



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.923  
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В.

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия

**Аннотация.** Глубинное шлифование широко применяется при изготовлении ответственных деталей из жаропрочных авиационных материалов, однако сопровождается интенсивным адгезионно-когезионным процессом и значительным тепловыделением в зоне резания. Для титановых сплавов, обладающих высокой адгезионной способностью, особенно актуальной является проблема засаливания шлифовального круга и шаржирования поверхности продуктами износа абразивного инструмента, что может негативно сказываться на эксплуатационных характеристиках получаемых изделий. Известно, что эффективность процесса глубинного шлифования титановых сплавов определяется выбором параметров режима резания и характеристик шлифовального круга. Тем не менее вопрос влияния данных условий обработки на интенсивность адгезионно-когезионного процесса и состояние микрорельефа обработанной поверхности до сих пор остается малоизученным. В работе представлены результаты исследования состояния обработанной поверхности титанового сплава Ti6Al4V после глубинного шлифования. Представленные в работе результаты экспериментальных исследований получены с использованием сканирующего электронно-ионного микроскопа. Исследования проводили с учетом этапов формообразования поверхностного слоя, влияния глубины шлифования и характеристики абразивного инструмента из карбида кремния. Установлено, что состояние сплава Ti6Al4V определяется закономерностями изменения мгновенной режущей способности и изменяется по длине обработанной поверхности. На этапе постоянной длины дуги контакта наблюдается максимальная интенсивность адгезионного взаимодействия и переноса на обрабатываемую поверхность налипov металла и объектов с кристаллическим строением. На протяжении этапа выхода интенсивность этих процессов последовательно снижается. Установлено, что применение шлифовального круга с более высокой твердостью и меньшим размером зерна способствует снижению количества налипov металла при глубине шлифования 1,5–2 мм. Установлено, что увеличение глубины шлифования от 1,5 до 2 мм приводит к росту насыщения обрабатываемой поверхности посторонними объектами. Экспериментально подтвержден факт шаржирования поверхности сплава Ti6Al4V продуктами износа шлифовального круга из карбида кремния при глубинном шлифовании.

**Ключевые слова:** сплав Ti6Al4V, круг из карбида кремния, сканирующий электронно-ионный микроскоп, характеристика шлифовального круга, влияние глубины шлифования, анализ состояния поверхности

© Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В., 2026

### Для цитирования

Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В. Исследование обработанной поверхности титанового сплава при глубинном шлифовании в различных условиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# STUDY OF THE SURFACE CONDITION OF A TITANIUM ALLOY DURING CREEP-FEED GRINDING UNDER DIFFERENT PROCESSING CONDITIONS

Nosenko V.A., Kremenetsky L.L., Klentsova I.V.

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia

**Abstract.** Creep-feed grinding is widely used in the manufacture of critical components made of heat-resistant aerospace materials; however, the process is accompanied by intensive adhesion-cohesion phenomena and considerable heat generation in the grinding zone. For titanium alloys possessing high adhesive affinity, the problems of grinding wheel loading and surface contamination by abrasive tool wear products are particularly important, since these phenomena may adversely affect the service performance of manufactured components. It is well known that the efficiency of creep-feed grinding of titanium alloys is determined by the selection of cutting conditions and grinding wheel characteristics. Nevertheless, the influence of these processing parameters on the intensity of adhesion-cohesion interactions and the condition of the machined surface topography remains insufficiently investigated. This paper presents the results of an investigation into the surface condition of the Ti6Al4V titanium alloy after creep-feed grinding. The experimental results were obtained using a scanning electron and ion microscope. The investigations were carried out taking into account the stages of surface layer formation, the influence of grinding depth, and the characteristics of silicon carbide abrasive tool. It was established that the condition of the Ti6Al4V alloy is governed by the variations in the instantaneous cutting ability and changes along the length of the machined surface. During the stage of constant contact arc length, the maximum intensity of adhesive interaction and the transfer of adhered metal and crystalline particles onto the workpiece surface were observed. Throughout the exit stage, the intensity of these processes gradually decreased. The use of a grinding wheel with higher hardness and finer abrasive grain size was found to reduce the amount of adhered metal at grinding depths of 1.5-2.0 mm. An increase in grinding depth from 1.5 to 2.0 mm resulted in a higher concentration of foreign particles on the machined surface. The phenomenon of impregnation of the Ti6Al4V alloy surface by wear products originating from the silicon carbide grinding wheel during creep-feed grinding was experimentally confirmed.

**Keywords:** Ti6Al4V alloy, silicon carbide grinding wheel, scanning electron and ion microscope, grinding wheel characteristics, influence of grinding depth, surface condition analysis

## For citation

Nosenko V.A., Kremenetsky L.L., Klentsova I.V. Study of the Surface Condition of a Titanium Alloy During Creep-Feed Grinding under Different Processing Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 21, pp. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137>

## Введение

Глубинное шлифование (ГШ) находит широкое применение при получении деталей из высокопрочных сталей, авиационных алюминиевых сплавов, а также жаропрочных конструкционных материалов на основе никеля или титана [1, 2]. С использованием современных методов контроля состояния металлических материалов ведутся исследования в вопросах формирования микротвердости и негативных последствий интенсивного тепловыделения в зоне контакта инструмента и заготовки при ГШ [3, 4]. Также ученые исследуют прочие механизмы формирования характеристик поверхностного слоя материалов – как шероховатости [3, 5, 6], так и остаточных напряжений [7]. В целях интенсификации процесса ГШ разрабатываются специализированные СОЖ [5, 6], а также высокопористый, высокоструктурный абразивный инструмент [8].

Значительный исследовательский интерес вызывает явление переноса материалов в процессе шлифования, в

особенности шаржирования поверхности деталей продуктами износа шлифовального круга [9, 10]. Эта проблема приобретает особую актуальность при обработке жаропрочных сплавов на основе титана, адгезионная способность которых крайне высока [11, 12]. Шаржированные в обработанную поверхность абразивные зерна образуют зоны локального напряжения, потенциально снижающие ресурс работы ответственных изделий, используемых в авиационной технике [13]. Возможности сканирующего электронного микроскопа доказывают, что процесс ГШ титановых сплавов сопряжен с интенсивным шаржированием обрабатываемого материала микрочастицами шлифовального круга [14, 15].

