



УДК 621.7.015

*Э.Л. Жуков, С.А. Любомудров,
М.М. Радкевич, О.Ю. Ротаренко*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

*E.L. Zhukov, S.A. Lyubomudrov,
M.M. Radkevich, O.Yu. Rotarenko*

THE INFLUENCE OF THE CUTTING ON THE SURFACE QUALITY OF DETAILS MADE FROM PROMISING HARD-TO-PROCESS MATERIALS

Приведены исследования высотных параметров шероховатости поверхности в зависимости от скорости резания и размерного износа режущего инструмента при чистовой токарной обработке титанового и алюминиевого сплавов. Предоставлены рекомендации по выбору скорости резания с целью получения минимального значения высотных параметров шероховатости поверхности.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ; ЧИСЛЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ; СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ; РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС; ЧИСТОВОЕ ТОЧЕНИЕ.

Studies of high-altitude parameters of surface roughness, depending of the speed and size of wear of the cutting tool with finish machining of titanium and aluminium alloys. Recommendations of selection cutting speeds with the aim of obtaining the minimum value of high-altitude parameters of surface roughness

SURFACE ROUGHNESS; NUMERAL PARAMETERS OF SURFACE ROUGHNESS; SPEED OF CUTTING; WEAR DIMENSIONAL; FINISHING TURNING.

Качество деталей в машиностроении определяется величиной отклонений размеров, формы, взаимного расположения элементов деталей и параметров шероховатости поверхности.

В современном машиностроении возросла роль качества поверхности в функциональном назначении детали [1].

Требования к качеству поверхности устанавливаются с целью обеспечения требуемых функциональных свойств поверхности и определяются его численными значениями, величина которых должна обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики.

В машиностроении, особенно при обработке цветных сплавов, нередко, когда это позволяет точность станков [2], детали окончательно получают чистовым точением. Поэтому вопрос получения требуемой величины параметров шероховатости поверхности при чистовом точении заготовок из цветных сплавов — актуальная задача.

На величину численных параметров шероховатости поверхности изготовленной детали оказывают влияния многие технологические факторы. При обработке резанием величина, форма и направление микронеровностей зависят от методов, режимов, схемы обработки и геометрии инструмента. Из параметров режимов резания наиболее существенное влияние на величину шероховатости поверхности оказывают скорость резания и подача инструмента.

Влияние скорости резания на шероховатость поверхности зависит от образования нароста на режущей кромке инструмента, от захвата и отрыва слоев, расположенных под режущей кромкой резца, а также от наличия и величины вибраций при точении.

Влияние подачи инструмента на шероховатость в первом приближении определяется из сопоставления двух смежных положений резца, смещенных на величину подачи, по формуле

$$Rz = \frac{S^2}{8r} \text{ мкм}, \quad (1)$$

где Rz — параметр шероховатости (средняя высота профиля по 10 точкам); S — величина подачи на оборот; r — радиус при вершине резца [3].

Эта формула вполне справедлива для варианта обработки стальных заготовок резцами с радиусом закругления режущей кромки.

Подобные рекомендации по расчету параметров шероховатости поверхности в зависимости от скорости резания отсутствуют.

Проведенные ранее исследования при точении заготовок из сталей показали, что значения параметров шероховатости при увеличении скорости резания сначала улучшаются, а по достижении определенного значения снова начинают ухудшаться [4].

В числе других основных причин возникновения микронеровности — колебания, которые часто возникают во время резания. Наличие колебаний и их величина зависят от скорости резания [5].

Конкретные рекомендации по выбору скорости резания исходя из получения минимальных численных значений параметров шероховатости поверхности при точении цветных сплавов практически в публикациях отсутствуют.

В большинстве машиностроительных чертежей деталей задается параметр шероховатости Ra (среднеарифметическое отклонение профиля) как наиболее информативный.

Другой высотный параметр — Rz (средняя высота профиля по десяти точкам) — в чертежах применяется реже, хотя именно он лучше характеризует качество лезвийной обработки поверхности.

С учетом изложенного представляется важным проведение исследований влияния скорости резания и других параметров технологического процесса на величину численных параметров шероховатости поверхности с целью нахождения зоны устойчивого резания, в которой значения этих параметров минимальны.

