УДК 621.92

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-1-248-27-30

*В. А. Носенко, А. В. Фетисов, С. П. Кузнецов, В. Г. Карпов***СОСТОЯНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ
ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГОМ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ****Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Волгоградский государственный технический университет»**

E-mail: nosenko@post.volpi.ru

Исследование поверхности сплава на основе ниобия выполнены на электронном микроскопе Versa 3D. Обработку сплава выполняли методом врезания кругом из карбида кремния на керамической связке. Морфология обработанной поверхности свидетельствует об интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным материалом. Установлен факт переноса продуктов износа шлифовального круга на обработанную поверхность и внедрение в металл. Химический состав продуктов износа определяли методом рентгеноспектрального анализа. На основании полученных данных о химическом составе продуктов износа экспериментально доказано присутствие на обработанной поверхности кристаллов карбида кремния, керамической связки и их сочетаний. Приведены данные о размере кристаллов, внедренных в обработанную поверхность.

Ключевые слова: ниобий, шлифование, карбид кремния, морфология, химический состав, рентгеноспектральный микроанализ.

*V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, S. P. Kuznetsov, V. G. Karpov***CONDITION OF THE TREATED SURFACE OF NIOBIUM-BASED
ALLOY WHEN GRINDING FROM SILICON CARBIDE****Volzhsky Polytechnic Institute (branch)
of the Volgograd State Technical University**

The study of the surface of silicon carbide after grinding niobium was carried out on a Versa 3D electronic microscope. It is shown that as a result of the grinding, traces of the grinding wheel material are formed on the treated surface, and the ground material itself is prone to adhesion to the grinding wheel. As a result of cohesive interaction, the metal adhering to the grinding wheel is transferred, and vice versa. And, as a result of adhesion-fatigue processes, mechanical action, there is a hanging wear of the grinding wheel and the indentation of individual crystals of silicon carbide into the surface of the metal being processed. This article examines such features of the behavior of niobium, when grinding it with silicon wheels and is considered from the standpoint of the electronic structure of the metal atom.

Keywords: niobium, grinding, silicon carbide, morphology, chemical suction, X-ray microanalysis.

Введение

Жаропрочные сплавы на основе ниобия используются в авиационных реактивных двигателях для изготовления дисков и неохлаждаемых турбинных лопаток взамен охлаждаемых. Благодаря высокой устойчивости при облучении и сравнительно небольшому захвату тепловых нейтронов применяются в атомной энергетике. В связи с этим, к качеству обработанной поверхности изделий из сплавов на основе ниобия предъявляются высокие требования [1, 2]. Шлифованием относится к числу финишных операций, во многом определяющих качество поверхности изделия, что свидетельствует об актуальности исследования данного процесса. По критерию интенсивности контактного взаимодействия пары абразив-металл, оцениваемого по количеству абразивного материала, перенесенного на обработанную поверхность при

шлифовании, ниобий относится к группе адгезионно-активных металлов [3].

Отличительной особенностью абразивной обработки, по сравнению с лезвийной, является способность к самозатачиванию. Самозатачиваемость – свойство шлифовального круга длительно сохранять работоспособное состояние за счет непрерывного образования новых режущих кромок абразивных зерен. Образование новых режущих кромок происходит в результате поверхностного выкрашивания и скалывания вершин зерен.

С использованием последних мировых достижений в области контроля качества обработанной поверхности [4–6] Осколки кристаллов или зерен, вырванных из связки круга, способны переноситься на обработанную поверхность. Перенос абразивного материала происходит при шлифовании различных металлов

кругами из карбида кремния, корунда, сверхтвердых материалов [7–10]. Менее изучен перенос материалов при шлифовании сплавов на основе ниобия.

Цель работы

Исследование морфологии и химического состава поверхности ниобия после шлифования абразивным инструментом из карбида кремния.

Методы исследования

Морфологию и химический состав обработанной поверхности исследовали на электронном микроскопе Versa 3D DualBeam. Химический состав определяли методом локального микрорентгеноспектрального анализа. Заготовки из ниобиевого сплава обрабатывали на прецизионном плоскошлифовальном станке с ЧПУ мод. CHEVALIER Smart – B1224 III [11]. Шлифование осуществляли методом врезной подачи кругом из карбида кремния 1 350x20x127 64CF60K7V на керамической связке с охлаждением. Режим обработки: v – 35 м/с; v_s – 12 м/мин; S_t – 0,010 мм/ход, без выхаживания; припуск – 0,5 мм.