Ключевой вектор развития операций ГШ – подбор оптимальных режимов резания [6, 16, 17]. Эффективность обработки методом ГШ в значительной степени определяется скоростью шлифования. Ранее было доказано, что активность адгезионно-когезионных процессов и состояние микрорельефа обработанной поверхности зависит от скорости шлифования [15]. Глубина

шлифования – не менее важный параметр режима резания, определяющий процесс ГШ [18]. Тем не менее вопрос влияния глубины шлифования на морфологию поверхности жаропрочных титановых сплавов до сих пор остается малоизученным и в отечественной, и в мировой научной школе. Установлено, что от выбора оптимальных характеристик высокопористого, высокоструктурного абразивного инструмента зависит шероховатость поверхности при ГШ [19-21]. Следовательно, стоит предположить, что параметры шлифовального круга могут оказывать влияние и на процессы адгезии, когезии при ГШ.

Цель работы: исследование состояния шлифованной поверхности сплава Ti6Al4V при ГШ с учетом глубины шлифования и характеристик абразивного инструмента.

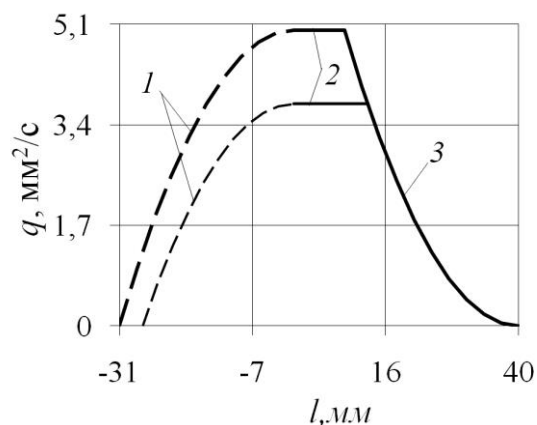
### Материалы и методы исследования

Обработку методом ГШ осуществляли на специальном профилишлифовальном станке модели SLS 434 (производство ООО «СП Станковендт»). Обрабатываемый материал – сплав Ti6Al4V. Абразивный инструмент – шлифовальные круги из карбида кремния зеленого (производство ОАО «Волжский абразивный завод») с характеристиками 64CF80H12V, 64CF100I12V (далее круги 80H, 100I).

Режимы обработки методом ГШ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обработки методом ГШ  
Table 1. CFG grinding modes

Исходные данные	Характеристика	
	Режим №1	Режим №2
Глубина шлифования $t$	1,5 мм	2 мм
Скорость шлифования $v$	20 м/с	
Скорость продольной подачи $v_s$	150 мм/мин	
Подача правящего ролика $S_p$	1,2 мкм/об	



Порядок проведения анализа состояния обработанной поверхности изложен в ранее опубликованной статье [15]. Для анализа состояния обработанной поверхности использовали оборудование: цифровой микроскоп Levenhuk DTX TV, сканирующий электронно-ионный микроскоп FEI Versa 3D DualBeam.

### Результаты исследования и их обсуждение

Методом ГШ инструментами из карбида кремния зеленого в заготовке вышлифовывали пазы. Размеры каждого паза: длина 40 мм, ширина 16 мм. Процесс обработки методом ГШ состоит из трех последовательных этапов врезания, постоянной длины дуги контакта (далее ПДДК) и выхода, продолжительность которых определяется глубиной шлифования, скоростью продольной подачи, длиной обрабатываемой поверхности и радиусом шлифовального круга [22]. Номинальная мгновенная режущая способность  $q$  на этапах ГШ, приведенная к 1 мм ширины обрабатываемой поверхности, определена по математическим моделям, изложенным в работе [22]. Ранее были установлены закономерности изменения  $q$  по длине шлифования:  $q$  постоянно растет на этапе врезания, достигает максимума к началу этапа ПДДК и стабилизируется, с началом этапа выхода начинает снижаться и достигает нулевого значения [23]. Графическое отображение изменения  $q$  по длине шлифования и времени шлифования показано на рис. 1. Этап врезания на графиках показан в отрицательной области оси абсцисс, так как формирование обработанной поверхности при ГШ начинается с переходом на этап ПДДК.

На этапе врезания  $q$  достигает максимума: при  $t = 1,5$  мм до  $q = 3,75$  мм<sup>2</sup>/с; при  $t = 2$  мм до  $q = 5$  мм<sup>2</sup>/с. Протяженность и временная продолжительность этапов ГШ показаны в табл. 2. Радиус шлифовальных кругов в проведенной серии испытаний равен около 240 мм, частота вращения шлифовальных кругов равна 13,27 об/с.

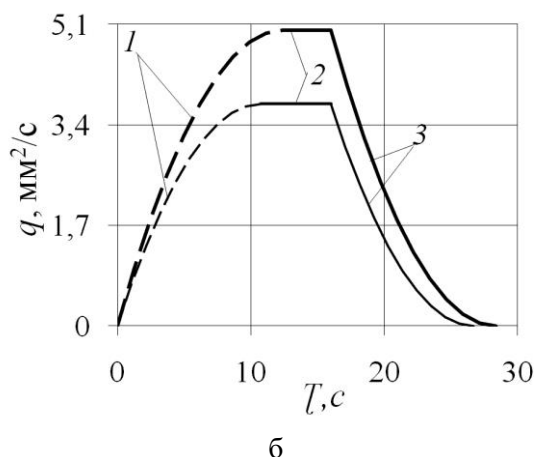


Рис. 1. Номинальная мгновенная режущая способность  $q$ : а – по длине шлифования; б – по времени шлифования; 1 – врезание; 2 – ПДДК; 3 – выход; – –  $t = 1,5$  мм, — –  $t = 2$  мм

Fig. 1. Instantaneous cutting capacity  $q$ : а is on the grinding length, б is on the grinding time; 1 is stage of incision, 2 is stage of constant length of arc, 3 is stage of exit; – –  $t = 1,5$  мм, — –  $t = 2$  мм

Таблица 2. Протяженность  $L$  и продолжительность  $\tau$  этапов ГШ

Table 2. Grinding length  $L$  and grinding time  $\tau$  at stages of CFG

Этап ГШ	$t = 1,5$ мм		$t = 2$ мм	
	$L$ , мм	$\tau$ , с	$L$ , мм	$\tau$ , с
Врезание	26,79	10,72	30,92	12,37
ПДДК	13,21	5,28	9,08	3,63
Выход	26,79	10,72	30,92	12,37

Таким образом, при  $t = 1,5$  мм длина шлифования составляет 66,79 мм и продолжительность обработки равна 26,72 с, при  $t = 2$  мм длина шлифования составляет 70,92 мм и продолжительность обработки равна 28,37 с. Данные о радиальном износе шлифовального круга  $h$ , определяемом подачей правящего ролика  $S_p$  и временной продолжительностью обработки  $\tau$ , показаны в табл. 3.

