

Л.Р. Сингатуллина, И.А. Крутихина, В.Р. Туктамышев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Совершенствование технологий контурного фрезерования сложнопрофильных поверхностей реализуется благодаря грамотному управлению режимами резания. Режимы резания оказывают существенное влияние не только на производительность и себестоимость обработки, но и на точность и качество обработанной поверхности. Шероховатость поверхности R_a определяет характеристики износостойкости и обтекаемости газами и жидкостями, величину усталостного сопротивления, контактной жесткости, виброустойчивости, коррозионной стойкости. Вследствие чего на этапе разработки рабочего проекта изделия важно определить рациональную величину шероховатости поверхности R_a и обеспечить заданное значение на чистовых операциях в ходе выполнения технологического процесса.

Проведен анализ научных статей по влиянию режимов резания на величину шероховатости поверхности при контурном фрезеровании сложнопрофильных поверхностей. В приведенных работах были даны практические рекомендации по выбору схемы резания и направлению обхода контура на чистовых операциях фрезерования сложнопрофильных поверхностей инструментом сферической формы, назначению траектории движения инструмента, применению циклов доработки углов сопряженных поверхностей в составе управляющей программы, позволяющие повысить качество обработанной поверхности, были разработаны универсальные управляющие подпрограммы, осуществляющие коррекцию положения инструмента и режимов резания в зависимости от величины упругих перемещений фрезы. Однако назначение нормативного сочетания управляемых параметров режима резания, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности, по аналитическим выражениям не было рассмотрено в приведенных исследованиях. Для решения данной задачи был спланирован полный факторный эксперимент для получения математической модели, позволяющей спрогнозировать величину шероховатости при различных режимах обработки (V , S_z , B).

Ключевые слова: контурное фрезерование сложнопрофильных поверхностей, режимы резания, шероховатость поверхности, математическая модель.

L.R. Singatullina, I.A. Krutikhina, V.R. Tuktamyshev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

STUDY OF SURFACE ROUGHNESS DURING CONTOUR MILLING OF DIFFICULT PROFILE SURFACES OF STAINLESS STEEL PARTS

The improvement of technologies for contour milling of complex-profile surfaces is realized thanks to the competent management of cutting conditions. Cutting conditions have a significant impact not only on productivity and processing costs, but also on the accuracy and quality of the machined surface. The surface roughness R_a determines the characteristics of wear resistance and streamlining by gases and liquids, the value of fatigue resistance, contact brutality, vibration resistance, and corrosion resistance. As a result, at the stage of development of the working design of the product, it is important to determine the rational value of the surface roughness R_a and ensure the specified value in finishing operations during the execution of the technological process.

In the course of the work, the analysis of scientific articles on the influence of cutting conditions on the value of surface roughness during contour milling of complex-shaped surfaces was carried out. In the cited works, practical recommendations were given on the choice of the cutting pattern and the direction of the contour bypass in the finishing operations of milling of complexly shaped surfaces with a spherical tool, the assignment of the tool path, the use of cycles for finishing the angles of mating surfaces as part of the control program, which make it possible to improve the quality of the machined surface, were developed universal control routines for correcting the position of the tool and cutting conditions depending on the amount of elastic displacement of the cutter. However, the purpose of the normative combination of controlled parameters of the cutting mode, providing the required surface roughness, according to analytical expressions, was not considered in the above studies. To solve this problem, a full factorial experiment was planned to obtain a mathematical model that makes it possible to predict the value of roughness at various processing modes (V , S_z , B).

Keywords: contour milling of complex-profile surfaces, cutting modes, surface roughness, mathematical model.

