

# Технология и технологические машины

УДК 621.923: 669-1

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-62-72

## Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава

**С.В. Носенко<sup>1</sup>, В.А. Носенко<sup>1</sup>, А.А. Корязкин<sup>2</sup>, Л.Л. Кременецкий<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42 а<sup>2</sup> ПАО «ОДК-Сатурн», 152903, Рыбинск, Ярославская обл., Российская Федерация, Ленина пр., д. 163

## The Effect of the Creep-Feed Grinding Speed on the Morphology and Chemical Composition of the Titanium Alloy Surface

**S.V. Nosenko<sup>1</sup>, V.A. Nosenko<sup>1</sup>, A.A. Koryazhkin<sup>2</sup>, L.L. Kremenetskiy<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Volgograd State Technical University, 404121, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a<sup>2</sup> PAO United Engine Corporation Saturn, 152903, Rybinsk, Yaroslavl region, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163

e-mail: s.v.nosenko@gmail.com, nosenko@volpi.ru, aakoryazhkin@rambler.ru, kreleonid@yandex.ru



Рассмотрены особенности формирования рельефа и химического состава обработанной поверхности при различных скоростях глубинного шлифования титанового сплава высокопористым шлифовальным кругом из карбида кремния. Исследования качества обработанной поверхности проведены на электронном микроскопе Versa 3D. Предложен механизм формирования наливов на шлифованной поверхности в результате адгезионно-когезионного взаимодействия обрабатываемого материала с абразивным инструментом. Образование наливов металла происходит в основном на этапе постоянной длины дуги контакта. На этапе выхода морфология обработанной поверхности приближается к морфологии поверхности, формируемой методом маятникового шлифования. С увеличением скорости шлифования плотность наливов, переносимых на обработанную поверхность, возрастает. Определена толщина наливов на поверхности титанового сплава. Шероховатость обработанной поверхности исследована по длине заготовки. Показаны различия при определении шероховатости по длине всей поверхности, на этапах постоянной длины дуги контакта и выхода. Исследовано влияние скорости шлифования на шероховатость. Наличие кристаллов карбида кремния на обработанной поверхности подтверждено результатами локального микрорентгеноспектрального анализа. С повышением скорости шлифования средняя концентрация кремния на обработанной поверхности возрастает.

**Ключевые слова:** титановый сплав, глубинное шлифование, скорость шлифования, карбид кремния, морфология поверхности, шероховатость поверхности

**i** This article examines the features of relief formation and chemical composition of a titanium alloy surface machined using creep-feed grinding by a highly porous silicon carbide wheel at various operating speeds. The quality of the machined surface is investigated using a Versa 3D electron microscope. A mechanism of formation of the adhered metal on the ground surface that results from the adhesive-cohesive interaction between the machined material and the abrasive instrument is proposed. Metal adherence occurs mainly at the stage of the constant contact arc length. The morphology of the treated surface at the exit stage is nearing that of the surface morphology formed by pendular grinding. The density of the adhered metal being transferred onto the machined surface increases with an increase of the grinding speed. The thickness of the adhered metal on the titanium alloy surface is determined. The surface roughness is investigated at various cross-sections along the entire length of the workpiece. The differences in surface roughness along the entire surface length, the constant contact arc length and the exit stage are shown. The influence of the grinding speed on the surface roughness is investigated. The presence of silicon carbide crystals on the machined surface is confirmed by the results of a local X-ray spectral microanalysis. The average concentration of silicon becomes higher with the increase of the grinding speed.

**Keywords:** titanium alloy, creep-feed grinding, grinding speed, silicon carbide, surface morphology, surface roughness

Глубинное шлифование относится к наиболее наукоемким и высокопроизводительным процессам абразивной обработки [1]. Несмотря на достаточно широкое распространение в машиностроении, наиболее проблемным процессом считается глубинное шлифование сплавов на основе титана.

Основной причиной плохой обрабатываемости титановых сплавов является высокая адгезионная активность титана к абразивному материалу [2–4]. В результате обрабатываемый металл налипает на вершины зерен [5, 6], и продукты износа абразивного инструмента переносятся на шлифованную поверхность [7, 8]. В качестве мер обеспечения эффективности процесса рассматривают применение высокопористого абразивного инструмента [9], непрерывную правку [10–13], использование смазочно-охлаждающих технологических средств [14] и выбор направления подачи заготовки, оптимальных режимов шлифования и правки [15, 16].

При глубинном шлифовании по сравнению с маятниковым почти на порядок увеличивается длина дуги контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Соответственно, возрастает время непрерывного взаимодействия вершины зерна с металлом и усиливается влияние адгезионной активности металла на показатели процесса [11, 17].

Из титановых сплавов изготавливают особо ответственные детали, к качеству поверхности которых предъявляют высокие требования. В связи с этим повышение эффективности глубинного шлифования титановых сплавов отно-

сится к приоритетным задачам абразивной обработки. Одним из направлений повышения производительности шлифования является увеличение скорости резания.

Цель работы — исследование влияния скорости главного движения на морфологию и химический состав обработанной поверхности при глубинном шлифовании титанового сплава.

**Методика исследования.** Заготовки из титанового сплава Ti6Al4V длиной 40 мм обрабатывали на профилешлифовальном станке-автомате с ЧПУ модели SLS 434 методом врезного шлифования. Смазочно-охлаждающую жидкость Castrol Syntilo 81 E под давлением 1,2 МПа подавали с двух сторон шлифовального круга (ШК): на гидроочистку и в зону правки. Расход жидкости — 200 л/мин. В качестве абразивного инструмента использовали ШК размером 1500×16×203 мм с характеристикой 64CF80H12V производства ОАО «Волжский абразивный завод». Режимы обработки: скорость шлифования  $v$  равно 20, 25 и 30 м/с; скорость подачи стола  $v_s$  равно 100 мм/мин, направление подачи — встречное; глубина шлифования  $t = 1$  мм; подача правящего ролика  $S_p = 0,6$  мкм/об.