Таблица 3. Радиальный износ шлифовального круга  $h$

Этап ГШ	$h$ , мкм	
	$t = 1,5$ мм	$t = 2$ мм
Этап ПДДК + этап выхода	127,39	127,39
Этап врезания + этап ПДДК + этап выхода	212,71	225,86

Первичный контроль состояния микрорельефа обработанной поверхности титанового сплава Ti6Al4V после шлифования кругом 80Н проводили с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX TV. Установлено наличие следов работы зерен шлифовального круга (борозд и царапин), а также посторонних объектов (рис. 2). Часть объектов представляет собой налипы материала – частицы титанового сплава, ранее сцепленные с режущими кромками зерен шлифовального круга и затем перенесенные обратно на обрабатываемую поверхность. Иные объекты предположительно могут иметь кристаллическое строение. Дальнейший анализ состояния микрорельефа обработанной поверхности проводили с использованием растровой электронной микроскопии.

Электронные фотографии микрорельефа поверхности, полученной при  $t = 1,5$  мм кругом 80Н, представлены ниже. Рис. 3, а, б – фотографии микрорельефа, сформированного в начале этапа ПДДК и в его конце; рис. 3, в-д – фотографии микрорельефа, сформированного на этапе выхода.

Фотографии обработанной поверхности, полученные с помощью электронно-ионного микроскопа, подтверждают адгезионно-когезионное взаимодействие между карбидом кремния и сплавом Ti6Al4V (см. рис. 3, а, б). На этапе ПДДК обработанная поверхность в значительной степени покрыта налипшим, размазанным материалом. На обработанной поверхности присутствуют и отдельные тела: как объекты, которые предварительно возможно определить, как налипы металла, так и объекты, предположительно, имеющие кристаллическое строение. За этап ПДДК морфология поверхности не претерпевает значимых изменений – структура поверхности остается практически однородной в течение данного этапа ГШ. С переходом на этап выхода

характер адгезионно-когезионного процесса изменяется: наблюдается уменьшение числа налипов, перенесенных с вершин абразивных зерен на поверхность титанового сплава и пластически деформированных по ней; возникают более отчетливые царапины, формируемые вершинами зерен шлифовального круга, очищенными от налипшего металла в результате работы правящего ролика (см. рис. 3, в). Улучшение структуры обработанной поверхности наблюдается и в середине, и в конце этапа выхода (см. рис. 3, г, д), при этом стоит отметить, что наличие некоторого количества посторонних объектов было зафиксировано даже на расстоянии 38 мм от края заготовки.

Установлено, что на этапе ПДДК сила резания максимальна [24], как максимальна и вероятность выкрашивания зерен с рабочей поверхности круга на данном этапе [25], а этап выхода характеризуется постепенным снижением составляющих силы резания. Закономерности изменения силы резания на этапах ГШ обусловлены изменениями  $q$  [24]. К началу этапа ПДДК  $q$  достигает максимума и остается неизменной до перехода на этап выхода. Скорость радиального износа шлифовального круга на этапе ПДДК практически равна скорости радиальной подачи правящего ролика или даже превышает ее, что объясняет крайне высокую интенсивность адгезионно-когезионного процесса. На этапе выхода, по мере снижения силы резания, скорость радиального износа круга снижается – одновременно с этим возрастает число зерен, подвергаемых обновлению правящим роликом. Таким образом, следствием роста эффективности правки роликом является не только крайне важное для ГШ титановых сплавов снижение температуры в зоне резания, но и улучшение микроструктуры обработанной поверхности.

Установлено, что с увеличением глубины шлифования от 1,5 до 2 мм интенсивность адгезионно-когезионного взаимодействия на этапе ПДДК возрастает – на обрабатываемую поверхность более активно налипают металл, далее пластически деформируемый в ходе обработки (см. рис. 3, а, 4, а). Установлено, что обработке при  $t = 2$  мм характерно образование более четких, глубоких следов резания, что обусловлено увеличением объема материала, удаляемого в единицу времени – эта закономерность сохраняется на протяжении этапа ПДДК. Изменения в состоянии поверхности, наблюдаемые с переходом между этапами в условиях  $t = 1,5$  мм, также сохраняются в условиях  $t = 2$  мм. С переходом на этап выхода при  $t = 2$  мм обработанная поверхность также становится более чистой от налипов металла (см. рис. 3, в, 4, в), но имеет характерные для этапа ПДДК глубокие следы резания (см. рис. 4). Данные изменения структуры микрорельефа обусловлены как ростом  $q$  от 3,75 мм<sup>2</sup>/с при  $t = 1,5$  мм до 5 мм<sup>2</sup>/с при  $t = 2$  мм (на 33%), так и увеличением объемной режущей способности  $Q$  от 225 до 300 мм<sup>2</sup>/мин соответственно. Наличие объектов, внешний вид которых позволяет выдвинуть гипотезу об их кристаллическом строении, установлено на каждом участке исследуемой поверхности, полученной при  $t = 2$  мм кругом 80Н.

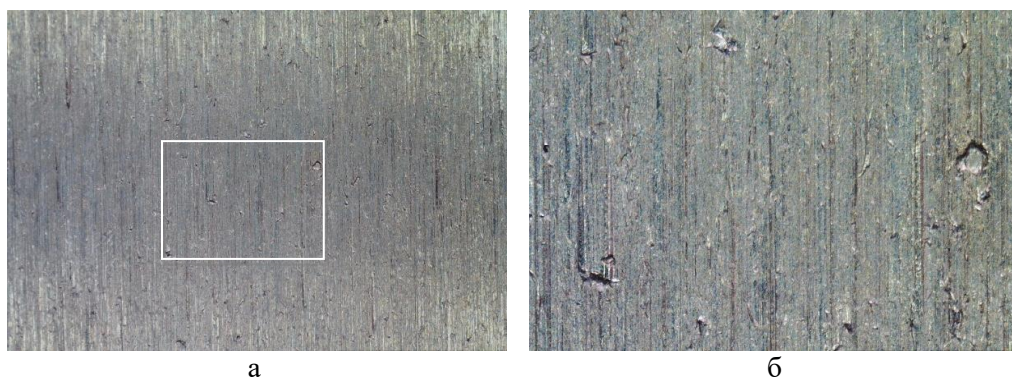


Рис. 2. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н,  $t = 1,5$  мм,  $l = 22$  мм: а –  $\times 50$ ; б –  $\times 200$   
 Fig. 2. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel,  $t = 1,5$  mm,  $l = 22$  mm: а is  $\times 50$ ; б is  $\times 200$