Цель нашей работы — определить интервал скоростей резания при обработке точением жаропрочных материалов на основе титана и алюминия, в котором значения параметров шероховатости минимальны и резание носит устойчивый характер. Кроме того, необходимо определить максимальную стойкость инструмента, при которой параметры шероховатости имеют прием-

лемые значения. Цель достигается за счет проведения экспериментальных исследований и анализа процесса резания.

Материалы и методика

В современном машиностроении все чаще применяются высокоточные детали из титановых сплавов [6], к которым предъявляют повышенные требования к точности размеров и минимальным значениям параметров шероховатости поверхности.

Значения параметра шероховатости Ra на различных рабочих поверхностях может достигать величины 0,4–0,2 мкм, например в деталях авиационных двигателей [7]. Высокая точность размеров и формы диктует повышенные требования к шероховатости поверхности, при этом примерное соотношение значения параметра шероховатости Ra и допуска на размер составляет один к десяти [8].

Предприятия ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», по заказу которой проводились исследования, широко применяют сплавы на основе титана и порошковые сплавы на основе алюминия. Эти сплавы имеют высокие эксплуатационные характеристики при пониженной массе изготавливаемых из них деталей.

Типичные представители этих сплавов — титановый сплав ВТ1–00 и порошковый сплав на основе алюминия САС-400. Именно на них и отработывалась методика определения рациональных режимов резания с целью обеспечения требуемых численных параметров шероховатости поверхности.

Методика экспериментальных исследований основана на проведении однофакторного эксперимента по точению деталей из названных выше сплавов при различных скоростях резания.

Материал и геометрия режущего инструмента выбирались согласно рекомендациям фирмы-производителя инструмента.

Для оценки шероховатости поверхности использовались два численных параметра — Ra и Rz : первый как наиболее часто используемый, а второй как лучше характеризующий процесс резания. Кроме того, соотношение этих параметров дает информацию об устойчивости процесса резания. При устойчивом резании резцом с радиусом при вершине соотношение между значениями параметров Ra и Rz постоянно,

а именно выдерживается примерное соотношение $4Ra \approx Rz$.

По графикам зависимости численных параметров шероховатости от скорости резания и их соотношения определялся интервал скоростей резания, обеспечивающий приемлемые значения параметров шероховатости.

Для дальнейшего анализа формы профиля при некоторых скоростях резания записывалась профилограмма обработанной поверхности.

По данным размерный износ режущего инструмента значительно влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности [9]. До достижения износом определенной величины значение параметров шероховатости поверхности меняется мало, а после достижения этой величины — резко возрастает.

Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты по определению значения параметра шероховатости Ra в зависимости от величины размерного износа резца. Для этого последовательно обрабатывались заготовки из порошкового алюминиевого сплава и периодически измерялись размерный износ и высотный параметр шероховатости Ra .

Экспериментальная установка

Для проведения исследований на кафедре технологии машиностроения СПбГПУ была создана экспериментальная установка.

Исследования проводились на универсальном токарном станке высокой точности — 16Б16КА; он имеет достаточный диапазон скоростей, а частота вращения шпинделя может быть установлена от 16 до 2000 об/мин.

Обрабатываемые заготовки имели цилиндрическую форму и крепились в шпинделе станка с помощью специальной оправки. Такая схема крепления обеспечивает большую жесткость.

После обработки заготовок параметры шероховатости Ra и Rz измерялись с помощью профилометра-профилографа М400 фирмы Маhr.

Основные технические характеристики этого прибора:

измеряемые характеристики — полный профиль, волнистость и шероховатость;

измерительная система — индуктивная система со сменными щупами с радиусом закругления 2 мкм; измерительное усилие составляет 0,7 мкН, крепление наконечников магнитное;

фильтры — гауссов фильтр и Ls -фильтр; прибор позволяет измерять параметры DIN/ISO ($Ra, Rq, Rz, R_{max}, Rp, Rv, Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, RPe, Rmr(3x), HSC, RSm, Rsk, Rdc, Rdq, Pa, Pt, PMr(3x), Pdc$) и MOTIF ($R, Ar, Rx, W, Wx, Wte, CR, CL, CF, NR, NCRx, NW$); отсечка шага — 0,08, 0,25, 0,8 и 2,5 мм, причем производится автоматически;

скорость трассирования — 0,2 и 1 мм/с.