Результаты исследований и обсуждение

Обработанная поверхность при шлифовании является результатом царапания большого количества вершин зерен, расположенных на рабочей поверхности абразивного инструмента, обрабатываемой поверхности. На рис. 1, а показана обработанная поверхность на последнем проходе со стороны выхода шлифовального круга. Направление подачи стола попутное, в привязке к рассматриваемому рисунку – снизу вверх, направление главного движения – сверху вниз. На поверхности можно выделить отдельные царапины. При базовом увеличении 1050 крат относительно чистые царапины, на которых различимы микронеровности вершины

зерна, встречаются редко (рис. 1, б). Состояние поверхности сплава после шлифования кругом из карбида кремния свидетельствует о достаточно интенсивном адгезионном взаимодействии металла с абразивным инструментом из карбида кремния.

Очевидно, металл интенсивно налипает на вершины наиболее выступающих зерен рабочей поверхности круга. При последующем контакте вершины зерна с обрабатываемым металлом, налипсы образовавшиеся на вершинах зерен переносятся на поверхность царапины. В результате адгезионно-когезионного взаимодействия зерна с металлом и налипшего на вершину зерна металла с обрабатываемым материалом формируется обработанная поверхность, представленная на рис. 1. Например, при шлифовании сплава никеля кругом из кубического нитрида бора обработанная поверхность достаточно чистая, царапины на поверхности никеля хорошо различимы, что свидетельствует о низкой интенсивности адгезионного взаимодействия (рис. 1, в).

Предполагаемыми продуктами износа шлифовального круга из карбида кремния на керамической связке могут быть кристаллы карбида кремния, керамической связки и их сочетание. Анализ химических элементов, входящих в состав карбида кремния и связки позволяет утверждать, что средний атомный номер продуктов износа будет существенно меньше атомного номера сплава ниобия. Например, средний атомный номер SiC – 10, сплава ниобия – более 40. В связи с существенной разницей среднего атомного номера продуктов износа абразивного инструмента и ниобия использовали фотографии обработанной поверхности, полученные в отраженных (обратно-рассеянных) электронах, на которых предполагаемые продукты износа абразивного инструмента выделяются более темным цветом.

Рис. 1. Состояние обработанной поверхности сплава на основе ниобия после шлифования кругом из карбида кремния при базовом увеличении 131 крат (а) и 1050 крат (б) и никелевого сплава при шлифовании кругом из кубического нитрида бора (в)

На рис. 2 приведены некоторые фотографии предполагаемых продуктов износа абразивного инструмента, обнаруженные на обработанной поверхности. Продукты износа частично или полностью вдавлены в металл (рис. 2). Скалывание вершины абразивного материала или вырывание зерна из связки круга может происходить в момент царапания вершиной зерна

(рис. 2, а). Размер объекта по горизонтали (направление перпендикулярное скорости главного движения) около 70 мкм. При скалывании вершины зерна или вырывании зерна из связки возможно изменение первоначальной траектории главного движения (рис. 2, б). Размер отдельных объектов может приближаться к среднему размеру зерна шлифовального круга.

Рис. 2. Перенос материала абразивного инструмента на обработанную поверхность

На рис. 2,а в правой и левой части относительно траектории главного движения видны более мелкие вкрапления размером от 10 до 1 мкм и менее (рис. 2, в, з). Объекты расположены на дне царапин, оставленных другими вершинами зерен. Поэтому, можно предположить, что перенос данного объекта или объектов произошел на предыдущем проходе или на данном проходе, но в начале длины дуги контакта инструмента с об-

рабатываемым материалом. В результате столкновения с другими вершинами зерен, проходящих через рассматриваемый участок поверхности, произошло дробление объекта с последующим вдавливанием в обработанную поверхность.

Похожее состояние поверхности показано на рис. 3, а. Рентгенограммы трех анализируемых объектов в точках Spot 1, Spot 2 и Spot 3 приведены на рис. 3, б–в.