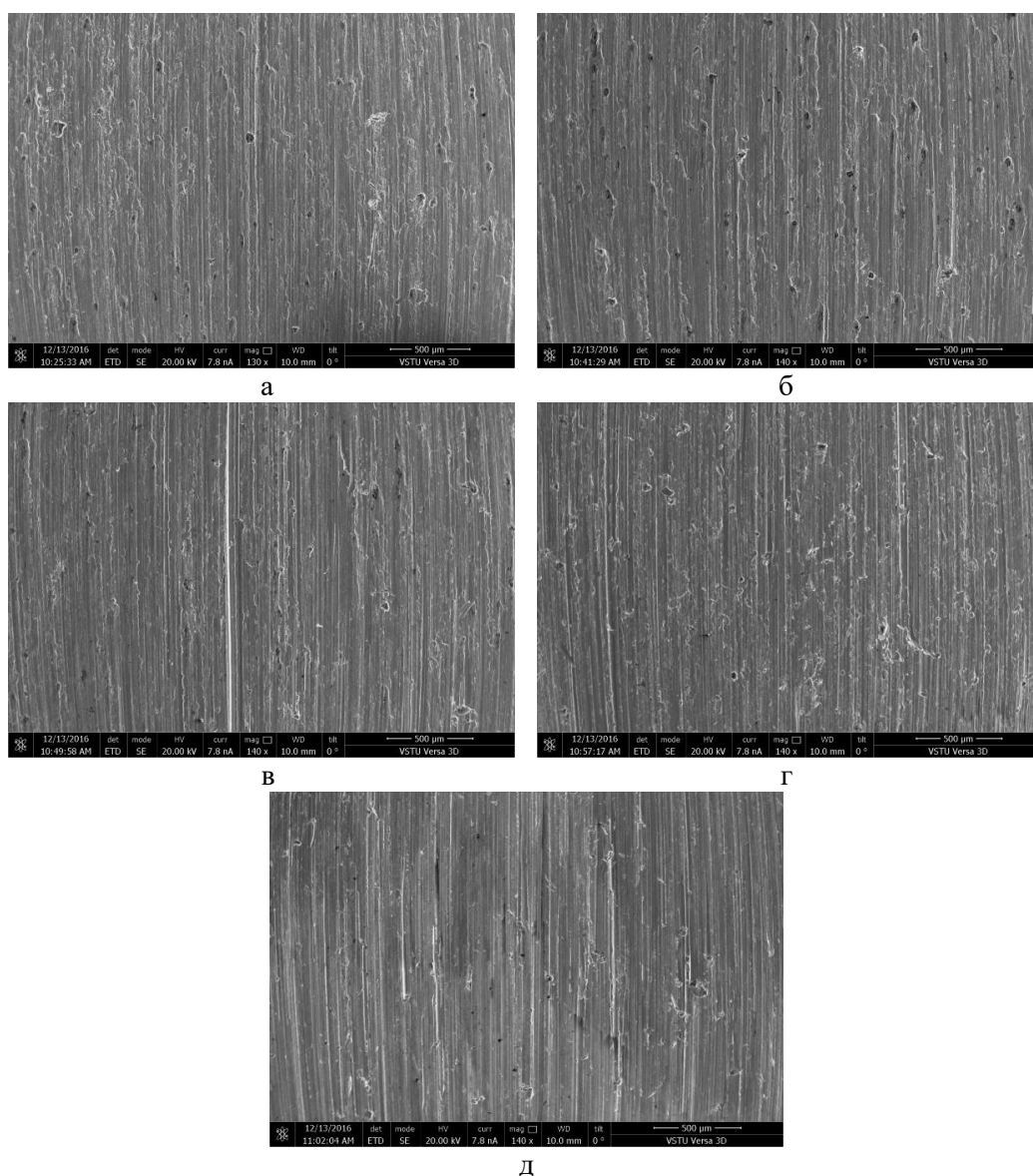


Рис. 3. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н,  $t = 1,5$  мм: а –  $l = 1$  мм; б –  $l = 9$  мм; в –  $l = 14$  мм; г –  $l = 30$  мм; д –  $l = 38$  мм

Fig. 3. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel,  $t = 1,5$  mm: а is  $l = 1$  mm; б is  $l = 9$  mm; в is  $l = 14$  mm; г is  $l = 30$  mm; д is  $l = 38$  mm

