

УДК 621.923

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ СТОЛА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Носенко С.В., Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Сердюков Н.Д.

Волжский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

Волжский, e-mail: kreleonid@yandex.ru

Статья посвящена исследованию микрорельефа поверхности сплава Ti6Al4V, полученной способом глубинного шлифования инструментом из карбида кремния зеленого. Закономерности формирования микрорельефа обработанной поверхности сплава на основе титана исследованы при различной скорости подачи стола с учетом этапа глубинного шлифования. Установлено, что морфология обработанной поверхности титанового сплава изменяется по длине шлифования. Адгезивно-когезионное взаимодействие в паре абразив – металл наиболее интенсивно на этапе ПДДК, когда мгновенная режущая способность достигает максимального значения. Обрабатываемый материал засаливает шлифовальный круг, затем с вершин зерен переносится на заготовку, размазывается по обработанной поверхности. С переходом на этап выхода интенсивность взаимодействия снижается. В конце этапа выхода морфология поверхности приближается к морфологии, формируемой при маятниковом шлифования. С увеличением скорости подачи стола в 1,5 раза (от 100 до 150 мм/мин) количество налипов металла на обработанной поверхности возрастает. Происходит перенос посторонних включений на обработанную поверхность. Результаты элементного анализа данных посторонних включений позволяют определить их как продукты износа круга (кристаллы карбида кремния), перенесенные на поверхность титанового сплава.

Ключевые слова: скорость подачи стола, глубинное шлифование, сканирующая электронная микроскопия, микрорельеф, морфология поверхности, титановый сплав, круг из карбида кремния

THE EFFECT OF FEED RATE ON SURFACE MORPHOLOGY OF TITANIUM ALLOY AT CREEP-FEED GRINDING

Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskiy L.L., Serdyukov N.D.

Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgograd State Technical University, Volzhsky,

e-mail: kreleonid@yandex.ru

The article is devoted to research of the microrelief of the surface of Ti6Al4V alloy, obtained by the method of creep-feed grinding by instrument made of green silicon carbide. The formation patterns of the microrelief of the machined titanium-based alloy surface were researched at different feed rates, taking into account the stage of creep-feed grinding. It was founded that the morphology of the machined titanium alloy changes along the grinding length. Adhesive-cohesive interaction in a pair of abrasive-metal is most intense when instantaneous cutting ability reaches its maximum value. The material being processed is fouling the grinding wheel, then adhered metal transferred from grains to the workpiece and smeared over the machined surface. The intensity of interaction decreases at the stage of exit. At the end of the stage of exit, the surface morphology approximates the morphology formed during conventional grinding. The amount of adhered metal on the machined surface increases with an 1.5-fold increase of feed rate (from 100 mm/min to 150 mm/min). Foreign inclusions are transferred to the processed surface. Chemical analysis of these foreign inclusions allow to determine them as tool wear (silicon carbide crystals) transferred to the titanium alloy surface.

Keywords: feed rate, creep-feed grinding, scanning electron microscopy, microrelief, surface morphology, titanium alloy, silicon carbide wheel

Глубинное шлифование (ГШ) является наиболее высокопроизводительным процессом абразивной обработки, необходимым для получения особо ответственных деталей [1]. Титановые сплавы, обладающие уникальным комплексом физико-механических свойств, находят широкое применение в изготовлении данных деталей, к качеству исполнения которых предъявляют высокие требования [2, 3]. Интенсивное засаливание шлифовального круга сопровождается процессом ГШ титановых сплавов [4], потому он невозможен без обеспечения ряда мер. К ним относят необходимость использования специаль-

ных СОТС [5] и абразивного инструмента [6], выбор режимов шлифования [7] и правки [8].

Абразивные частицы, внедренные в поверхность в ходе шлифования, нарушают целостность деталей и сокращают срок их эксплуатации [9]. Метод микрорентгеноспектрального анализа подтверждает влияние адгезии на структуру [10–12] и химический состав [13] обработанной поверхности сплавов на основе титана. Необходима разработка мер, обеспечивающих минимизацию негативного влияния адгезии на структуру поверхности титановых сплавов. Повышение производи-

тельности ГШ титановых сплавов также является приоритетной задачей абразивной обработки. Режим резания оказывает влияние на процесс формирования поверхности: методом электронной микроскопии доказано, что с увеличением скорости шлифовального круга растет интенсивность контактного взаимодействия в паре абразив – металл, что отражается на состоянии поверхности титанового сплава [13]. Скорость подачи стола является одним из элементов режима резания и ключевым направлением повышения производительности. Тем не менее закономерности формирования морфологии обрабатываемой поверхности титанового сплава в данных условиях до сих пор исследованы недостаточно как российским, так и мировым научным сообществом.