Рис. 3. Морфология обработанной поверхности с инородными объектами внедрения (а) и рентгенограммы в трех точках объектов Spot 1 (б), Spot 2 (в) и Spot 3 (з)

В точке Spot 2 (рис. 4, а) присутствуют два основных химических элемента – кремний и углерод в количестве соответственно 50,1 и 49,7 атомарных процентов, что соответствует химической формуле карбида кремния (SiC). На поверхности кристалла обнаружены так же следы ниобия. Химический состав в точках Spot 1 и Spot 3 почти одинаков и содержит четыре ос-

новные химические элементы: углерод, кремний, кислород и ниобий. Содержание атомов углерода – около 35 %, кремния – около 55 %. Если ориентироваться на химическую формулу SiC, в веществе содержится избыточный кремний. Наличие кислорода и избыточного кремния возможно в результате присутствия в анализируемом объеме некоторого количества связки.

Рис. 4. Химический состав продуктов износа, перенесенный на обработанную поверхность:

a – рис. 3, *б*; *б* – рис. 3, *а*; *в* – рис. 2, *г*

Более убедительные результаты, свидетельствующие о присутствии на обработанной поверхности кристаллов керамической связки, получены в результате рентгеноспектрального анализа объекта, представленного на рис. 2, *г* в точке Spot 1. В анализируемой точке объекта содержатся следующие химические элементы: кислород, кремний, алюминий, калий, натрий и кальций (рис. 4, *в*). Концентрация перечисленных химических элементов согласуется со средней концентрацией аналогичных химических элементов в керамической связке K10 [12].

Основные выводы

Морфология обработанной поверхности ниобиевого сплава после шлифования кругом из карбида кремния на керамической связке свидетельствует о интенсивном адгезионно-когезионном взаимодействии инструмента и обрабатываемого материала.

При шлифовании ниобиевого сплава происходит перенос продуктов износа абразивного инструмента на обработанную поверхность. Кристаллические продукты износа абразивного инструмента частично или полностью вдавлены в обработанную поверхность. Размер внедренных объектов изменяется в широком диапазоне от 70 до 1 мкм и меньше. Встречаются и более крупные объекты.

На основе рентгеноспектрального анализа установлено, что продуктами износа абразивного инструмента являются кристаллы абразивного материала (карбид кремния), керамическая связка и их сочетание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caron P. (2007). French Research and Development Activities on High-Performance Superalloys for Gas Turbine Components. *Materials Science Forum*, 546–549, 1179–1186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1179>
2. Зеликман, А. Н. *Металлургия редких металлов* :

учебник / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов. – М. : Металлургия, 1991. – 432 с.

3. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. ISBN 978-5-907104-23-5.

4. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. (2018) The Effect of the Operating Speed and Wheel Characteristics on the Surface Quality at Creep-Feed Grinding Titanium Alloys. *Solid State Phenomena* 284:369-374. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.369

5. Guerrini G., Bruzzone A.A.G., Crenna F. (2017) Single Grain Grinding: An Experimental and FEM Assessment. *Procedia CIRP*. Vol. 62. P. 287-292. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.082.

6. Liao Z., Abdelhafeez A., Li H., Yang Y., Diaz O. G., Axinte D. (2019). State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 143, 63-91. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.05.006>

7. Nosenko V.A., Fetisov F.V., Nosenko S. V., Puzyrkova, V. Ye. (2020) Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surface in Interaction with Titanium Alloy under Micro-Scratching Conditions. *MATEC Web of Conf.* Vol. 329, 2020. – 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902010>.

8. Nosenko V.A., Nosenko S.V. (2010) Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 39(4):380-385. DOI: 10.3103/S1052618810040138

9. Nosenko V.A., Fetisov F.V., Kuznetsov S.P. (2020) Transfer of Cubic Boron Nitride Grinding Wheel Wear Products to the Nickel Alloy Surface. *MATEC Web of Conf.* Vol. 329. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903050>.

10. Носенко, В. А. Испытательный комплекс на базе прецизионного профилировального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III / В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. В. Фетисов, Л. К. Морозова // *Известия ВолГТУ : научный журнал* № 5 (184) / ВолГТУ. – 2016. – С. 35–39.

11. Nosenko, V. A., Fetisov, A. V., Puzyrkova, V. Ye. (2018). Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt, and Nickel in Microscratching. *Solid State Phenomena*, 284, 363–368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.363>.

12. Гаршин, А. П. *Абразивные материалы и инструменты. Технология производства* / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общ. ред. А. П. Гаршина. – СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2008. – 1010 с.