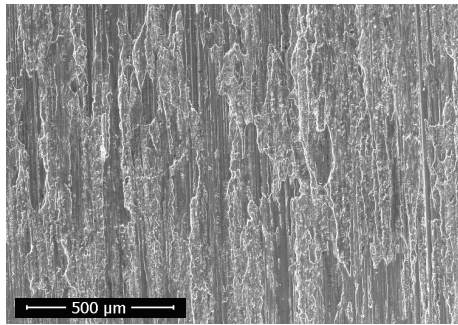
Морфологию поверхностного слоя хорошо передает электронная фотография, полученная при повороте предметного столика вокруг своей оси на 90° и наклоне его плоскости на 45° (рис. 1, б).

Фрагмент налипа при базовом увеличении $\times 16\,000$ показан на рис. 1, в, толщина налипа более 2 мкм. Между основной поверхностью и налипом имеется зазор, величина которого на отдельных участках превышает 1 мкм. Строе-ние торца налипа свидетельствует о его многослойности. Встречаются налипы, толщина которых превышает 3 мкм.

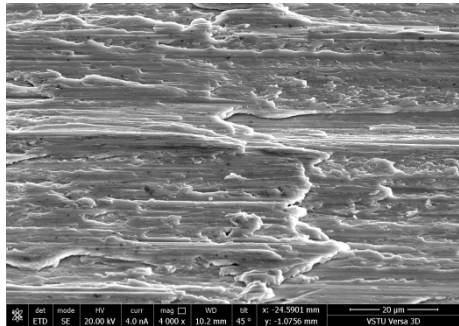
На виде налипа сверху (рис. 1, г) можно выделить не менее пяти сегментов или отдельных налипов, обозначенных цифрами 1 – 5, что свидетельствует о многослойности налипа. Налип 5 в верхней части имеет разрыв, через который видна еще одна поверхность 6. Каждый из выделенных налипов может состоять из нескольких более тонких слоев или отдельных прослоек. На отдельных участках поверхности встречаются налипы, толщина которых достигает 8 мкм.

При шлифовании, в результате интенсивно-

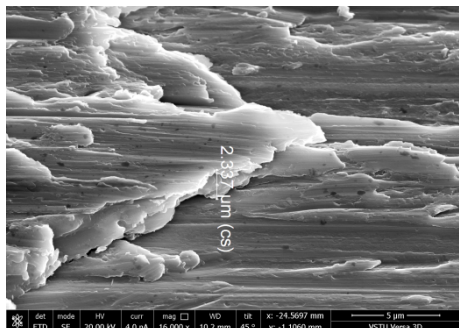
го адгезионного взаимодействия титанового сплава с абразивным инструментом, происходит перенос продуктов износа инструмента, в частности, кристаллов карбида кремния на обработанную поверхность.



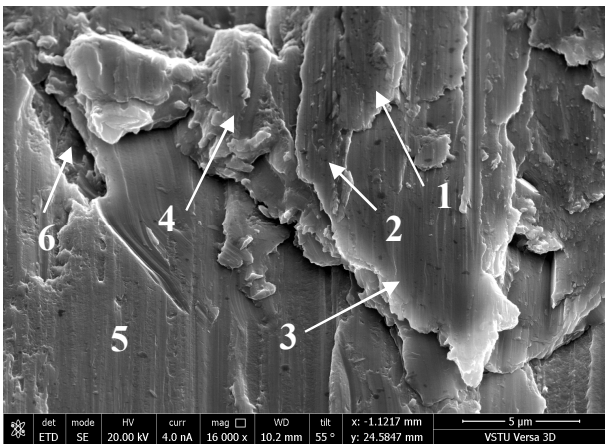
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Морфология шлифованной поверхности

На рис. 2, а представлен фрагмент шлифованной поверхности с предполагаемыми кристаллами карбида кремния, образовавшихся в результате скалывания одного или нескольких вершин зерен. По количеству кристаллов, сконцентрированных на шлифованной поверхности площадью около 900 мкм², данный участок относится к шаржированным в наибольшей степени.