Цель исследования – при шлифовании с различной скоростью подачи стола методом сканирующей электронной микроскопии установить закономерности формирования морфологии сплава на основе титана.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран титановый сплав Ti6Al4V. Обработку осуществляли на обрабатывающем центре SLS 434 CNC «Станковендт». Длина обрабатываемой заготовки 40 мм.

В качестве абразивного инструмента использовали шлифовальный круг из карбида кремния зеленого 64CF80H12V производства ОАО «ВАЗ». Режимы обработки: скорость подачи стола $v_s = 100$ мм/мин, 150 мм/мин; скорость шлифования $v = 20$ м/с; глубина шлифования $t = 2$ мм; подача правящего алмазного ролика $S_p = 1,2$ мкм/об.

СОЖ марки Castrol Syntilo 81 E под давлением 12 бар и при расходе 200 л/мин подавали на гидроочистку и в зону правки шлифовального круга.

Методика проведения исследований микрорельефа поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии изложена в работе [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс ГШ плоской поверхности кругом прямого профиля характеризует большая длина дуги контакта инструмента и обрабатываемого материала, что предполагает наличие этапов процесса [14]. Номинальная мгновенная режущая способность q , приведенная к ширине обрабатываемой поверхности, характеризует производительность шлифования за единицу времени и изменяется по длине шлифова-

ния. Для этапов ГШ разработаны математические модели данного критерия управления процессом резания [14]. Процесс резания начинается на этапе врезания. Данный этап показан в отрицательной области оси абсцисс, так как формирование обработанной поверхности происходит только на этапах постоянной длины дуги контакта (ПДДК) и выхода (рис. 1). На этапе врезания q возрастает от нуля до максимального значения, соответствующего заданной глубине обработки. За этап ПДДК q не изменяется, с переходом на этап выхода q начинает снижаться.

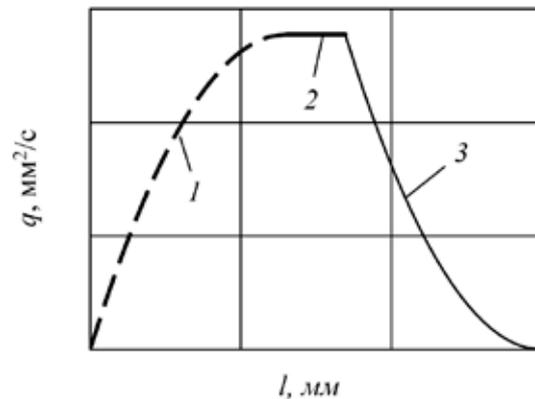


Рис. 1. Изменение номинальной приведенной мгновенной режущей способности q по длине шлифования l : 1 – этап врезания; 2 – этап ПДДК; 3 – этап выхода

Состояние поверхности, полученной при $v_s = 100$ мм/мин, свидетельствует об интенсивном адгезионно-когезионном процессе в паре абразив – металл, сопровождающем процесс шлифования. На рабочую поверхность шлифовального круга налипает обрабатываемый материал, затем он переносится на заготовку и размазывается по ней (рис. 2, а). Шлифование на этапе ПДДК и далее сопровождается процессом переноса материала с инструмента на поверхность заготовки (рис. 2, б). С переходом на этап выхода состояние рельефа постепенно начинает изменяться. На расстоянии $l = 13,6$ мм от края заготовки поверхность становится более однородной (рис. 2, в). На расстоянии $l = 30,4$ мм от края заготовки налипшего на поверхность металла существенно меньше, чем на поверхности, сформированной на этапе ПДДК (рис. 2, г). Далее морфология поверхности уже не изменяется значительно – на расстоянии $l = 37,6$ мм от края заготовки на поверхности присутствует некоторое количество налипов металла и посторонних включений (рис. 2, д).