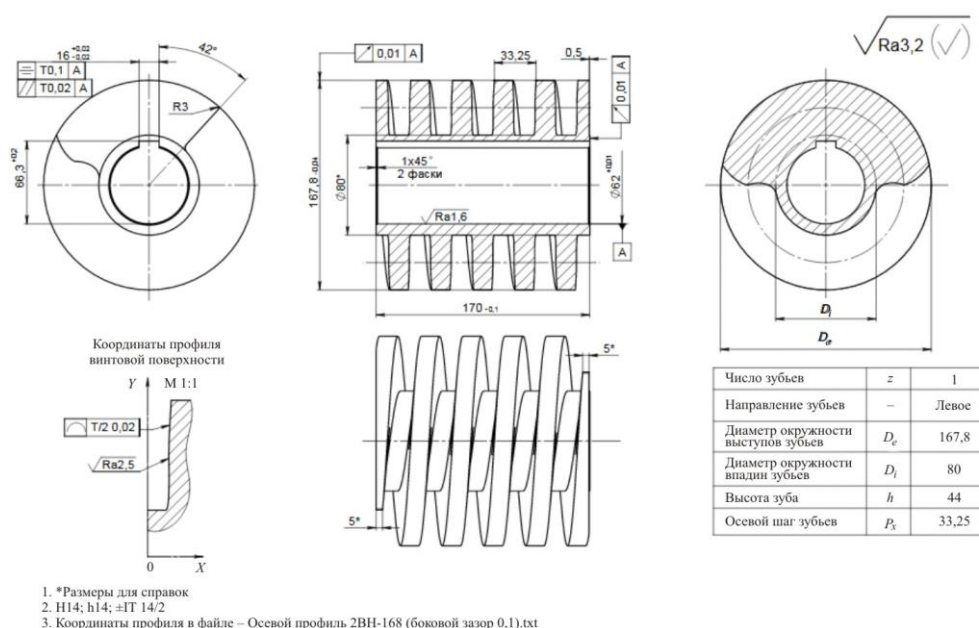


Рис. 1. Чертеж детали «шнек»

Развитие современной техники при одновременном повышении качества и снижении металлоемкости изделий расширило номенклатуру и количество деталей машин сложной геометрической формы.

В частности, наиболее сложной задачей при создании энергетических установок является разработка и изготовление турбонасосного агрегата. Для создания кавитационного запаса и предупреждения гидравлических ударов в составе конструкции предусмотрены шнеки, выполненные из нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 1). Обеспечение эксплуатационных свойств шнека осуществляется в том числе благодаря получению требуемой шероховатости винтового канала в ходе механической обработки. При проектировании операции механической обработки сложнопрофильной поверхности возникает сложность назначения режимов резания, обеспечивающих требуемую производительность и качество обработанной поверхности, в связи с необходимостью учета углов сопряжения смежных поверхностей, изменения глубины, ширины фрезерования и угла контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью. Таким образом, ставится задача, заключающаяся в повышении производительности контурной обработки сложнопрофильных де-

талей машин из нержавеющей стали на станках с ЧПУ путем управления режимами резания при одновременном сохранении требуемой шероховатости поверхности.

Вопросы повышения производительности обработки и формирования шероховатости при контурном фрезеровании сложнопрофильных поверхностей были освещены в научных работах многих отечественных и зарубежных ученых.

В работах [1–3] с целью повышения точности и качества обработанной поверхности были даны практические рекомендации по выбору схемы резания и направлению обхода контура на чистовых операциях фрезерования сложнопрофильных поверхностей инструментом сферической формы, а также стратегии обработки и назначения траектории движения инструмента при обработке вогнутых и выпуклых поверхностей сферической фрезой. Однако влияние режимов резания на величину шероховатости поверхности, получаемой в ходе контурного фрезерования, и задачи повышения производительности не рассматривались в вышеуказанных работах. В свою очередь, проблема повышения производительности обработки сложнопрофильных поверхностей рассматривалась в работах [4–9]. В ходе исследований были разработаны циклы доработки

углов сопряженных поверхностей в составе управляющей программы, позволяющие повысить точность обработанной поверхности. Были предложены управляющие программы, осуществляющие коррекцию режимов резания и положения инструмента относительно номинальной поверхности с целью минимизации упругих перемещений инструмента. Для автоматического установления кинематических режимов резания в зависимости от траектории инструмента и пространственного положения заготовки была разработана управляющая программа с расчетно-исполнительными подпрограммами. Однако режимы резания назначались относительно точности выполняемых размеров, вопрос влияния режимов резания на параметр шероховатости обработанной поверхности не рассматривался.

В целях повышения производительности обработки сложнопрофильных поверхностей в работах [10–14] было предложено использовать мультипликаторы, повышающие частоту вращения шпинделя станка, и адаптивные системы предельного регулирования отклонений размеров. Для уменьшения волнистости и шероховатости поверхности в ходе исследований авторами были разработаны: специальное устройство, прогрессивный виброустойчивый режущий инструмент и оснастка. Рекомендации по применению расчетных значений подачи в зависимости от угла обработки при одновременном сохранении требуемого параметра шероховатости R_{\max} , приводящие к увеличению производительности механической обработки, были сформированы в работе [15]. В работе не рассматривалось влияние других управляемых параметров режима резания на производительность обработки сложнопрофильных поверхностей сферическим инструментом.

В ходе работы [16] были получены аналитические выражения для определения сочетания параметров режима резания поперечного строчного фрезерования, позволяющие обеспечить требуемые показатели качества фрезеруемой поверхности профиля пера лопатки.

В работе [17] получена зависимость, определяющая величину максимального среднего арифметического отклонения профиля обрабатываемой поверхности R_a в зависимости от подачи на зуб S_z при торцовом фрезерова-

нии для фрезы, имеющей произвольные конструктивные и геометрические параметры. Построена номограмма определения максимальной производительности. На основании результатов имитационного моделирования процесса торцового фрезерования проведен анализ зависимости качества обработанной поверхности от минутной подачи.