По компактности расположения выделены три группы кристаллов. В группу I входит крупный кристалл, два-три кристалла средних размеров и несколько мелких (рис. 2, б). Длина крупного кристалла около 23 мкм, ширина и высота со стороны видимого торца, соответственно, 3 и 6 мкм. Задний торец кристалла обращен к торцу налипшего металла, толщина которого более 6 мкм. С правого боку на уровне переднего торца к кристаллу примыкает кристалл средних размеров длиной около 9 мкм.

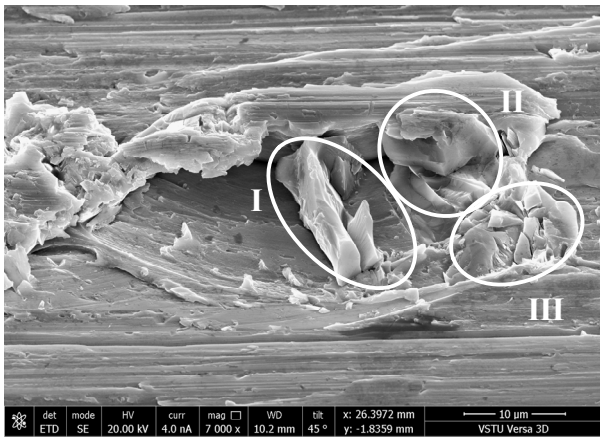
Группа II состоит фактически из одного крупного кристалла, вдавленного в металл. Верхняя часть кристалла покрыта налипшим металлом, толщиной около 1 мкм. Кристалл разделен трещинами на более мелкие части. Высота выступающей из металла части кристалла более 7 мкм.

Третью группу можно рассматривать также состоящую из одного кристалла, покрытого трещинами, разделяющими кристалл на более мелкие составляющие (рис. 2, в).

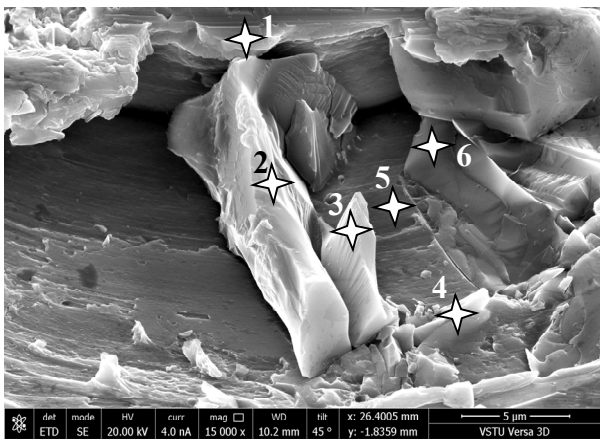
Химический анализ отдельных участков поверхности проводили в точках 1 – 6 (см. рис. 2, б). Точка 1 расположена на вершине налива металла, примыкающего к торцу большого кристалла группы I. Точки 2, 3 и 4 выбраны, соответственно, на верхней части этого кристалла, примыкающего к нему кристалла среднего размера и, расположенного рядом более мелкого кристалла. Точка 5 выбрана на поверхности, разделяющей кристаллы I и II группы; точка 6 принадлежит кристаллу II группы.

Концентрация кремния в точках 2, 3 и 4 соответственно 61, 58 и 54 % мас., концентрация титана изменяется в диапазоне 4...18 % мас. (рис. 3). Морфология и химический состав объектов 2 – 4 позволяют считать их кристаллами карбида кремния, на поверхности которых имеются следы металла или явно выраженный налип (точка 4). Количество налипшего металла в соответствии с концентрацией титана возрастает от точки 2 к точке 4. По внешнему виду объект б также можно отнести к кристаллам. Концентрация кремния и титана