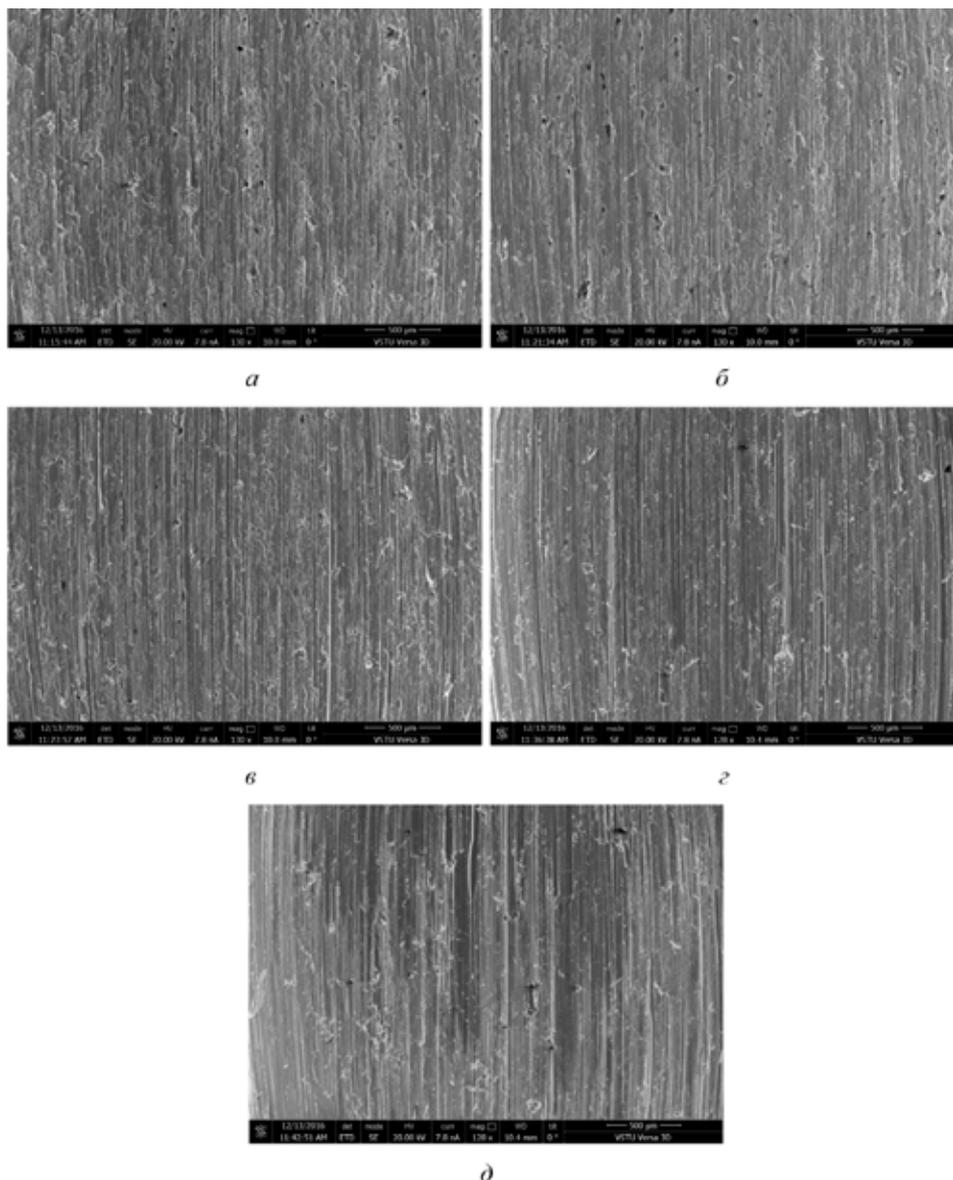


Рис. 2. Морфология обработанной поверхности, $v_s = 100$ мм/мин:
 а – $l = 1$ мм; б – $l = 9,4$ мм; в – $l = 13,6$ мм; г – $l = 30,4$ мм; д – $l = 37,6$ мм

Состояние поверхности, полученной при $v_s = 150$ мм/мин, так же как и при $v_s = 100$ мм/мин, на этапе ПДДК свидетельствует об интенсивной адгезии сплава Ti6Al4V к карбиду кремния, интенсивной когезии налипшего на круг материала к материалу заготовки (рис. 3, а). Фактическая глубина шлифования и длина дуги контакта рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой почти не снижаются за этап ПДДК [14], потому на данном этапе интенсивность адгезионно-когезионного взаимодействия остается высокой. С переходом на этап выхода количество налипов уменьшается, но дальнейшее снижение q по длине шлифования почти

не оказывает влияния на морфологию поверхности в данных условиях (рис. 3, б–г).