Морфологию и химический состав шлифованной поверхности исследовали на двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D. Химический состав определяли в микрообъеме поверхностного слоя сканированием по линии и площади. Размер площади сканирования — 1000×800 мкм, количество точек сканирования — 400, диаметр электронного зонда — око-

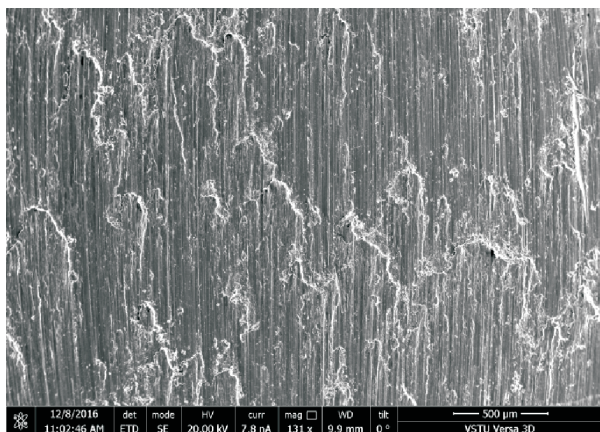
ло 50 нм. Сканирование осуществляли по длине обработанной поверхности с шагом 4,2 мм. Первое положение площадки сканирования выбирали на расстоянии  $l = 1$  мм от края заготовки.

Шероховатость поверхности измеряли профилографом-профилометром Mitutoyo Surftest SJ-410. Предел допускаемой основной систематической погрешности прибора — 3 %. Шероховатость измеряли в десяти сечениях по длине обработанной поверхности.

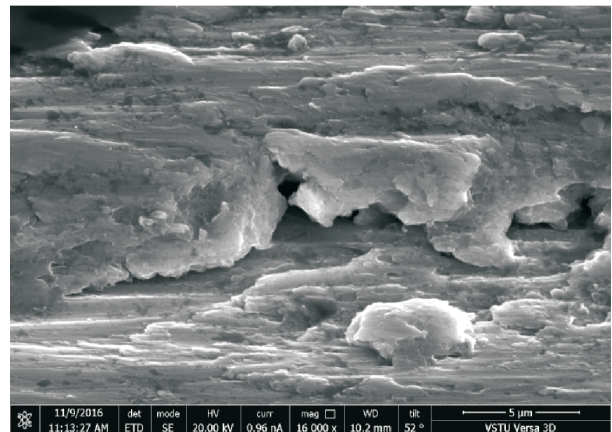
**Результаты исследований.** Состояние поверхности на расстоянии  $l = 5,2$  мм от края заготовки по ходу движения стола свидетельствует об интенсивном адгезионном взаимодействии титанового сплава с абразивным инструментом — металл размазывается по шлифованной поверхности (рис. 1, а).

Торцовая поверхность налива металла получена при повороте предметного столика микроскопа на  $90^\circ$  вокруг вертикальной оси и при его наклоне на угол  $\alpha = 52^\circ$  относительно горизонтальной плоскости (рис. 1, б). Состояние торцовой поверхности свидетельствует о многослойности налипшего металла. Толщина налива достигает 2,5...2,9 мкм. На отдельных участках верхний слой металла не имеет сплошного контакта с основной поверхностью.

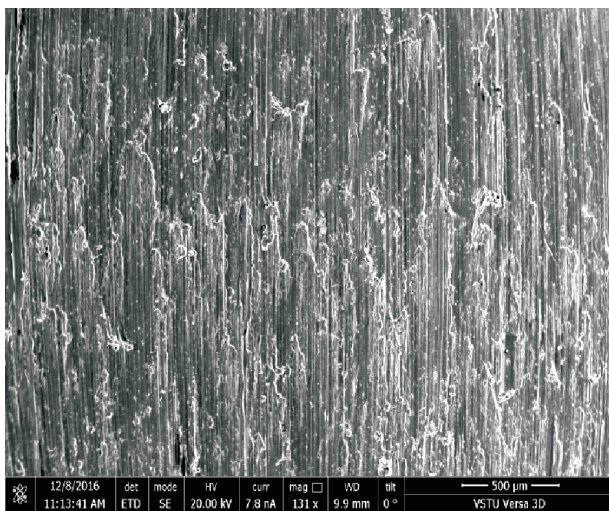
Морфология поверхности остается достаточно стабильной на длине до  $l = 22...23$  мм от края образца. Начиная с  $l \geq 23$  мм состояние рельефа обработанной поверхности изменяется: постепенно уменьшаются размеры участков поверхности с размазанным металлом и толщина налипов, стираются границы между отдельными налипами (рис. 1, в). На расстоянии



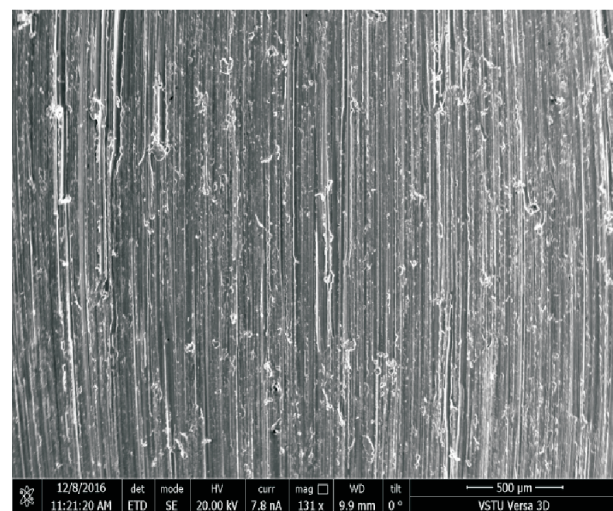
а



б



в



z

Рис. 1. Морфология обработанной поверхности при шлифовании на скорости  $v = 20$  м/с:  
а —  $l = 5,2$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ , увеличение  $\times 131$ ; б —  $\alpha = 52^\circ$ ,  $\times 16\ 000$ ; в —  $l = 26,2$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\times 131$ ; з —  $l = 34,6$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\times 131$

$l = 6 \dots 4$  мм от конца заготовки участки с размазанным металлом отсутствуют, поверхность становится более однородной (рис. 1, *з*).