В работе [18] представлена модель, позволяющая прогнозировать значение шероховатости поверхности в зависимости от технологических параметров при обработке легированных сталей.

Однако определение сочетания управляемых параметров режима резания, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности, и дальнейшая оптимизация значений с целью достижения наибольшей производительности при контурном фрезеровании сложнопрофильных поверхностей деталей из нержавеющей стали не были рассмотрены в приведенных исследованиях. В результате разработки методики исследования было определено следующее. Построчное фрезерование образца осуществлялось на фрезерном центре Matec-40 HV с помощью концевой фрезы сферической формы 150120-MEGA-64 SECO, расклоненной под углом 42° (рис. 2). Угол наклона фрезы к обрабатываемой поверхности рассчитывался для точки A (рис. 3), а не для максимального диаметра режущей части фрезы B , исходя из значения оборотов шпинделя фрезы $n = 5000$ и скорости резания $V = 125$ м/мин.

В качестве метода измерения шероховатости поверхности был выбран щуповой, реализуемый с помощью профилометра MarSurf PS1. Измерение шероховатости проводилось в направлении, перпендикулярном направлению движения режущего инструмента. В качестве факторов при проведении полного факторного эксперимента были определены следующие параметры режима резания: скорость V , подача на зуб фрезы s_z и ширина фрезерования B . Максимальные и минимальные значения параметров были приняты согласно рекомендациям производителя [19]. Математическая модель была определена в виде степенной зависимости согласно классической эмпирической модели, представленной в справочнике технолога-машиностроителя:

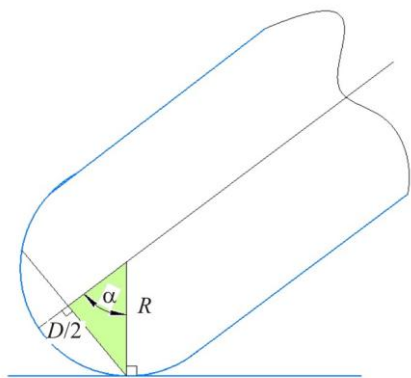


Рис. 2. Схема для расчета угла наклона фрезы

$$Ra = cV^a s_z^b B^y,$$

где c, a, b, y – постоянные коэффициенты.

Уравнение после логарифмирования и введения членов, учитывающих взаимодействие факторов, примет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \tilde{x}_1 + b_2 \tilde{x}_2 + b_3 \tilde{x}_3 + b_{12} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 + b_{13} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3 + b_{23} \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 + b_{123} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3,$$

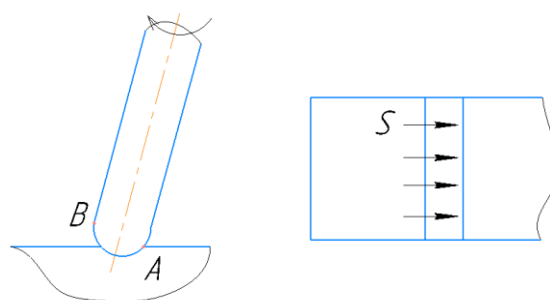


Рис. 3. Схема резания

где \hat{y} – значение шероховатости при обработке фрезерованием в логарифмическом масштабе; $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ – логарифмы V, s_z, B соответственно; b_i – коэффициенты уравнения.

Для определения математической модели исследуемого объекта с учетом взаимодействия факторов составляем расширенную матрицу планирования (табл. 1).

Таблица 1

Расширенная матрица планирования ПФЭ

Номер точки плана	x_0	Планирование							Параметр оптимизации y			
		x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	\bar{y}_j
1	+	+	+	+	+	+	+	+	y_{11}	y_{12}	y_{13}	\bar{y}_1
2	+	-	+	+	-	-	+	-	y_{21}	y_{22}	y_{23}	\bar{y}_2
3	+	+	-	+	-	+	-	-	y_{31}	y_{32}	y_{33}	\bar{y}_3
4	+	-	-	+	+	-	-	+	y_{41}	y_{42}	y_{43}	\bar{y}_4
5	+	+	+	-	+	-	-	-	y_{51}	y_{52}	y_{53}	\bar{y}_5
6	+	-	+	-	-	+	-	+	y_{61}	y_{62}	y_{63}	\bar{y}_6
7	+	+	-	-	-	-	+	+	y_{71}	y_{72}	y_{73}	\bar{y}_7
8	+	-	-	-	+	+	+	-	y_{81}	y_{82}	y_{83}	\bar{y}_8

Для проведения опытов сформируем рабочую матрицу (табл. 2), полученную путем замены кодированных значений факторов в

матрице планирования их натуральными значениями.