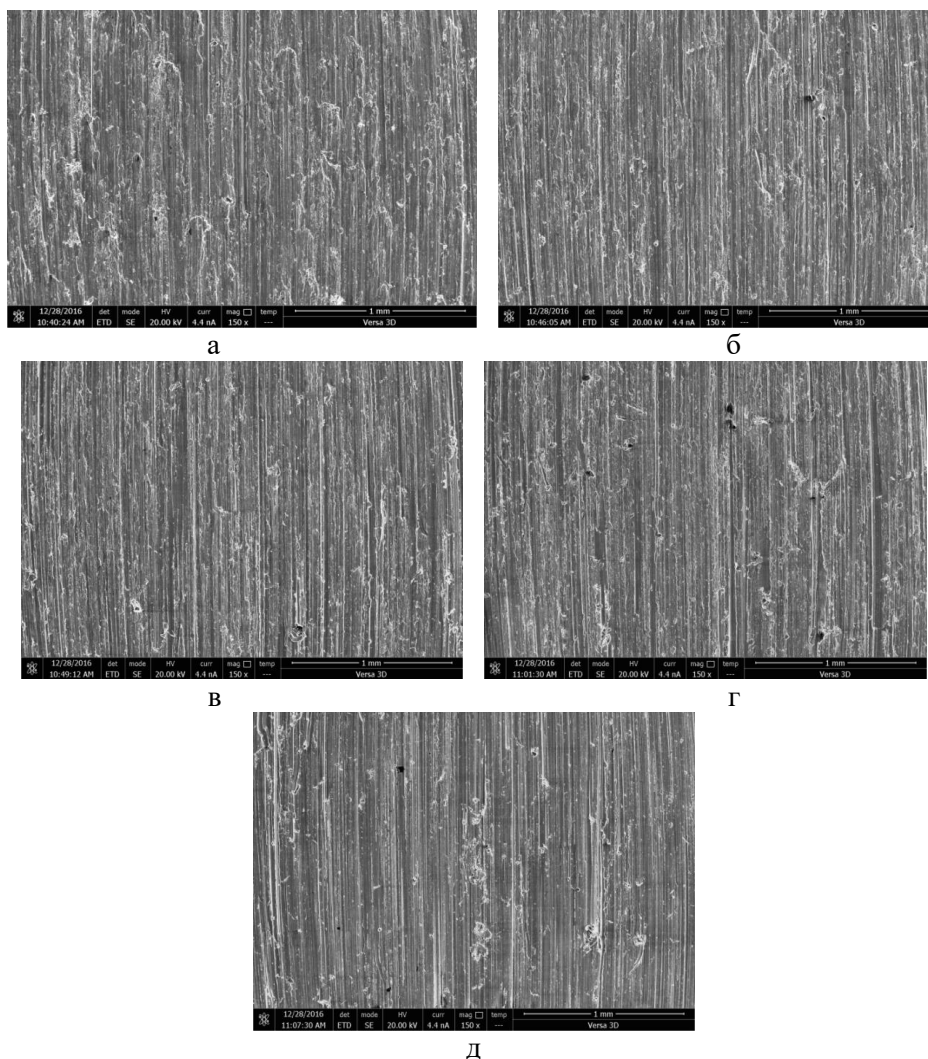


Рис. 4. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н,  $t = 2$  мм: а –  $l = 1$  мм; б –  $l = 9$  мм; в –  $l = 14$  мм; г –  $l = 30$  мм; д –  $l = 38$  мм

Fig. 4. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel,  $t = 2$  mm: а is  $l = 1$  mm; б is  $l = 9$  mm; в is  $l = 14$  mm; г is  $l = 30$  mm; д is  $l = 38$  mm

Анализ обработанной поверхности, полученной кругом 100I при  $t = 1,5$  мм, подтверждает зависимость состояния микрорельефа на этапах ГШ от закономерностей изменения  $q$  по длине шлифования. Участок поверхности заготовки, начинающийся от ее переднего края и заканчивающийся на расстоянии примерно 13 мм имеет структуру (рис. 5, а, б), в значительной степени идентичную ранее описанным в работе структурам, сформированным на этапе ПДДК. С началом снижения  $q$  от стабильно максимального значения до нуля обработанная поверхность постепенно становится более чистой от налипов металла и, вероятно, кристаллических тел – продуктов износа круга (рис. 5, в-д). Очевидно, что фактор выбора характеристик абразивного инструмента оказывает существенное влияние на состояние микрорельефа обработанной поверхности Ti6Al4V. Закономерности формирования этого микрорельефа на различных этапах ГШ при этом зависят в большей сте-

пени от изменения  $q$  по длине шлифования, нежели от твердости и зернистости инструмента.

Увеличение глубины шлифования на 33% (с 1,5 до 2 мм) при шлифовании кругом 100I влияет на микрорельеф обработанной поверхности в той же степени, как и увеличение  $t$  при работе круга 80Н. Взаимоперенос материалов между обрабатываемой заготовкой и режущим инструментом происходит на протяжении всего периода обработки, причем на участке  $\leq 9$  мм от края заготовки взаимодействие происходит наиболее активно (рис. 6, а, б). Тела предположительно кристаллического строения присутствуют на каждом участке исследованной поверхности (см. рис. 6). Количество данных объектов определяется радиальным износом шлифовального круга  $h$ , значение которого возрастает с увеличением глубины шлифования (см. табл. 3). Для поверхностей титанового сплава, формируемых методом маятникового шлифования, характерно шаржирование абразивных частиц в обрабатываемую поверхность [26]. Объемная

режущая способность  $Q$  процесса маятникового шлифования в десятки раз меньше  $Q$  процесса глубинного шлифования. Снижение количества внедренных абразивных частиц при маятниковом шлифовании способствует увеличению ударной вязкости и усталостной прочности титанового сплава [27]. Очевидно, что обеспечение качества обработки, формируемого в условиях маятникового шлифования, при ГШ практически невозможно, даже к завершению этапа выхода на поверхности Ti6Al4V установлено наличие значительного количества следов адгезии абразивного материала к обрабатываемому материалу.

Фактор характеристики шлифовального круга почти не оказывает влияния на формообразование поверхности при  $t = 1,5$  мм в начале этапа ПДДК (см. рис. 3, а, 5, а). При  $t = 2$  мм переход от круга 80Н к кругу 100I также не оказывает существенного влияния на структуру обработанной поверхности на участке  $\leq 1$  мм (см. рис. 4, а, 6, а). Тем не менее к завершению этапа ПДДК работа круга 100I обеспечивает формирование более чистой от налипов металла поверхности, нежели работа круга 80Н. Структура поверхности на участке 14–30 мм

также характеризует влияние зернистости и твердости шлифовального круга – поверхность, формируемая при работе круга 100I, в большей степени представляет собой совокупность следов микрорезания, чем совокупность налипов металла. На расстоянии 38 мм от переднего края заготовки во всех рассматриваемых в работе условиях уже не происходит массового образования налипов металла (см. рис. 3, д, 4, д, 5, д, 6, д). Это можно объяснить приближающимся к нулевому значению показателем  $q$ : на данном участке поверхности при глубине шлифования 1,5 мм  $q = 0,04$  мм<sup>2</sup>/с, при глубине шлифования 2 мм  $q = 0,05$  мм<sup>2</sup>/с (см. рис. 1). Фактор номинальной мгновенной режущей способности на данном участке поверхности уже не оказывает значимого влияния на микрорельеф; определяющим состоянием микрорельефа фактором к концу этапа выхода является характеристика инструмента. Таким образом, переход от круга 80Н к кругу 100I обеспечивает улучшение микрорельефа обработанной поверхности, о чем свидетельствуют фотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