В связи с высокой адгезионной активностью титанового сплава к абразивному материалу металл налипает на вершину зерна. За один оборот ШК правящий алмазный ролик в соответствии с выбранным режимом правки перемещается в радиальном направлении на 0,3 мкм. Подача обрабатываемого материала в направлении движения стола почти на два порядка больше — от 131 мкм/об при скорости шлифования  $v = 20$  м/с и до 87 мкм/об при  $v = 30$  м/с. Подача металла в радиальном направлении, в точке выхода наиболее удаленной вершины зерна из зоны обработки, с увеличением скорости шлифования в диапазоне 20...30 м/с изменяется от 19 до 13 мкм/об. Из этого следует, что глубина контакта ШК с титановым сплавом существенно больше таковой с алмазным роликом.

В зоне шлифования металл налипает не только на наиболее выступающие вершины, но и на вершины других контактирующих зерен, расположенных выше номинальной рабочей поверхности ШК.

После выхода из зоны шлифования вершины зерен взаимодействуют с алмазными зернами правящего ролика. В результате контакта с алмазными зернами металл удаляется с наиболее выступающих вершин зерен рабочей поверхности ШК. Некоторые вершины зерен разрушаются и, соответственно, очищаются от налипшего металла.

Так как глубина зоны взаимодействия вершин зерен ШК с вершинами зерен алмазного правящего инструмента меньше, чем у ШК с обрабатываемым материалом, налипший на вершины зерен металл может быть удален только с вершин, расположенных в зоне контакта с алмазным инструментом. С учетом определенной вероятности контакта зерен ШК и алмазного ролика количество вершин зерен, не взаимодействующих с алмазными зернами, будет еще больше. Поэтому некоторое количество вершин зерен после правки сохраняет на своей вершине налипший металл.

Известно, что коэффициент трения пары карбид кремния–титановый сплав меньше коэффициента трения пары металл–металл [18]. При последующем контакте с обрабатываемым материалом металл, налипший на вершину зерна, будет переноситься на обрабатываемую по-

верхность в результате когезионного взаимодействия.

При встречном направлении движения стола первоначальный контакт зерен с обрабатываемым металлом происходит именно на входе в зону шлифования со стороны уже обработанной поверхности. Если на вершине зерна имеется налипший металл, перенос его возможен в первый момент контакта с металлом, о чем свидетельствует электронная фотография (см. рис. 1, *а*).

По мере приближения к концу заготовки интенсивность переноса металла с вершин зерен на обработанную поверхность снижается. На расстоянии  $l \approx 34$  мм от начала заготовки поверхность становится еще более однородной, она представляет собой совокупность отдельных царапин, оставленных вершинами зерен (см. рис. 1, *з*), что соответствует морфологии поверхности, характерной для обычного маятникового шлифования.

С повышением скорости шлифования возрастает количество вершин, проходящих в единицу времени через рассматриваемое сечение обрабатываемой поверхности. Соответственно, увеличивается частота переноса металла на единицу площади шлифованной поверхности (рис. 2, *а*).

Так как плотность налипов повышается с ростом скорости шлифования, граница между отдельными налипами становится менее четкой. Как и при скорости  $v = 20$  м/с, приблизительно одинаковый рельеф обработанной поверхности получен на длине до  $l = 22 \dots 23$  мм.

В связи с большим количеством вершин зерен при скорости шлифования 30 м/с относительно однородный рельеф, характерный для обычного маятникового шлифования, формируется на длине обработанной поверхности  $l \approx 35$  мм (рис. 2, *б*).

Поверхность, полученная при скорости шлифования 25 м/с, по состоянию рельефа занимает промежуточное положение между поверхностями, созданными при скоростях 20 и 30 м/с.

При глубинном шлифовании, в отличие от маятникового, необходимо учитывать особенности формообразования на различных этапах процесса, протяженность которых зависит от длины обрабатываемой поверхности  $l$  и глубины шлифования. Если длина  $l$  при глубинном шлифовании плоской горизонтальной поверхности ШК прямого профиля (профиль 1 по