Для измерения размерного износа режущего инструмента применялось расположенное в задней бабке токарного станка приспособление, которое изображено на рис. 1.

Датчик 2 измеряет положение вершины режущего инструмента. Датчик 1 измеряет положение державки резца. Предварительно датчики настраивают на ноль. Индуктивные датчики подключают к измерительной системе М-200. Разность между показаниями датчиков и является величиной износа инструмента. Цена деления датчиков — 0,1 мкм, рабочий ход составляет ± 1 мм.

Проведение экспериментов

При обработке титанового сплава ВТ1–00 согласно рекомендациям [10] был выбран инструмент с пластиной твердого сплава VCGX160404-AL N10 и следующие режимы резания: подача $S = 0,1$ мм/об и глубина резания $t = 0,3$ мм. Скорость резания менялась от 40 до 500 м/мин.

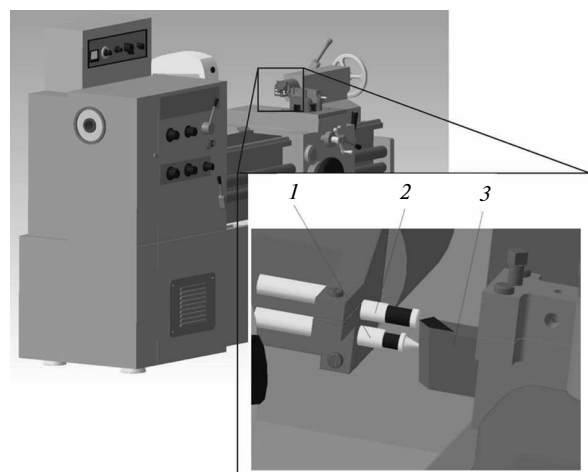


Рис. 1. Устройство для измерения размерного износа инструмента на токарном станке:

1 — датчик, измеряющий положение державки резца;
2 — датчик, измеряющий положение вершины резца;
3 — резец

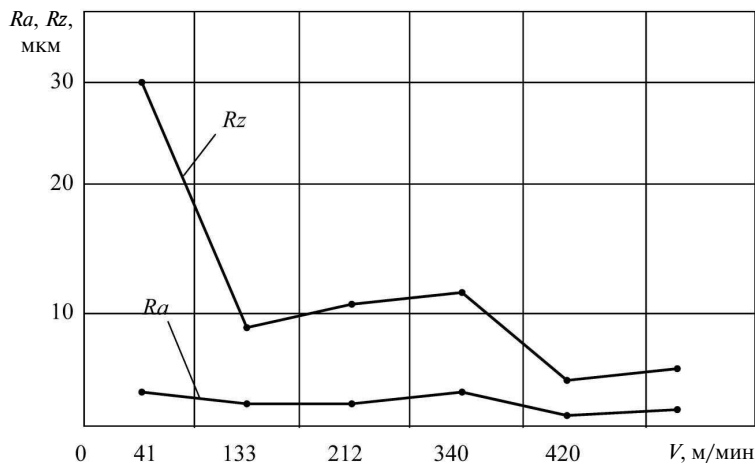


Рис. 2. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении титанового сплава

Протачивались заготовки цилиндрической формы диаметром 100–120 мм и длиной 80 мм.

Численные значения параметров шероховатости измерялись в различных точках обработанной детали (от пяти до десяти точек), находилось их среднее значение.

Зависимости параметров шероховатости от скорости резания V приведены на рис. 2.

Графики на рис. 2 показывают, что наиболее рациональная скорость резания для обеспечения шероховатости поверхности при точении титанового сплава ВТ1–00 — около 420 м/мин.

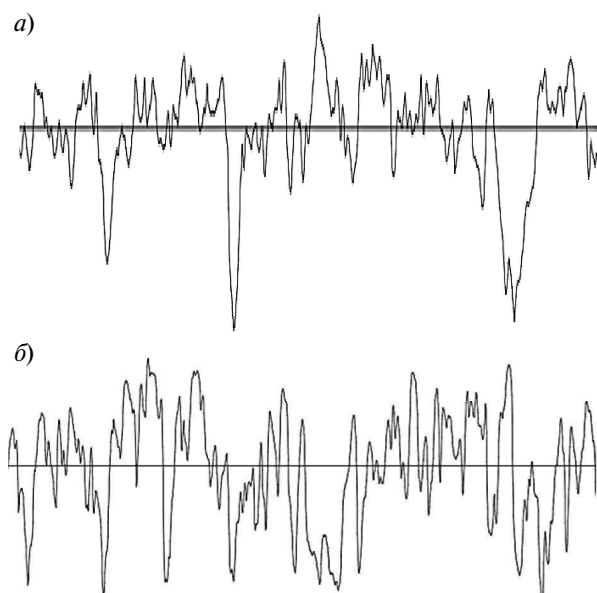


Рис. 3. Профилограмма поверхности детали при скорости резания 312 (а) и 526 (б) м/мин