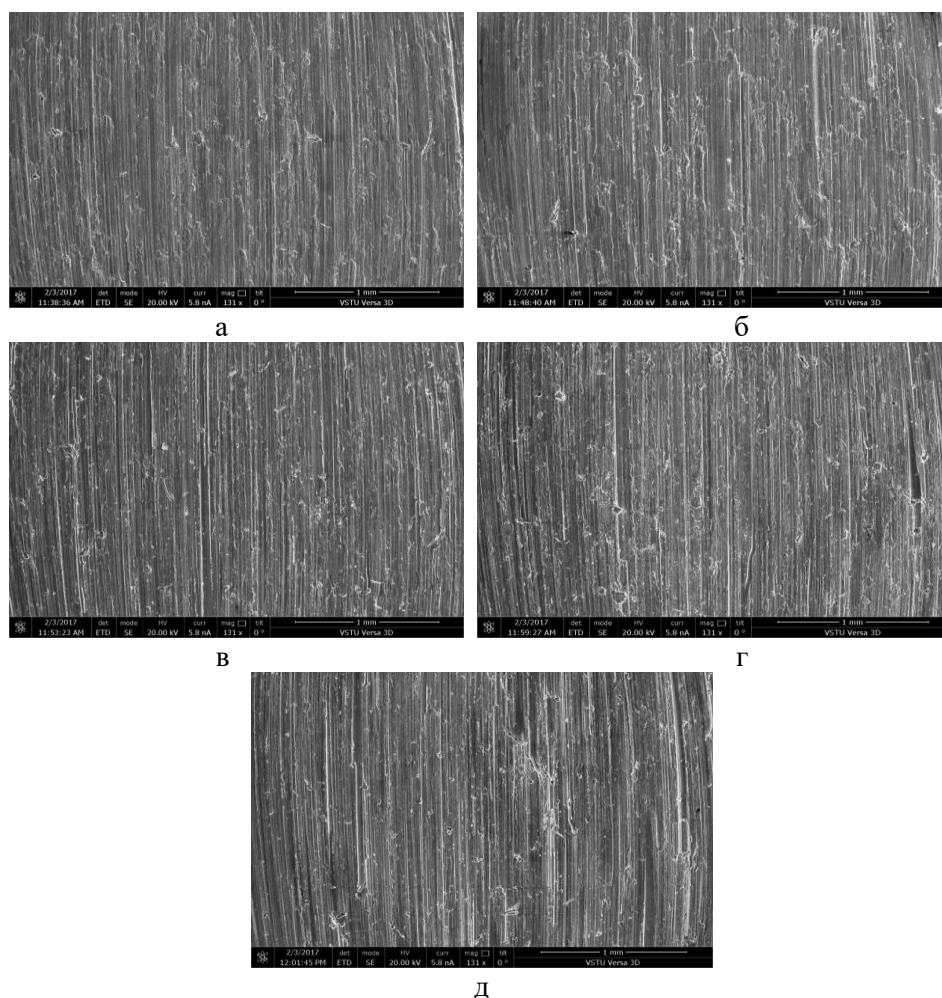


Рис. 5. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 100I,  $t = 1,5$  мм: а –  $l = 1$  мм; б –  $l = 9$  мм; в –  $l = 14$  мм; г –  $l = 30$  мм; д –  $l = 38$  мм

Fig. 5. Surface topography after CFM by 100I grinding wheel,  $t = 1,5$  mm: а is  $l = 1$  mm; б is  $l = 9$  mm; в is  $l = 14$  mm; г is  $l = 30$  mm; д is  $l = 38$  mm

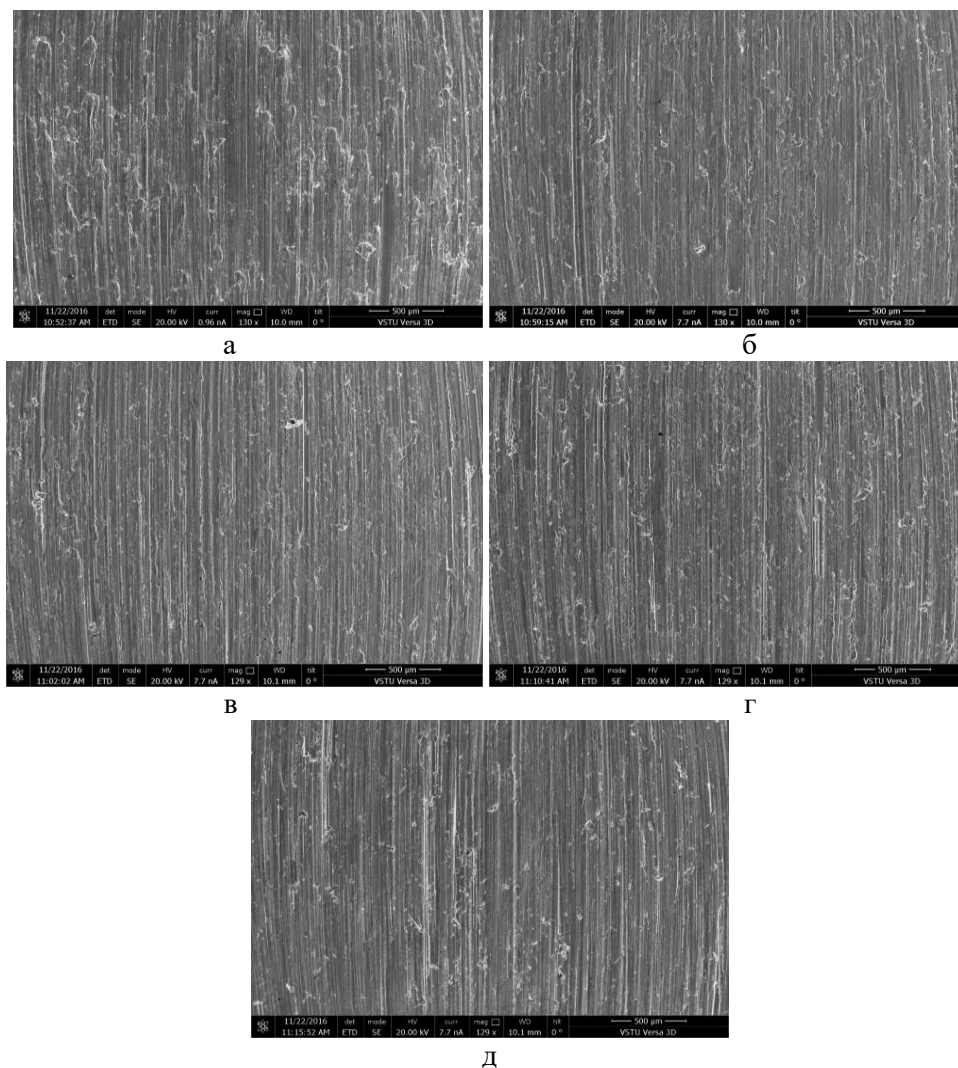


Рис. 6. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 100I,  $t = 2$  мм: а –  $l = 1$  мм; б –  $l = 9$  мм; в –  $l = 14$  мм; г –  $l = 30$  мм; д –  $l = 38$  мм

Fig. 6. Surface topography after CFG by 100I grinding wheel,  $t = 2$  mm: а is  $l = 1$  mm; б is  $l = 9$  mm; в is  $l = 14$  mm; г is  $l = 30$  mm; д is  $l = 38$  mm

Визуальная оценка тел, наличие которых было зафиксировано на каждой электронной фотографии микрорельефа, позволяет выдвинуть предположение об их природе – эти тела являются либо отдельными металлическими налипками, либо абразивными частицами. Оценку содержания элементов в объектах, присутствующих на поверхности заготовки, проводили на электронно-ионном микроскопе методом точечного элементного анализа [15]. Получена электронная фотография поверхности, микрорельеф которой содержит посторонние включения: точка 1 – предположительно налип титанового сплава; точка 2 – предположительно кристалл карбида кремния; точка 3 – область визуально чистого участка поверхности (рис. 7, а). Результаты проведения точечного элементного анализа по выбранным точкам представлены на рис. 7, б.