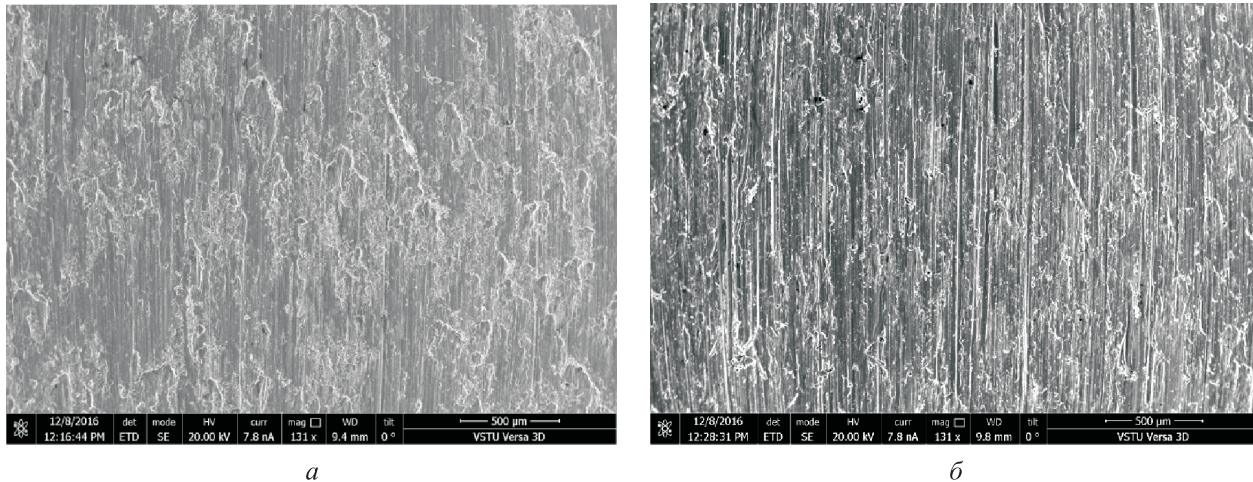


Рис. 2. Морфология поверхности при скорости шлифования  $v = 30$  м/с:  
 а —  $l = 5,2$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\times 131$ ; б —  $l = 34,6$  мм,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\times 131$

ГОСТ Р 52781–2007) больше  $b = \sqrt{Dt - t^2}$  ( $D$  — диаметр ШК;  $t$  — глубина шлифования), то по длине шлифования целесообразно выделять три этапа: врезание, постоянная длина дуги контакта (ПДДК) и выход. На этапе врезания глубина шлифования возрастает практически от нуля до  $t$ . На этапе ПДДК  $t$  не изменяется, на этапе выхода — снижается до нуля. Аналогичные этапы можно выделить и при обычном шлифовании, но протяженность этапов врезания и выхода по сравнению с этапом ПДДК незначительна. Не столь существенно изменяется и глубина шлифования. В рассматриваемых условиях глубинного шлифования протяженность этапа выхода  $l \approx 22$  мм, что составляет более половины длины обрабатываемой поверхности.

Изменение показателей процесса глубинного шлифования во многом определяется закономерностью изменения номинальной мгновенной режущей способности  $q = \partial Q / \partial \tau$ , где  $Q$  — объемная наработка,  $\tau$  — время шлифования [19, 20]. Например, касательная составляющая силы резания  $P_z$  при шлифовании титанового сплава изменяется в полном соответствии с изменением  $q$ . Взаимосвязь между параметрами определяется прямой пропорциональной зависимостью [3, 17].

Изменение  $q$  неизбежно отражается и на качестве шлифованной поверхности [11]. Удаление материала начинается на этапе врезания, где значение  $q$ , приведенное к единице ширины обрабатываемой поверхности, изменяется от нуля до максимального значения  $q = 1,667$  мм<sup>2</sup>/с, определяемого принятыми режимами шлифования. Формирование обрабо-

танной поверхности начинается на этапе ПДДК, поэтому протяженность этапа врезания показана в отрицательной области оси абсцисс (рис. 3, а). При  $l \approx 22,3$  мм начинается этап выхода, на котором фактическая глубина шлифования и длина дуги контакта рабочей поверхности абразивного инструмента с обрабатываемым материалом снижаются. С уменьшением фактической глубины шлифования снижаются фактическая глубина резания зерен и длина дуги их взаимодействия с титановым сплавом. В связи с этим уменьшается количество металла, налипающего на вершины зерен ШК и переносимого на обрабатываемую поверхность (см. рис. 1, в, г и 2, б).

Такая закономерность изменения показателей процесса наблюдается на всем протяжении этапа выхода. Например, на расстоянии  $l \approx 22$  мм от конца заготовки номинальная глубина шлифования сокращается до 10 мкм. В результате интенсивность налипания металла на вершины зерен ШК и, соответственно, его перенос на обработанную поверхность снижаются, о чем убедительно свидетельствует состояние шлифованной поверхности (см. рис. 1, г).

Изменение условий взаимодействия отражается на шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  (рис. 3, б). При шлифовании на скоростях 25 и 30 м/с на этапе ПДДК  $Ra$  практически не изменяется, что подтверждается доверительными интервалами, приведенными на рисунке. При скорости 20 м/с можно сделать вывод о некоторой тенденции роста  $Ra$  в начале этапа. С переходом к этапу выхода  $Ra$  снижается на всех скоростях шлифования. Подобная

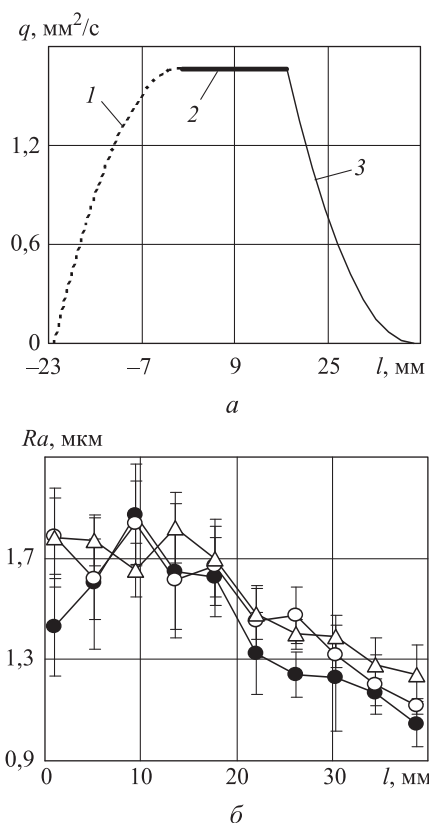


Рис. 3. Изменение номинальной приведенной мгновенной режущей способности  $q$  (а) и шероховатости  $Ra$  (б) по длине обработанной поверхности  $l$ :  
 1 — этап врезания; 2 — этап ПДДК; 3 — этап выхода;  
 ● —  $v = 20$  м/с; ○ —  $v = 25$  м/с; △ —  $v = 30$  м/с

закономерность наблюдается и при шлифовании в других условиях [21].