Сравнение электронных фотографий показало, что увеличение скорости подачи стола до $v_s = 150$ мм/мин оказывает влияние на морфологию поверхности. С увеличением v_s возрастают температура заготовки и средняя локальная температура на площадке контакта абразивного зерна и заготовки, оказывающая преобладающее влияние на интенсивность налипания частиц обрабатываемого материала на шлифовальный круг [15]. С ростом интенсивности адгезии обрабатываемого титанового сплава к карбиду кремния увеличивается интенсивность когезии – большее количе-

ство частиц материала обратно переносится на основной материал. Сканирующая электронная микроскопия подтверждает установленную закономерность: состояние микрорельефа поверхности титанового сплава зависит от скорости подачи стола; с увеличением v_s в 1,5 раза на обрабатываемой поверхности растет количество наливов металла.

Методом сканирующей электронной микроскопии дополнительно было проведено исследование поверхности, полученной при режиме маятникового шлифования: скорость подачи стола $v_s = 200$ мм/мин;

скорость шлифования $v = 20$ м/с; глубина шлифования $t = 0,1$ мм; подача правящего алмазного ролика $S_p = 0,6$ мкм/об.

Морфология поверхности, полученной при режиме маятникового шлифования, почти не изменяется по длине заготовки (рис. 4, а, б). Установлено наличие множества царапин и борозд, оставленных вершинами зерен в поверхности титанового сплава. Количество и размер наливов металла на поверхности сплава Ti6Al4V свидетельствуют о меньшей, чем при ГШ, интенсивности адгезионно-когезионного процесса в паре карбид кремния – титановый сплав.