Объект в левой части фотографии (см. рис. 7, а) в точке 1 имеет концентрацию углерода 3,11 мас.%,

концентрацию кремния 0,16 мас.%. Концентрация титана в точке 1 равна 79,95 мас.%.

В точке 2 концентрации углерода и кремния равны 17,76 и 80,29 мас.% соответственно, тогда как концентрация титана равна 1,25 мас.%. В точке 3 концентрации углерода и кремния равны 1,88 и 0,08 мас.% соответственно, а концентрация титана составляет 83,66 мас.%.

Элементный состав в точке 2 значительно отличается от составов, выявленных в точках 1 и 3. Процентные отношения составляющих сплава Ti6Al4V утверждены стандартом SAE AMS4928U-2017, согласно положениям стандарта содержание углерода и кремния не должно превышать 0,08 и 0,1 мас.% соответственно. Сравнение данных элементного анализа в точках 1 и 3 позволяет определить объект в левой части фотографии (см. рис. 7, а) как налип титанового сплава. Объект, выделенный на электронной фотографии точкой 2, – кристалл карбида кремния.

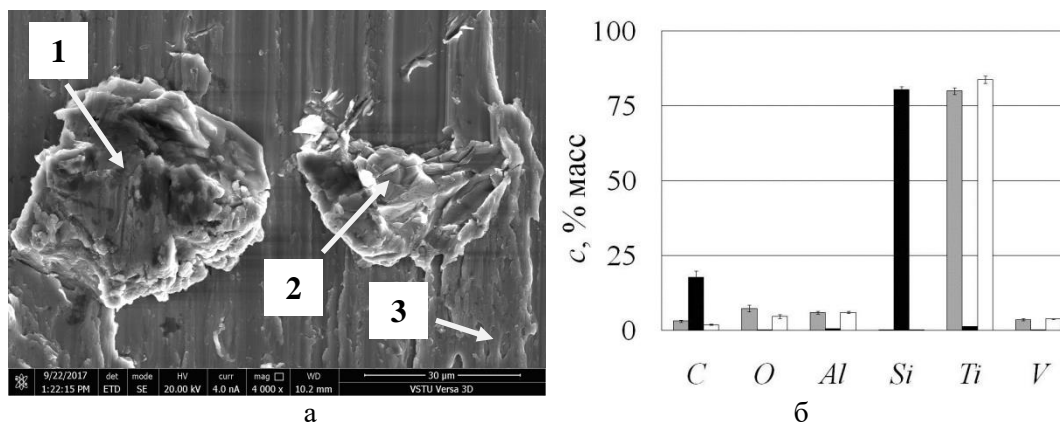


Рис. 7. Состояние микрорельефа поверхности при увеличении  $\times 4000$  (а), результаты проведения элементного анализа (б): ■ — точка 1; ■ — точка 2; □ — точка 3

Fig. 7. Surface topography at  $\times 4000$  magnification (a), results of spot elemental analysis (b): ■ is spot 1; ■ is spot 2; □ is spot 3

### Заключение

Микрорельеф обработанной поверхности сплава Ti6Al4V изменяется по длине заготовки, его состояние зависит от этапа ГШ и закономерностей изменения мгновенной режущей способности  $q$ . Установлено, что взаимоперенос материалов абразивного инструмента и заготовки с наибольшей интенсивностью происходит на этапе ПДДК. С завершением этапа ПДДК и началом этапа выхода наблюдается существенное снижение интенсивности адгезионного взаимодействия между инструментом и обрабатываемым титановым сплавом. Далее на протяжении этапа выхода интенсивность адгезионного взаимодействия также продолжает снижаться.

Переход от круга 80Н к кругу 100I обеспечивает улучшение микрорельефа обработанной поверхности (снижение количества налипov металла) в конце этапа ПДДК и на этапе выхода при глубине шлифования 1,5–2 мм. Увеличение глубины шлифования с 1,5 до 2 мм приводит к росту интенсивности насыщения обрабатываемого сплава Ti6Al4V продуктами износа шлифовальных кругов различных характеристик. С использованием электронно-ионного микроскопа доказано, что в процессе ГШ сплава Ti6Al4V кругами из карбида кремния происходит шаржирование обрабатываемой поверхности кристаллами карбида кремния.

### Список источников

1. Kishore K., Sinha M.K., Singh A. A comprehensive review on the grinding process: Advancements, applications and challenges // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022, vol. 236, is. 22, pp. 10923-10952.
2. Старков В.К. Эффективность инструмента из кубического нитрида бора при профильном глубинном шлифовании деталей из жаропрочных никелевых сплавов // *Вестник машиностроения*. 2023. № 6. С. 520-528.
3. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-

- clad stellite 21 alloys / M. Uddin, R. Santifoller, C. Hall, T. Schlaefel // *Advanced Engineering Materials*. 2022, vol. 25, is. 8, 202201332.
4. Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, vol. 123, is. 3, pp. 4153-4169.
5. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy / T. Jin, X. Ma, H. Hu, M. Qu, Z. Shang // *Journal of Mechanical Engineering*. 2022, vol. 58, is. 15, pp. 55-62.
6. Surface integrity evolution during creep feed profile grinding of  $\gamma$ -TiAl blade tenon / T. Chen, X. Wang, B. Zhao, W. Ding, J. Xu // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024, vol. 37, is. 8, pp. 496-512.
7. On the residual stresses of turbine blade root of  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding / T. Chen, Q. Miao, M. Xiong, X. Xi, B. Zhao, C. Pu, W. Ding // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 82, is. 2, pp. 800-817.
8. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021, vol. 30, is. 4, pp. 2220-2228.
9. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys / M. Qing, D. Wenfeng, G. Yulong, X. Jiahua // *Wear*. 2019, vol. 426, pp. 1624-1634.
10. Advances in sustainable grinding of different types of the titanium biomaterials for medical applications: A review / K. Ronoh, F. Mwema, S. Dabees, D. Sobola // *Biomedical Engineering Advances*. 2022, vol. 4, 100047.
11. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions / M.A. Vitor, D.S. Rosemar, M. Alisson, G. Rogério, D. Anselmo, O. Rodolfo // *Procedia Manufacturing*. 2017, vol. 10, pp. 590-600.
12. Rakurty S., Manigandan K., Bowser B. Grinding EB-PBF based additive manufactured Ti6Al4V: a surface integrity study // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023, vol. 7, November, pp. 1-9.