С использованием полученных экспериментальных данных рассчитаны средние значения  $Ra$  по всей длине обработанной поверхности на этапах ПДДК и выхода (рис. 4). Значимость влияния фактора скорости шлифования на параметр  $Ra$  оценивали методом дисперсионного анализа. Установлено, что шероховатость обработанной поверхности, сформированная на этапе ПДДК, в среднем на 30...37 % больше, чем на этапе выхода. Скорость шлифования не оказывает значимого влияния на средние значения  $Ra$ , рассчитанные по всем имеющимся значениям и только для этапа ПДДК, что подтверждается границами доверительных интервалов.

На этапе выхода при сравнении средних получены близкие значения расчетного и табличного значений критериев Фишера, исходя из этого выполнено попарное сравнение средних. Выявлено, что изменение скорости шлифования в диапазонах 20...25 и 25...30 м/с не оказывает значимого влияния на параметр  $Ra$ . С по-

вышением скорости шлифования в 1,5 раза (с 20 до 30 м/с) шероховатость на этапе выхода, несмотря на увеличение количества зерен, проходящих через рассматриваемое сечение обработанной поверхности, возрастает в среднем на 13 %. Очевидно, что в данном случае определяющим фактором является интенсивность адгезионного взаимодействия пары абразивный материал–титановый сплав, увеличивающаяся с ростом скорости шлифования.

Результатом адгезионного взаимодействия пары абразивный материал–титановый сплав является не только перенос металла на вершину зерна ШК и затем с нее на обработанную поверхность, но и перенос продуктов износа ШК на эту поверхность, — в том числе кристаллов карбида кремния [8, 11].

На шлифованной поверхности выявлены отдельные участки, в которых предположительно присутствуют кристаллы карбида кремния. В качестве примера приведена электронная фотография поверхности, полученной при скорости шлифования 20 м/с (рис. 5, а).

Химический состав поверхности определяли методом точечного анализа и сканированием по линии. В рассматриваемом примере выполнен точечный микроанализ: диаметр электронного зонда около 50 нм, ускоряющее напряжение 20 кВ. Выбраны два участка поверхности: на предполагаемом кристалле карбида кремния (Spot 1) и на относительно чистом участке шлифованной поверхности (Spot 2).

Спектры рентгеновского излучения, полученного в микрообъемах Spot 1 и Spot 2, существенно различаются (рис. 6). Рентгеновские

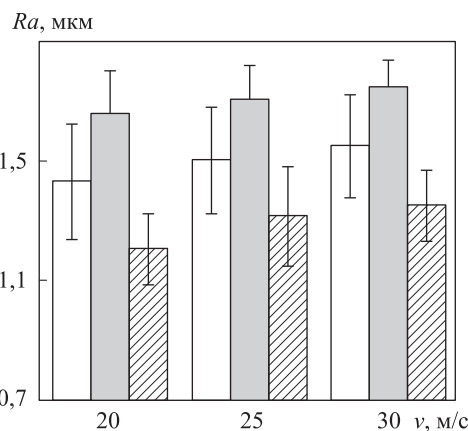


Рис. 4. Средние значения параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности для разных скоростей шлифования  $v$  и этапов процесса:  
 □ — на всей длине заготовки; ■ — этап ПДДК; ▨ — этап выхода

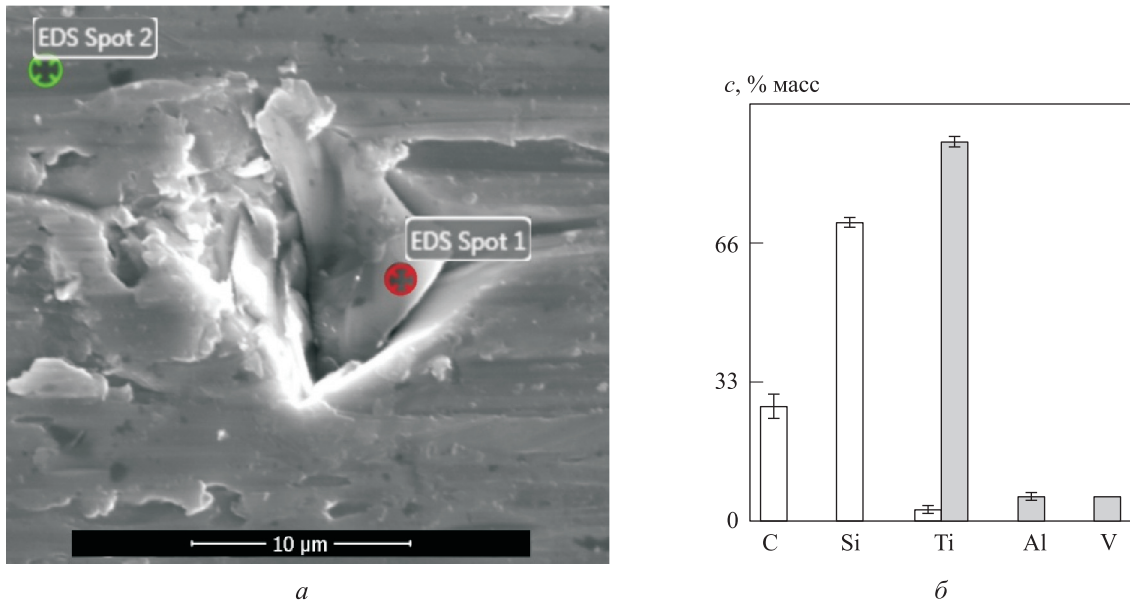


Рис. 5. Электронная фотография поверхности (а) и значения концентрации  $C$  химических элементов в микрообъемах разных участков (б):  
□ — Spot 1; ■ — Spot 2

спектры состоят из узких вертикальных линий (характеристическое рентгеновское излучение) и непрерывного фона, выделенного плавной горизонтальной линией. В микрообъеме Spot 1 по интенсивности излучения явно выделяется линия характеристического рентгеновского излучения кремния  $K$ , в микрообъеме Spot 2 — линия  $Ti\ K\alpha$ ; в меньшей степени линии, характеризующие присутствие алюминия и ванадия, где  $K\alpha$ ,  $K\beta$  и  $L$  — это энергетические уровни.