При скоростях 212 и 526 м/мин были сняты профилограммы поверхности обработанной детали, которые приведены на рис. 3.

Точение заготовок из алюминиевого сплава диаметром 150 мм велось согласно рекомендациям [11] при следующих режимах резания: глубина резания — 0,1 мм, подача — 0,02 мм/об, скорость резания менялась и принимала значения соответственно 100, 200, 300, 400 и 600 м/мин.

После точения заготовок на профилографе-профилометре измеряли значения параметров Ra и Rz в десяти точках по длине заготовки и находили средний размер указанных параметров. Зависимости значения среднего значения численных параметров шероховатости поверхности от скорости резания приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при малых скоростях резания значения параметров шероховатости весьма значительны, а при увеличении скорости резания они уменьшаются и достигают минимума при скорости 400 м/мин. Далее численные значения параметров снова увеличиваются.

Для определения зависимости параметра шероховатости Ra от величины размерного износа были проведены эксперименты по точению алюминиевого сплава резцом из композита 01 при глубине резания 0,1 мм, подаче 0,02 мм/об и скорости резания 405 м/мин.

Зависимость значения параметра Ra от величины размерного износа резца i приведена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при достижении резцом размерного износа 8 мкм происходит резкое уве-

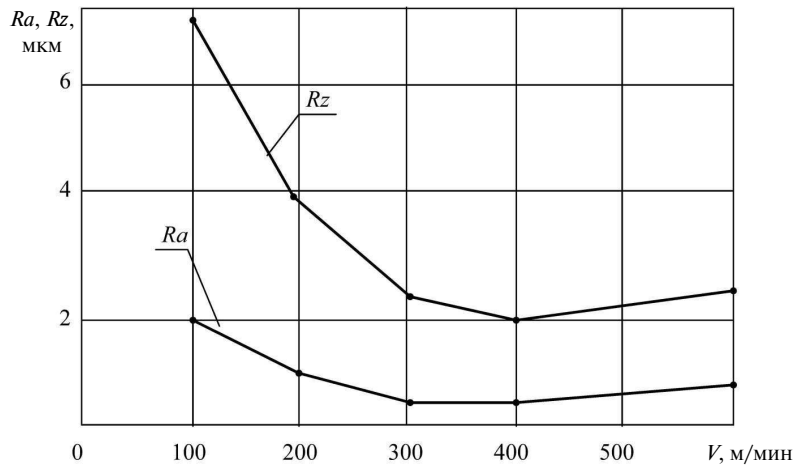


Рис. 4. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении алюминиевого сплава

личение значения параметра Ra . При этом путь резания, пройденный резцом, составляет примерно 25 км.

Анализ результатов

Из графиков на рис. 2 видно, что при точении титанового сплава имеется значительная разница между величинами параметров Ra и Rz при малых скоростях резания V , что свидетельствует о нерегулярном характере шероховатости. Это видно и на профилограмме поверхности обработанной детали (рис. 3). На рис. 3, а показана профилограмма поверхности детали после обработки со скоростью 212 м/мин, на ней видны четкие следы инструмента в виде борозд, которые значительно превышают среднее значения высоты профиля на других участках. Это свидетельствует о наличии наростообразования при резании.

В зоне образования нароста, который возникает при малых скоростях, значение параметра Rz значительно превышает значение параметра Ra . Вершина нароста, выступая впереди лезвия резца и ниже линии реза, увеличивает шероховатость лезвия, формирующего обработанную поверхность, оставляет на поверхности среза глубокие борозды и разрывы, которые влияют на значение параметра Rz больше, чем на параметр Ra , поскольку параметр Ra является средним значением и учитывает все факторы, влияющие на шероховатость поверхности, а параметр Rz — максимальная высота профиля по 10 точкам — отражает один доминирующий фак-

тор, который в этом случае сильно превосходит остальные.