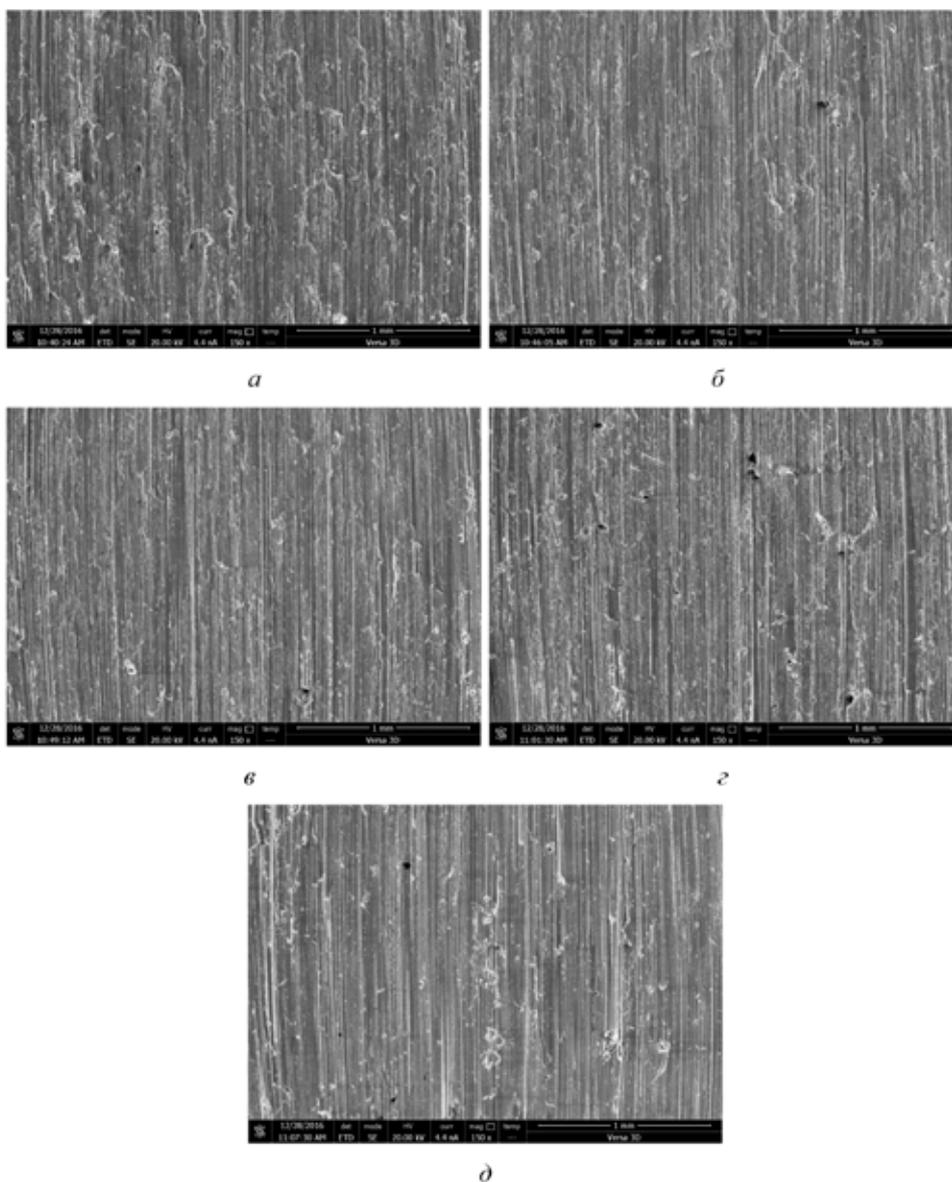


Рис. 3. Морфология обработанной поверхности, $v = 150$ мм/мин:
 а – $l = 1$ мм; б – $l = 9,4$ мм; в – $l = 13,6$ мм; г – $l = 30,4$ мм; д – $l = 37,6$ мм

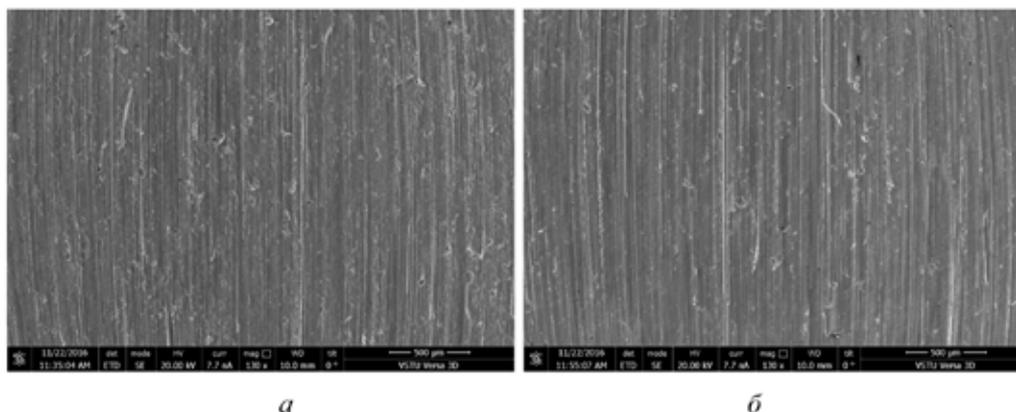


Рис. 4. Морфология обработанной поверхности, $v_s = 200$ мм/мин:
а – $l = 5,2$ мм; б – $l = 37,6$ мм

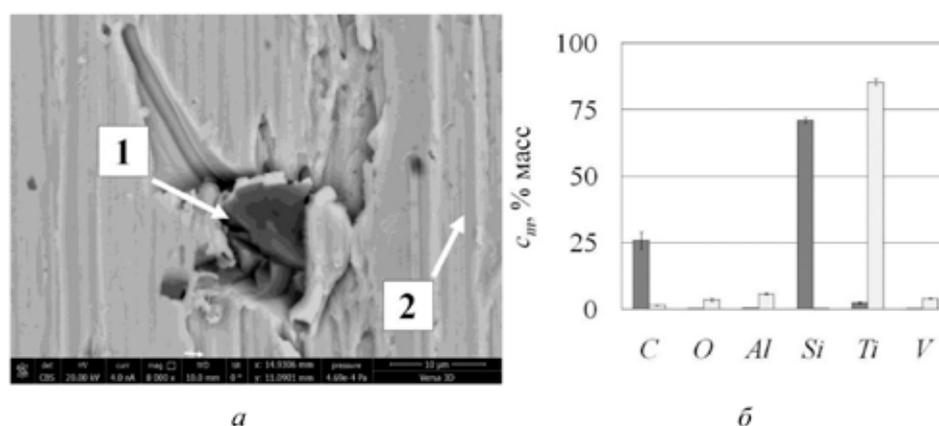


Рис. 5. Морфология обработанной поверхности при увеличении $\times 8000$ (а);
результаты точечного анализа элементного состава (б): ■ – точка 1; □ – точка 2

Сравнение электронных фотографий обработанной поверхности показало, что на расстоянии $l = 30,4$ мм от края заготовки морфология поверхности при ГШ в данных условиях приближается к морфологии поверхности, формируемой при маятниковом шлифовании (рис. 2, г; 4, а). При $v_s = 150$ мм/мин морфология поверхности приближается к морфологии, получаемой при маятниковом шлифовании, только на расстоянии $l = 37,6$ мм от края заготовки со стороны входа шлифовального круга (рис. 3, д; 4, а).