Основными легирующими элементами в титановом сплаве  $Ti6Al4V$  являются алюминий и

ванадий в количестве соответственно 5,5...6,75 и 3,5...4,5 % масс (стандарт США SAE AMS4928U-2014). Микрорентгеноспектральный анализ микрообъема на относительно чистом участке шлифованной поверхности (Spot 2) показал присутствие алюминия и ванадия в количестве около 5 % масс (см. рис. 5, б), следы железа, кислорода, кремния и углерода. На поверхности предполагаемого кристалла карбида кремния основными химическими элементами являются кремний (~71 % масс) и углерод (~23 % масс). В пересчете на атомные проценты их концен-

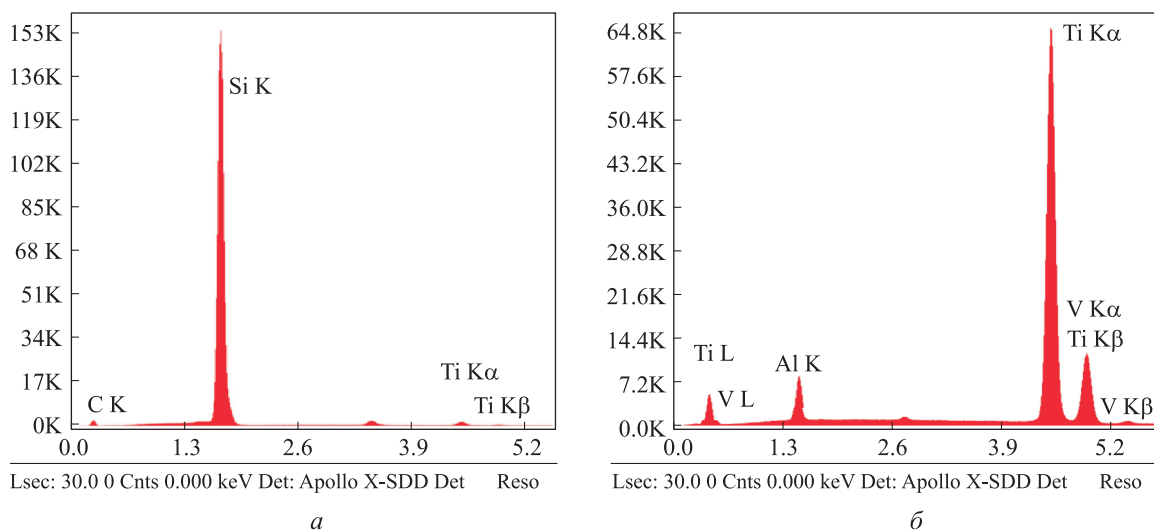


Рис. 6. Спектр характеристического рентгеновского излучения в микрообъемах Spot 1 (а) и Spot 2 (б) (ось абсцисс — энергия, кэВ, ось ординат — интенсивность)

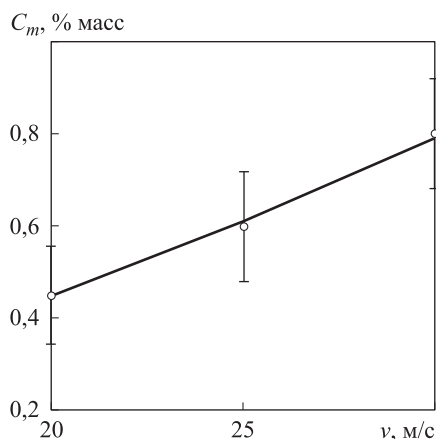


Рис. 7. Зависимость средней концентрации кремния  $C_m$  от скорости шлифования  $v$

трации почти уравниваются, что соответствует молекуле карбида кремния SiC. Концентрация титана достигает 2,3 % масс.

Для оценки общего количества переносимого абразивного материала осуществляли сканирование обработанной поверхности по площади (рис. 7). Установлено, что с увеличением скорости шлифования в 1,5 раза (с 20 до 30 м/с) концентрация кремния на поверхности титанового сплава возрастает почти в 1,8 раза — с 0,45 до 0,80 % масс. Повышение скорости шлифования с 20 до 25 м/с не оказывает значимого влияния на среднюю концентрацию кремния  $C_m$ , что подтверждается вертикальными линиями доверительного интервала (см. рис. 7).

Одной из причин роста концентрации кремния является увеличение интенсивности контактного взаимодействия пары карбид кремния–титановый сплав с повышением скорости шлифования.

Необходимо отметить еще один фактор, оказывающий влияние на перенос продуктов износа ШК на обработанную поверхность, — механическое разрушение рабочей поверхности ШК, в частности кристаллов карбида кремния в контакте с алмазными зернами правящего ролика. В результате контакта с алмазным зерном на вершине кристалла возможно образование различных дефектов, в том числе трещин. При взаимодействии такого зерна с обрабатываемой поверхностью кристалл разрушается, и его осколки переносятся на нее.

## Выводы

1. Состояние рельефа и микрорельефа шлифованной поверхности титанового сплава сви-

детельствует об интенсивном адгезионно-когезионном взаимодействии обрабатываемого материала с абразивным инструментом. В результате адгезионного взаимодействия с абразивным материалом титановый сплав налипает на вершины зерен. На следующем обороте ШК налипший металл вследствие когезионного взаимодействия переносится на обрабатываемую поверхность.

2. Толщина наливов металла достигает 2,5...2,9 мкм; на отдельных участках поверхности налипший металл не имеет сплошного контакта с основной поверхностью.