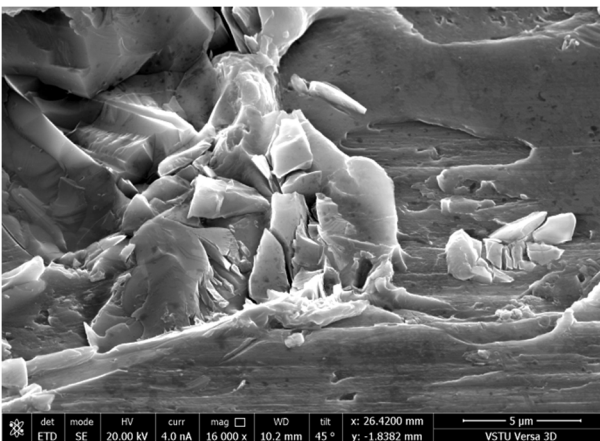
в точке *б* соответственно 22 и 58 %. Достаточно высокая концентрация титана свидетельствует о наличии на поверхности кристалла пленки налипшего титанового сплава.



a)



б)



в)

Рис. 2. Морфология шлифованной поверхности, содержащей кристаллы карбида кремния

Концентрация кремния и титана в точке 5 соответственно 5 и 85 % мас. Поверхность между кристаллами I и II групп по морфоло-

гии близка к поверхности металла. Но содержание кремния существенно превышает требования ГОСТ 19807, согласно которого концентрация должна находиться в диапазоне 0,20...0,35 % мас. Высокая концентрация кремния означает присутствие в зоне активации рентгеновского характеристического излучения продуктов износа шлифовального круга, содержащих кремний – кристаллов карбида кремния и/или керамической связки. Не исключена возможность диффузионного насыщения титанового сплава атомами кремния и образование продуктов химического взаимодействия абразивного инструмента с титановым сплавом [1].

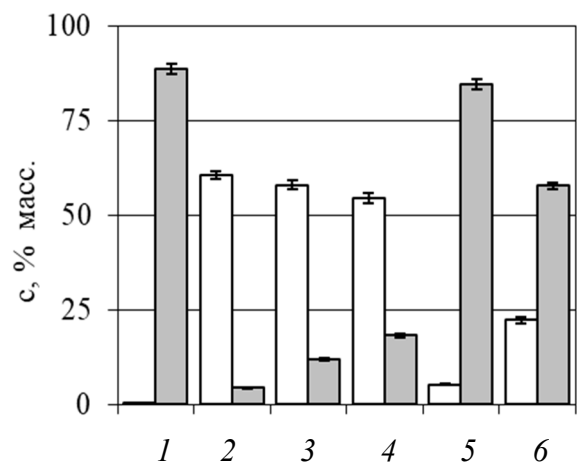
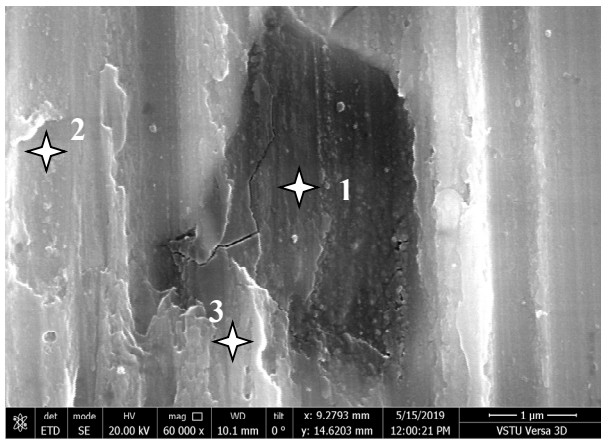


Рис. 3. Концентрация кремния и титана в анализируемых точках шлифованной поверхности (см. рис. 2, б):