При скорости резания около 100 м/мин параметр Rz имеет значение 30 мкм, а параметр Ra — значение 3,1 мкм.

При скоростях резания выше 450 м/мин величина шероховатости начинает увеличиваться по сравнению с зоной оптимального резания. Это связано с возникновением колебаний в зоне резания.

Колебания особенно заметны, если технологическая система неустойчива [12]. Колебания инструмента отражаются на поверхности и увеличивают численные значения параметров шероховатости поверхности. Соотношение параметров Rz и Ra снова начинает увеличиваться. На рис. 3, б показана профилограмма поверх-

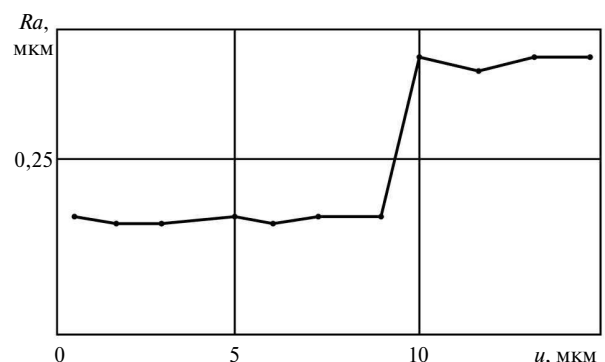


Рис. 5. Зависимость параметра Ra от размерного износа инструмента u при обработке алюминиевого сплава

ности детали после обработки со скоростью 526 м/мин, на ней четко видны следы колебаний.

Исследования по точению порошкового алюминиевого сплава САС-400 резцами из кубического нитрида бора дали такой же результат, что и при точении титана.

Исследования зависимости параметра Ra от размерного износа инструмента (ее график приведен на рис. 5) показали, что до того, как износ достигнет определенной величины, шероховатость поверхности практически не меняется. Резкое ухудшение шероховатости происходит при достижении резцом из кубического нитрида бора величины размерного износа 8,2 мкм. Значение параметра Ra при этом изменилось с 0,18 до 0,43 мкм.

Характер размерного износа после этого не изменился, но на задней грани резца появилась четко различимая в микроскопе фаска износа.

Этот момент резкого ухудшения шероховатости целесообразно считать границей стойкости инструмента. Учитывая, что путь резания до этого момента составил 25 км, а скорость резания была 405 м/мин, стойкость инструмента составила 61 минуту.

Приведенные выше данные исследований позволили сделать следующие выводы.

Полученные в результате экспериментов зависимости высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания имеют выраженный минимум. Для титанового сплава ВТ1–00 он наступает при 420 об/мин, для алюминиевого сплава САС-400 — при 400 м/мин.

В зонах неустойчивого резания наблюдается большая разница между значениями параметров Ra и Rz и изменяется их соотношение; в зоне устойчивого резания это соотношение минимально.

В результате экспериментов по точению алюминиевого сплава САС-400 выяснилось, что при достижении резцом размерного износа 8 мкм параметр шероховатости Ra резко ухудшается.

Проведенные исследования позволили определить зону устойчивого резания. Эта зона находится для сплава ВТ1–00 в диапазоне скоростей резания от 400 до 500 м/мин, для САС-400 — в диапазоне от 350 до 450 м/мин. В этих зонах и рекомендуется проводить обработку указанных сплавов.