3. Морфология поверхности изменяется по длине шлифования. Образование наливов металла происходит в основном на этапе ПДДК. На этапе выхода с уменьшением длины дуги контакта и фактической глубины шлифования количество наливов снижается. В конце этапа выхода морфология обработанной поверхности приближается к морфологии поверхности, формируемой методом маятникового шлифования.

4. С увеличением скорости шлифования от 20 до 30 м/с возрастают количество зерен, проходящих через зону шлифования, и плотность наливов, переносимых на обработанную поверхность.

5. Среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности на этапе ПДДК в среднем на 30...37 % больше, чем на этапе выхода.

6. Скорость шлифования не оказывает значимого влияния на среднее значение параметра шероховатости  $Ra$ , оцениваемого по длине обработанной поверхности. На этапе выхода наблюдается тенденция повышения  $Ra$  с увеличением скорости шлифования.

7. На рассмотренных режимах глубинного шлифования происходит перенос продуктов износа абразивного инструмента (в частности, кристаллов карбида кремния) на обработанную поверхность.

8. При повышении скорости шлифования с 20 до 30 м/с средняя концентрация кремния на поверхности титанового сплава возрастает почти в 1,8 раза, что свидетельствует об увеличении интенсивности переноса кристаллов карбида кремния.

9. Для обработки титанового сплава Ti6Al4V в рассмотренных условиях рекомендуется скорость шлифования 20 м/с, обеспечивающая наименьшее значение средней концентрации кремния по длине заготовки.



## Литература

- [1] Полетаев В.А., Волков Д.И. *Глубинное шлифование лопаток турбин*. Москва, Машиностроение, 2006. 272 с.
- [2] Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2001, № 5, с. 85–91.
- [3] Носенко В.А., Авилов А.В., Носенко С.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования. *Справочник. Инженерный журнал*, 2009, № 7, с. 10–26.
- [4] Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC<sub>4</sub>) and nickel (K<sub>417</sub>) alloys. *Wear*, 2003, vol. 255, no. 7, pp. 1421–1426.
- [5] Носенко В.А., Авилов А.В., Носенко С.В., Бахмат В.И. Исследование переноса титана, циркония и молибдена на карбид кремния при микроцарапании. *Металлообработка*, 2017, № 1, с. 35–39.
- [6] Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности карбида кремния после микроцарапания титана. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2015, т. 15, № 1, с. 69–79.
- [7] Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В., Харламов В.О. Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов. *Научные технологии в машиностроении*, 2017, № 10, с. 9–18.
- [8] Носенко С.В., Носенко В.А., Крутикова А.А., Кременецкий Л.Л. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС. *СТИН*, 2015, № 1, с. 26–29.
- [9] Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. Москва, Машиностроение, 2007. 688 с.
- [10] Носенко В.А., Носенко С.В. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга. *Вестник машиностроения*, 2013, № 4, с. 74–79.
- [11] Носенко С.В., Носенко В.А., Кременецкий Л.Л. Влияние правки абразивного инструмента на состояние рельефа обработанной поверхности титанового сплава при встречном глубинном шлифовании. *Вестник машиностроения*, 2014, № 7, с. 64–68.
- [12] Старков В.К. Теоретические и технико-экономические предпосылки профильного глубинного шлифования с непрерывной правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2010, № 12, с. 39–43.
- [13] Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2010, № 11, с. 57–61.
- [14] Носенко В.А., Ларионов Н.Ф., Егоров Н.И., Волков М.П. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования. *Вестник машиностроения*, 1989, № 5, с. 17–21.
- [15] Носенко В.А., Жуков В.К., Васильев А.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2008, № 5, с. 44–50.
- [16] Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с периодической правкой круга. *Вестник машиностроения*, 2010, № 10, с. 66–71.
- [17] Носенко В.А., Носенко С.В. *Технология шлифования*. Волгоград, ИУНЛ ВолГГТУ, 2011. 425 с.
- [18] Худобин Л.В., Унянин А.Н. *Минимизация засаливания шлифовальных кругов*. Ульяновск, Ульяновский гос. техн. ун-т, 2007. 299 с.
- [19] Носенко В.А., Жуков В.К., Зотова С.А., Носенко С.В. Специфика удаления материала на различных этапах плоского глубинного шлифования. *СТИН*, 2008, № 3, с. 23–28.
- [20] 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.
- [21] Носенко С.В., Носенко В.А., Байрамов А.А. Влияние правки абразивного инструмента и направления движения стола на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании заготовок из титановых сплавов. *СТИН*, 2015, № 1, с. 21–26.