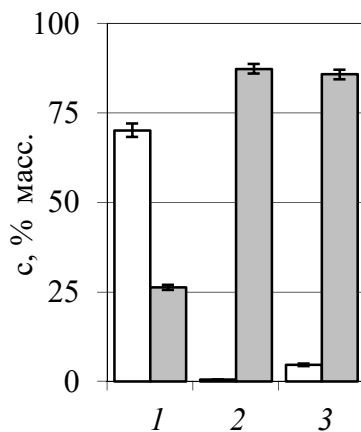
□ – кремний; ■ – титан

Концентрация химических элементов в точке *б* налива (% мас.): Ti – 88,70±1,37; Al – 7,13±0,50; Mo – 2,55±0,15; Zr – 1,20±0,10; Si – 0,42±0,05. Экспериментальные данные по большинству химических элементов соответствуют требованиям ГОСТ 19807 на химический состав титанового сплава ВТ9.

В отдельных участках шлифованной поверхности кристаллы карбида кремния могут быть полностью погружены в металл (рис. 4, *a*). Фотография получена при базовом увеличении х60 000. Размер видимой части объекта относительно центра: по оси *x* – 2,3 мкм; по оси *y* – 3,4 мкм. Можно предположить, что вдавливание кристалла произошло после переноса продуктов износа вершины зерна на обработанную поверхность в результате контакта с другими вершинами зерен, глубина резания которых в месте контакта с данным кристаллом была меньше толщины кристалла.



а)



б)

Рис. 4. Электронная фотография объекта (а) и химический состав в точках 1–3 (б):

□ – кремний; ■ – титан

Химический состав определяли в трех точках: точка 1 выбрана на видимой части поверхности объекта, точка 2 – на расстоянии около 2 мкм от видимой левой грани объекта, точка 3 – на возможном налипке металла. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в точке 1 кроме кремния содержится достаточно большое количество титана – около 26 % масс., что свидетельствует о наличии на кристалле пленки металла (рис. 4, б). В точке 2 основным химическим элементом является титан – почти 90 % масс., содержание кремния приближается к исходной концентрации в сплаве. В точке 3 основным химическим элементом также является титан, но концентрация кремния достигает 4,6 % атом. Вероятно, что глубина зоны генерации рентгеновского характеристического излучения в точке 3 больше налипшего слоя титанового сплава и ниже лежащий кристалл карбида кремния попадает в зону генерации. Под воздействием электронов возбуждения в материале генерируется рентгеновское характеристическое

излучение по кремнию.

Кристаллы карбида кремния, шаржированные в обработанную поверхность, следует рассматривать как дополнительные концентраторы напряжений при работе в условиях знакопеременных нагрузок. Учитывая, что из титановых сплавов изготавливают особо ответственные детали, необходимо разрабатывать условия шлифования, существенно снижающие или исключаящие внедрение кристаллов абразивных материалов в обработанную поверхность.

Известно, что перенос материалов при шлифовании, в частности, абразивного материала на обработанную поверхность во многом определяется интенсивностью адгезионного взаимодействия пары «металл – абразивный материал». При шлифовании кругами из карбида кремния содержание кремния на обработанной поверхности можно рассматривать в качестве критерия интенсивности адгезионного взаимодействия [1].

Концентрацию кремния определяли методом сканирования электронным зондом выделенного участка обработанной поверхности. Площадь участка – около 1 мм² (рис. 5). На выделенном участке сделано 400 измерений. Локальность пучка электронов 50 нм.

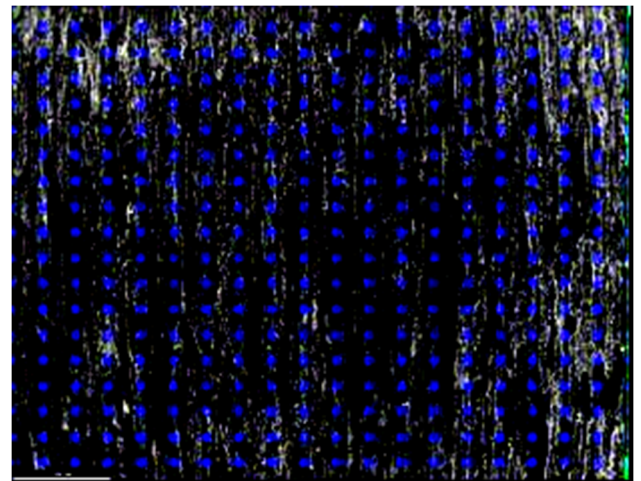


Рис. 5. Распределение точек сканирования по анализируемой площади шлифованной поверхности