Обработанная поверхность сплава Ti6Al4V имеет посторонние включения, форма которых позволяет предварительно определить их как продукты износа шлифовального круга. При увеличении $\times 8000$ получена электронная фотография поверхности, на которой присутствует подобное постороннее включение (рис. 5, а). Метод точечного анализа позволяет определить элементный состав этого объекта. Для сравнения результатов элементный

анализ проводили в двух зонах: на постороннем включении (точка 1) и на случайно выбранном участке поверхности (точка 2).

Концентрации Si и C в точке 1 многократно превышают концентрации данных элементов в точке 2: в точке 1 концентрация кремния достигает 71 % мас., концентрация углерода составляет 26 % мас.; в точке 2 концентрации Si и C составляют 0,04 и 1,53 % мас. соответственно. Содержание Ti по точкам 1 и 2 составляет 2,44 и 85,36 % мас. соответственно (рис. 5, б).

Стандарт SAE AMS4928U-2017 регламентирует состав сплава Ti6Al4V – содержание кремния не должно превышать 0,1 % мас., содержание углерода не должно превышать 0,08 % мас. Результаты элементного анализа постороннего объекта (точка 1), как и его форма, позволяют определить данный объект как кристалл карбида кремния, внедренный в поверхность титанового сплава в ходе шлифования. Объект, отмеченный точкой 2, является пластически деформированным участком поверхности.

Заключение

Морфология поверхности сплава Ti6Al4V при ГШ изменяется по длине шлифования. В конце этапа выхода морфология поверхности приближается к морфологии, формируемой при маятниковом шлифовании. Установлено, что с увеличением скорости подачи стола в 1,5 раза растет количество налипов металла, перенесенных на обработанную поверхность в ходе адгезионно-когезионного процесса. На рассмотренных режимах ГШ происходит перенос продуктов износа абразивного инструмента (кристаллов карбида кремния) на обработанную поверхность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолГТУ в рамках научного проекта № 18.

Список литературы

1. Волков Д.И., Полуглазкова Н.В., Цветков Б.В. Развитие технологии глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 1. С. 78–87.
2. Моисеев В.Н., Грибков Ю.А., Захаров Ю.И. Высокопрочные титановые сплавы в авиационных конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2007. № 1. С. 46–51.
3. Хорев А.И. Перспективы применения титановых сплавов // Технология машиностроения. 2022. № 2. С. 5–7.
4. Xi X., Ding W., Fu Y.C., Xu J. Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti2AlNb intermetallics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. No. 9. P. 1441–1450. DOI: 10.1007/s00170-017-1005-7.
5. Носенко С.В., Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Сердюков Н.Д. Влияние СОТС и твердости круга на коэффициент шлифования и шероховатость поверхности при обработке титанового сплава // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12–3 (54). С. 156–161.
6. Старков В.К., Рябцев С.А. Эффективность применения высокоструктурного инструмента при многокоординатном профильном шлифовании // Вестник МГТУ «Станкин». 2016. № 4. С. 47–50.
7. Скрыбин В.А., Ленин А.Д., Демидов Е.А. Особенности глубинного шлифования деталей турбокомпрессоров // Технология металлов. 2019. № 9. С. 27–31.
8. Макаров В.Ф. Выбор абразивных инструментов и режимов резания для высокоэффективного шлифования заготовок. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2011. 231 с.
9. Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 6. С. 8–14.
10. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskiy L.L. The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 115–120. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.446.
11. Xi X., Yu T., Ding W., Xu J. Grinding of Ti 2 AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: Tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality. Precision Engineering. 2018. Vol. 53. P. 134–145. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.03.007.
12. Xi X., Ding W., Wu Z. Performance evaluation of creep feed grinding of γ -TiAl intermetallics with electroplated diamond wheels. Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 34. No. 1. P. 15. DOI: 10.1016/j.cja.2020.04.031.
13. Носенко С.В., Носенко В.А., Коряжкин А.А., Кременецкий Л.Л. Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 3. С. 62–72.
14. Носенко В.А., Носенко С.В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля сплава // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 92–98.
15. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с.