## References

- [1] Poletaev V.A., Volkov D.I. *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin* [Deep grinding of turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006. 272 p.
- [2] Nosenko V.A. Kriterii intensivnosti vzaimodeistviia obrabatyvaemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii [The criterion of intensity of interaction treated, and abrasive materials in the grinding]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2001, no. 5, pp. 85–91.
- [3] Nosenko V.A., Avilov A.V., Nosenko S.V. Zakonomernosti izmeneniia sily ploskogo glubinnogo shlifovaniia [Laws of change of force of flat deep grinding]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2009, no. 7, pp. 10–26.
- [4] Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC<sub>4</sub>) and nickel (K<sub>417</sub>) alloys. *Wear*, 2003, vol. 255, no. 7, pp. 1421–1426.
- [5] Nosenko V.A., Avilov A.V., Nosenko S.V., Bakhmat V.I. Issledovanie perenosa titana, tsirkoniia i molibdena na karbid kremniia pri mikrotsarapanii [The research of transfer titanium, zirconium, and molybdenum on the silicon carbide after microcutting]. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2017, no. 1, pp. 35–39.
- [6] Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Rentgenospektral'nyi mikroanaliz poverkhnosti karbida kremniia posle mikrotsarapaniia titana [X-ray spectral microanalysis of the surface of carbide of silicon after the microscratching of titanium]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of South Ural State University. Series «Mechanical Engineering Industry»]. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 69–79.
- [7] Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V., Kharlamov V.O. Intensivnost' kontaktного vzaimodeistviia i perenos materialov pri shlifovanii i mikrotsarapanii tugoplavkikh metallov [Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2017, no. 10, pp. 9–18.
- [8] Nosenko S.V., Nosenko V.A., Krutikova A.A., Kremenetskii L.L. Issledovanie khimicheskogo sostava poverkhnostnogo sloia titanovogo splava pri shlifovanii ego krugom iz karbida kremniia bez ispol'zovaniia SOTS [The study of the chemical composition of the surface layer of titanium alloy with grinding his circle of silicon carbide without the use of SOTS]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 1, pp. 26–29.
- [9] Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 688 p.
- [10] Nosenko V.A., Nosenko S.V. Ploskoe glubinnoe shlifovanie pazov v zagotovkakh iz titanovogo splava s nepreryvnoi pravkoi shlifoval'nogo kruga [Flat deep groove grinding in titanium alloy block with continuous dressing grinding wheel]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2013, no. 4, pp. 74–79.
- [11] Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. Vliianie pravki abrazivnogo instrumenta na sostoianie rel'efa obrabotannoi poverkhnosti titanovogo splava pri vstrechnom glubinnom shlifovanii [Influence of abrasive tool dressing on state of relief of machined surface of titanium alloy at counter deep grinding]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 7, pp. 64–68.
- [12] Starkov V.K. Teoreticheskie i tekhniko-ekonomicheskie predposylki profil'nogo glubinnogo shlifovaniia s nepreryvnoi pravkoi kruga [Theoretical and techno-economic preconditions of the profile depth grinding with continuous dressing of diamond wheel]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2010, no. 12, pp. 39–43.
- [13] Nosenko V.A., Nosenko S.V. Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 11, pp. 1124–1128.
- [14] Nosenko V.A., Larionov N.F., Egorov N.I., Volkov M.P. Vybór kharakteristiki abrazivnogo instrumenta i SOZh dlia glubinnogo shlifovaniia [The choice of the characteristics of the abrasive tool and the coolant chambers]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1989, no. 5, pp. 17–21.
- [15] Nosenko V.A., Zhukov V.K., Vasil'ev A.A., Nosenko S.V. Poputnoe i vstrechnoe glubinnoe shlifovanie poverkhnosti nepolnogo tsikla s periodicheskoi pravkoi kruga [A down and reversed deep grinding of non-full surface with periodical wheel's sharpening]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2008, no. 5, pp. 44–50.

- [16] Nosenko V.A., Nosenko S.V. Poputnoe i vstrechnoe glubinnoe shlifovanie titanovogo splava s periodicheskoi pravkoi kruga [Incidental and oncoming deep grinding of titanium alloy with periodical wheel dressing]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2010, no. 10, pp. 66–71.
- [17] Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiia shlifovaniia* [Grinding technology]. Volgograd, IUNL VolgSTU publ., 2011. 425 p.
- [18] Khudobin L.V., Unianin A.N. *Minimizatsiia zasalivaniia shlifoval'nykh krugov* [To minimize the clogging of grinding wheels]. Ul'ianovsk, Ul'ianovskii gos. tekhn. un-t publ., 2007. 299 p.
- [19] Nosenko V.A., Zhukov V.K., Zotova S.A., Nosenko S.V. Spetsifika udaleniia materiala na razlichnykh etapakh ploskogo glubinnogo shlifovaniia [Specificity of material removal at various stages flat deep grinding]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2008, no. 3, pp. 23–28.
- [20] Nosenko V.A., Nosenko S.V. Matematicheskie modeli narabotki i rezhushchei sposobnosti dlia razlichnykh etapov ploskogo glubinnogo shlifovaniia gorizontal'nykh poverkhnosti krugom priamogo profilia [Mathematical Models of Operating Time and Cutting Capacity for Various Stages of Flat Creep Feed Grinding of Horizontal Surface by Circle of Direct Profile]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2010, no. 4, pp. 92–98.
- [21] Nosenko S.V., Nosenko V.A., Bairamov A.A. Vliianie pravki abrazivnogo instrumenta i napravleniia dvizheniia stola na sherokhovatost' obrabotannoi poverkhnosti pri glubinnom shlifovanii zagotovok iz titanovykh splavov [The effect of dressing the abrasive tool and the direction of movement of the table to the machined surface roughness during deep grinding of workpieces made of titanium alloys]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 1, pp. 21–26.

Статья поступила в редакцию 12.12.2017

## Информация об авторах

**НОСЕНКО Сергей Владимирович** (Волжский) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: s.v.nosenko@gmail.com).

**НОСЕНКО Владимир Андреевич** (Волжский) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: nosenko@volpi.ru).

**КОРЯЖКИН Андрей Александрович** (Рыбинск) — доктор технических наук, заместитель главного технолога. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Ярославская обл., Российская Федерация, Ленина пр., д. 163, e-mail: aakoryazhkin@rambler.ru).

**КРЕМЕНЕЦКИЙ Леонид Леонидович** (Волжский) — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: kreleonid@yandex.ru).

## Information about the authors

**NOSENKO Sergey Vladimirovich** (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment of Machine Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: s.v.nosenko@gmail.com).

**NOSENKO Vladimir Andreevich** (Volzhsky) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: nosenko@volpi.ru).

**KORYAZHKIN Andrey Aleksandrovich** (Rybinsk) — Doctor of Science (Eng.), Deputy Chief Technologist. PAO United Engine Corporation Saturn (152903, Rybinsk, Yaroslavl region, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: aakoryazhkin@rambler.ru).

**KREMENETSKIY Leonid Leonidovich** (Volzhsky) — Post-graduate, Department of Technology and Equipment of Machine Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: kreleonid@yandex.ru).