Исследовали обработанную поверхность образцов из титанового сплава ВТ9 после шлифования кругом 64CF80L7V с чистовой подачей 0,005 мм/од. Количество измерений на одной поверхности – 9. Количество параллельных опытов – 3. Концентрация кремния на шлифованной поверхности 0,53±0,08 % масс., что почти в два раза больше, чем в исходном сплаве.

Выводы

При шлифовании титанового сплава ВТ9 на чистой подаче 0,005 мм/ход без выхаживания кругом из карбида кремния на керамической связке характеристики 64CF80L7V с охлаждением СОЖ «Волтес» формируется достаточно развитая обработанная поверхность, свидетельствующая об интенсивном адгезионном взаимодействии обрабатываемого материала с абразивным инструментом.

Большая часть обработанной поверхности покрыта налипками титана, перенесенных с вершин зерен, ранее контактировавших с металлом. Толщина большинства налипков 1...3 мкм. Толщина отдельных налипков достигает 8 мкм. Налип имеет многослойное строение.

В результате интенсивного адгезионного взаимодействия происходит перенос абразивного материала на обработанную поверхность. В отдельных участках обработанной поверхности встречаются кристаллы или группа кристаллов карбида кремния, перенесенных на обработанную поверхность в результате скалывания вершин зерен, контактирующих с обрабатываемым металлом. Кристаллы частично или полностью вдавлены в обработанную поверхность.

В результате переноса продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность средняя концентрация кремния возрастает почти в 2 раза по сравнению с исходной концентрацией в сплаве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guoqiang Guo. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive / Guoqiang Guo, Zhiqiang Liu, Qinglong An, Ming Chen // International journal of advanced manufacturing technologies. – 2011. – Vol. 57. – Pp. 135-142.
2. Носенко, С.В., Носенко, В.А., Байрамов, А.А. Влияние правки абразивного инструмента и направления движения стола на шероховатость обработанной поверхности и направление движения стола при глубинном шлифовании заготовок из титановых сплавов // СТИИ. – 2015. – № 1. – С. 21-26.
3. Самсонов, Г.В., Прыдко, И.Ф., Прыдко, Л.Ф. Электронная локализация в твердом теле. – М.: Наука, – 1976. – 338 с.
4. Трение, износ и смазка (трибология и трибтехника) / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
5. Носенко, В.А., Фетисов, А.В., Носенко, С.В., Харламов, В.О. Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании

тугоплавких металлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №10(76). – С. 9-17.

6. Носенко, В.А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В. и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2. – № 3. – С. 66-71.

7. Xinxin Xi. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasives wheels: tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality / Xinxin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jiuhua Xu // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 53. – Pp. 134-145.

8. Справочник технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, – 2019. – 800 с.

9. Носенко, В.А. Совершенствование абразивного инструмента на бакелитовой связке // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 3. – С. 85-90.

10. Nosenko S.V. The Effect of the Operating Speed and Wheel Characteristics on the Surface Quality at Creep-Feed Grinding Titanium Alloys / S.V. Nosenko, V.A. Nosenko, A.A. Koryazhkin // Solid State Phenomena. – 2018. – Т. 284 SSP. – Pp. 369-374.

11. Nosenko V.A. Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt and Nickel in Microscratching / V.A. Nosenko, A.V. Fetisov, V.Y. Puzyrkova // Solid State Phenomena. – 2018. – Т. 284 SSP. – Pp. 363-368.