Момент резкого ухудшения шероховатости можно считать границей стойкости инструмента при чистовом точении цветных сплавов. Для резца из композита 01 при точении сплава САС-400 стойкость инструмента составила 1 час.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / Под ред. Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та 2007. 136 с.
2. Анухин В.И., Макарова Т.А., Любомудров С.А. Оценка точностных возможностей токарных станков // «Вестник Инжексона». Сер.: Технические науки. Вып. 3. Санкт-Петербург. 2005. С. 108–111.
3. Жуков Э.Л. [и др.] Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов : учеб. пособие / Под общ. ред. С.Л. Мурашкина. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 408 с.
4. Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М. Обработка металлов резанием. Ростов на Дону: Феникс, 2008. 411 с.
5. Мурашкин С.Л., Схиртладзе А.Г., Соболейчик А.М., Жуков Э.Л., Козарь И.И., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В. Технология машиностроения. Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие / Под ред. С.А. Мурашкина СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 280 с.
6. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
7. Соловейчик А.М. [и др.]. Технологическое обеспечение качества изделий в машиностроении: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 250 с.
8. Анухин В.И. Допуски и посадки: учеб. пособие. 5-е изд. СПб. : Питер, 2012. 244 с.
9. Любомудров С.А., Макарова Т.А. Обеспечение качества обработки специальных алюминиевых сплавов при тонком точении // Управление качеством: проблемы, исследования, опыт: Сборник научных трудов. СПб.: СПбГИЭУ, 2007. Вып. 5. С. 86–97.
10. Руководство по металлообработке. Технический справочник. АВ Sandvik Coromant. 2010. 201 с.
11. Зубарев Ю.М., Парсегов О.В. Прогрессивный режущий инструмент на основе кубического нитрида бора. Л.: ЛДНТП, 1988. 32 с.
12. Козарь И.И., Соловейчик А.М., Колодяжный Д.Ю., Плавник С.Л. Устойчивость движения технологических систем при прерывистой обработке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 2(44). С. 91–97.

REFERENCES

1. **Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N.** Roughness, waviness, profile. International experience / Pod red. N.A. Tabachnikovoi. SPb.: Izd-vo Politechn. Un-ta 2007. 136 s. (rus.)
2. **Anuchin V.I., Makarova T.A., Lyubomudrov S.A.** Appraisal precision possibility of lathes. *Magazine messenger of Injecon. Series of technical science.* SPb. 2005. Issue 3. S. 108–111. (rus.)
3. **Zhukov E.L.** [and other]. Technological basics of machine-building. Stages of project and accuracy of manufacturing processes: Manual / Pod red. prof. S.L. Murashkina SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2008. 408 s. (rus.)
4. **Ryzhkin A.A., Shusev K.G., Klimov M.M.** Machining of metal by cutting. Rostov-in-Don: Feniks, 2008. 411 s. (rus.)
5. **Murashkin S.L., Skritladze A.G., Soloveichik A.M., Zhukov E.L., Kozar I.I., Rozovski B.I., Degtiarev V.V.** Technology of machine-building. Vibration and accuracy during machining of metal by cutting: Manual / Pod red. S.A. Murashkina. SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2003. 280 s. (rus.)
6. **Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryukovtsev A.S.** Alloys of titan for the pieces of the OAO «Aviation engine». Modern alloys of titan and problems of progress: a Collection. M.: VIAM, 2010. S. 43–46. (rus.)
7. **Soloveichik A.M. [and others.]** Technological guaranteeing of the quality of pieces in the machine-building: Manual. SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2010. 250 s. (rus.)
8. **Anuchin V.I.** Tolerances and fits: Manual. 5-e izd. SPb.: Peter, 2012. 244 s. (rus.)
9. **Lyubomudrov S.A., Makarova T.A.** Guaranteeing of the quality of cutting special pac alloys during finish turning. *Management of quality: problems, researches, experience. Collection of works scientific.* SPb.: SPbGIEU, 2007. Vyp. 5. S. 73–81. (rus.)
10. Guidance for machining: Reference book. AB Sandvik Coromant. 2010. 201 s.
11. **Zubarev Y.M., Parsegov O.V.** Progressive cutting tool on the basis cube nitride boron. L.: Izd-vo LDNTP, 1988. 32 s. (rus.)
12. **Kozar I.I., Soloveichik A.M., Kolodiyjny D.Y., Plavnik S.L.** Stability of the manufacturing systems motion's during jerking cuttcing. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGPU.* 2006. № 2(44). S. 90–97. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖУКОВ Эдуард Леонидович — кандидат технических наук профессор кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kii49@yandex.ru

ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович — кандидат технических наук заведующий кафедрой технологии и машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Lyubomudrow@yandex.ru

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mmftkm@yandex.ru

РОТАРЕНКО Ольга Юрьевна — студент, лаборант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: olga.rotarenko@mail.ru

AUTHORS

ZHUKOV Eduard L. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kii49@yandex.ru

LYUBOMUDROV Sergey A. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Lyubomudrow@yandex.ru

RADKEVICH Mikhail. M. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mmftkm@yandex.ru

ROTARENKO Olga Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: olga.rotarenko@mail.ru