13. 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.
14. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 284, pp. 369-374.
15. Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Коряжкин и др. // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 3. С. 62-72.
16. Babu V., Setti D. Grindability of additively manufactured Inconel 718 // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, vol. 112, pp. 238-247.
17. Exploring new parameters to advance surface roughness prediction in grinding processes for the enhancement of automated machining / M. Hadad, S. Attarsharghi, M.D. Abyaneh, P. Narimani // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024, vol. 8, is. 1, 41.
18. Yin Y., Chen M. Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels // *Materials*. 2024, vol. 17, is. 8, 1784.
19. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
20. Barmouz M., Azarhoushang B. Grinding performance evaluation of additively manufactured vitrified bond grinding wheel: tool wear, grinding force, surface roughness, and surface topography analysis // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024, vol. 12, pp. 1385-1400.
21. Research progress of abrasive groups ordered grinding wheels / Y. Guo, B. Chen, Z. Liu, S. Sun. // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025, vol. 38, 53.
22. Носенко С.В., Носенко В.А., Зотова С.А. Этапы глубинного шлифования / ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ВолГТУ». Волжский, 2021. 166 с.
23. Носенко В.А., Носенко С.В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 4. С. 92-98.
24. Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга // *Вестник машиностроения*. 2010. № 11. С. 57-61.
25. Носенко В.А., Авилов А.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования // *Справочник. Инженерный журнал*. 2009. № 7. С. 10-19.
26. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Фетисов А.В. Перенос материала абразивного инструмента на поверхность титанового сплава в различные периоды шлифования кругом из карбида кремния // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 1. С. 68-77.
27. Интенсивность шаржирования титанового сплава продуктами износа инструмента из карбида кремния при шлифовании / В.А. Носенко, Н.Д. Сердюков, С.П. Кузнецов и др. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2025. № 1. С. 108-117.

## References

1. Kishore K., Sinha M.K., Singh A.A comprehensive review on the grinding process: Advancements, applications and challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(22):10923-10952.
2. Starkov V.K. Efficiency of cubic boron nitride tools in profile creep-feed grinding of heat-resistant nickel alloy parts. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2023;(6):520-528. (In Russ.)
3. Uddin M., Santifoller R., Hall C., Schlaefer T. Effect of combined grinding-burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad stellite 21 alloys. *Advanced Engineering Materials*. 2022;25(8):202201332.
4. Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123(3):4153-4169.
5. Jin T., Ma X., Hu H., Qu M., Shang Z. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy. *Journal of Mechanical Engineering*. 2022;58(15):55-62.
6. Chen T., Wang X., Zhao B., Ding W., Xu J. Surface integrity evolution during creep feed profile grinding of  $\gamma$ -TiAl blade tenon. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(8):496-512.
7. Chen T., Miao Q., Miong X., Xi X., Zhao B., Pu C., Ding W. On the residual stresses of turbine blade root of  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82(2):800-817.
8. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(4):2220-2228.
9. Qing M., Wenfeng D., Yulong G., Juhua X. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys. *Wear*. 2019;426:1624-1634.
10. Ronoh K., Mwema F., Dabees S., Sobola D. Advances in sustainable grinding of different types of the titanium biomaterials for medical applications: A review. *Biomedical Engineering Advances*. 2022;4:100047.
11. Vitor M.A., Rosemar D.S., Alisson M., Rogério G., Anselmo D., Rodolfo O. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions. *Procedia Manufacturing*. 2017;10:590-600.
12. Rakurty S., Manigandan K., Bowser B. Grinding EB-PBF based additive manufactured Ti6Al4V: a surface integrity study. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023;7:1-9.
13. Plankovskii S.I., Golovin I.I., Sirenko F.F. Analysis of existing methods for cleaning turbine blade surfaces in gas turbine engines. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology]. 2013;(6):8-14. (In Russ.)
14. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the sur-

- face quality at creep-feed grinding titanium alloys. *Solid State Phenomena*. 2018;284:369-374.
15. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. et al. Influence of creep-feed grinding speed on the morphology and chemical composition of titanium alloy surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical Engineering]. 2018;(3):62-72. (In Russ.)
  16. Babu V., Setti D. Grindability of additively manufactured Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:238-247.
  17. Hadad M., Attarsharghi S., Abyaneh M.D., Narimani P. Exploring new parameters to advance surface roughness prediction in grinding processes for the enhancement of automated machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(1):41.
  18. Yin Y., Chen M. Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels. *Materials*. 2024;17(8):1784.
  19. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with highly porous wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p. (In Russ.)
  20. Barmouz M., Azarhoushang B. Grinding performance evaluation of additively manufactured vitrified bond grinding wheel: tool wear, grinding force, surface roughness, and surface topography analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024;12:1385-1400.
  21. Guo Y., Chen B., Liu Z., Sun S. Research progress of abrasive groups ordered grinding wheels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025;38:53.
  22. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Zotova S.A. *Etapy glubinnogo shlifovaniya* [Stages of creep-feed grinding]. Volzhskii: Volga Polytechnic Institute (branch) VolgSTU Publishing House, 2021, 166 p. (In Russ.)
  23. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Mathematical models of tool life and cutting ability for various stages of surface creep-feed grinding of horizontal surfaces with a straight-profile wheel. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2010;(4):92-98. (In Russ.)
  24. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Up- and down-creep-feed grinding of titanium alloy with continuous wheel dressing. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2010;(11):57-61. (In Russ.)
  25. Nosenko V.A., Avilov A.V. Regularities of force variation in surface creep-feed grinding. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal]. 2009;(7):10-19. (In Russ.)
  26. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Fetisov A.V. Transfer of abrasive tool material onto the titanium alloy surface during various grinding stages using a silicon carbide wheel. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2022;(1):68-77. (In Russ.)
  27. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Kuznetsov S.P. et al. Intensity of titanium alloy impregnation by wear products of a silicon carbide tool during grinding. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2025;(1):108-117. (In Russ.)

Поступила 13.01.2026; принята к публикации 30.01.2026; опубликована 30.06.2026  
Submitted 13/01/2025; revised 30/01/2026; published 30/06/2026

**Носенко Владимир Андреевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

**Кременецкий Леонид Леонидович** – старший преподаватель, Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: kreonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

**Кленцова Ирина Витальевна** – магистрант, Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: ira.klentsova@bk.ru.

**Vladimir A. Nosenko** – DrSc (Eng.), Professor, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

**Leonid L. Kremenetsky** – Senior lecturer,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: kreonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

**Irina V. Klentsova** – Master's Student,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: ira.klentsova@bk.ru.