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

REFERENCES

1. Guoqiang Guo. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive / Guoqiang Guo, Zhiqiang Liu, Qinglong An, Ming Chen // International journal of advanced manufacturing technologies. – 2011. – Vol. 57. – Pp. 135-142.
2. Nosenko, S.V., Nosenko, V.A., Bairamov, A.A. Impact of abrasive tool dressing and table motion direction upon roughness of surface worked and table motion direction at deep grinding of titanium alloy billets // STIN. – 2015. – No.1. – pp. 21-26.
3. Samsonov, G.V., Pryadko, I.F., Pryadko, L.F. *Electronic Localization in Solid*. – М.: Science, - 1976. – pp. 338.
4. *Friction, Wear and Lubrication* (tribology and triboengineering) / under the editorship of A.V. Chichinadze. М.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 576.
5. Nosenko, V.A., Fetisov, A.V., Nosenko, S.V., Kharlamov, V.O. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and micro-scratching of refractory materials // Sci-

ence Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2017. – No.10 (76). – pp. 9-17.

6. Nosenko, V.A. Corundum surface morphology after titanium alloy micro-scratching / Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V. et al. // *Mechanical Engineering: network electronic scientific journal*. – 2014. – Vol.2. – No.3. – pp. 66-71.

7. Xinxin Xi. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasives wheels: tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality / Xinxin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jihua Xu // *Precision Engineering*. – 2018. – Vol. 53. – Pp. 134-145.

8. Reference Book of Technologist / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*. – 2019. – pp. 800.

9. Nosenko, V.A. Abrasive tool updating on bakelite tie // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2004. – No.3. – pp. 85-90.

10. Nosenko S.V. The Effect of the Operating Speed and Wheel Characteristics on the Surface Quality at Creep-Feed Grinding Titanium Alloys / S.V. Nosenko, V.A. Nosenko, A.A. Koryazhkin // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Т. 284 SSP. – Pp. 369-374.

11. Nosenko V.A. Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt and Nickel in Microscratching / V.A. Nosenko, A.V. Fetisov, V.Y. Puzyrkova // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Т. 284 SSP. – Pp. 363-368.

12. Nosenko, V.A., Belukhin, R.A., Fetisov, A.V., Morozova, L.K. Test complex based on NC precision profile-grinding machine CHEVALIER SMART-B 1224 III model // *Bulletin of Volgograd State Technical University*. – 2016. – No.5 (184). – pp. 35-39.

Рецензент д.т.н. С.М. Братан

УДК 621.7

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-28-35

А.Р. Ингеманссон, к.т.н.

(«Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
400071, г. Волгоград, пр. Ленина, б/н),

А.А. Бондарев, к.т.н.

(«Волгоградский государственный технический университет» 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: aleing@yandex.ru

Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями

Предложен подход к решению актуальной научно-практической задачи определения теплофизических свойств современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями с целью разработки надежных математических моделей для технологической подготовки производства и управления выходными параметрами процесса резания. На основе проведенного анализа и расчетов получены значения коэффициентов теплопроводности для режущих инструментов с многослойными покрытиями, наиболее широко применяемых в производственной практике.

Ключевые слова: твердосплавный инструмент; многослойные покрытия; теплопроводность; математические модели; цифровые производственные системы.

A.R. Ingemansson, Can.Sc.Tech.

(“Federal Scientific-Production Center “Titanium-Barricades”, b/n, Lenin Avenue, Volgograd, 400071)

A.A. Bondarev, Can.Sc.Tech.

(“Volgograd State Technical University”, 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005)

Calculation method for thermal conduction definition of modern hard-alloy tools with multilayer coatings

An approach is offered to solve an urgent scientific-practical problem for the definition of thermal-physical properties of modern hard-alloy tools with wear-resistant coatings with the aim to develop reliable simulators for technological pre-production and to control output parameters of a cutting process. On the basis of the analysis carried out computations there are obtained values of heat conductivity factors for cutters with multilayer coatings used most widely in production.

Keywords: hard-alloy tool; multilayer coatings; thermal conduction; simulators; digital production systems.