Таблица 2

Рабочая матрица эксперимента исследования шероховатости обработанной поверхности при изменении режимов резания: скорости резания V , подачи s_z и ширины фрезерования B

Уровень факторов	Обозначение	$V, \text{ м/мин}$	$s_z, \text{ мм/зуб}$	$B, \text{ мм}$
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
Основной	0	110	0,065	0,48
Интервал варьирования	$\Delta \tilde{x}_i$	15	0,02	0,12
Верхний	+1	125	0,085	0,6
Нижний	-1	95	0,045	0,36

Результаты проведенного эксперимента по измерению шероховатости обработанных поверхностей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений параметра Ra

Номер площадки	Ra, мкм			Номер площадки	Ra, мкм		
	1	2	3		1	2	3
1	3,159	3,079	2,786	5	1,728	1,544	1,726
2	2,481	2,089	2,058	6	1,539	1,056	1,571
3	2,952	2,963	3,090	7	1,552	1,613	1,509
4	2,994	2,959	2,756	8	1,488	1,691	1,394

Таким образом, назначение нормативно-го сочетания управляемых параметров режима резания, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности, по аналитическим выражениям не рассматривалось в приведенных на-

учных и методических работах. В ходе проделанной работы была разработана методика проведения исследований и предложены оптимальные пути проведения экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Купцов В.Р., Зарубин С.Г., Зеленский А.А. Повышение точности контурного фрезерования профиля зубчатого венца циклоидального колеса на токарно-фрезерном многоцелевом станке // Вестник МГТУ СТАНКИН. – 2016. – № 3 (38) – С. 22–27.
2. Гимадеев М.Р. Исследование параметров микрорельефа при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ // Ученые заметки ТОГУ. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 61–70.
3. Лещенко А.И. Кинематические параметры резания, связанные с изменением топологических характеристик обрабатываемых сложнопрофильных поверхностей // ПРОГРЕСИВНИ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ МАШИНОБУДУВАННЯ. – 2013. – № 1(46). – С. 171–176.
4. Маунг Вэй Пью. Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции траектории и режимов резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 163 с.
5. Овчинникова К.Д., Сыркин С.С. Доработка углов с использованием цикла маятникового контурного фрезерования // Современные проблемы развития техники, экономики и общества: материалы II междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., г. Казань, 4 апреля 2017 г. – Казань, 2017. – С. 108–110.
6. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Фрезерование сложных деталей с коррекцией положения инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 111–119.
7. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 4(82). – С. 29–37.
8. Малютин Г.Е. Совершенствование чистового фрезерования вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ // Механика – XXI веку. – 2017. – № 16. – С. 155–161.
9. Чутвериков И.А., Ельникова И.С. Регулирование технологических режимов при обработке сложнопрофильных поверхностей заготовки // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 11. – С. 239–242.
10. Овчинникова К.Д., Сыркин С.С. Обеспечение точности и производительности контурного фрезерования путем управления размерами статической и динамической настройки // Современные проблемы развития техники, экономики и общества: материалы I Междунар. науч.-практ. заоч. конф., г. Лениногорск, 14 марта 2016 г. – Лениногорск, 2016. – С. 82–85.
11. Юрьев В.Л., Старовойтов С.В. Алгоритм назначения технологических требований чистового фрезерования блисков сферическими фрезами // Наука – производству: ежегод. науч.-техн. сб. – Уфа, 2017. – С. 39–46.
12. Чевычелов С.А., Чистяков П.П., Олексюк В.С. Повышение производительности обработки зубчатых колес // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 148–151.
13. Заварзин Д.А., Киселев И.А., Цыганов Д.Л. Моделирование процесса плоского фрезерования с учетом зависимости динамических характеристик станка // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2016. – № 4. – С. 53–68.

14. Устройство для фрезерования сложнопрофильных поверхностей: пат. 125501 Рос. Федерация U1 / Егунов О.В., Чепчуров М.С. – № 2012114364/02; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.03.2013.
15. Гимадеев М.Р. Анализ механизма формирования микрорельефа при пятикоординатной индексной обработке // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XIX краев. конкурса молод. ученых и аспирантов, г. Хабаровск, 13–20 января 2017 г. – Хабаровск, 2017. – С. 172–176.
16. Тарасов С.В., Свирцев В.И. Технологическое обеспечение требуемых показателей качества при строчном фрезеровании пера лопатки газотурбинного двигателя на многокоординатных станках с ЧПУ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – № 4-1. – С. 22–26.
17. Хоменко В.А., Черданцев А.О., Черданцев П.О. Оптимизация операции торцового фрезерования по критерию максимальной производительности на основе имитационного моделирования // Ползуновский вестник. – 2015. – № 2. – С. 49–54.
18. Гудкова О.С., Сахаров Д.В. Исследование шероховатости поверхности при фрезеровании легированной стали // Образование, наука и производство: сб. тр. конф. VII Междунар. молодеж. форума, г. Белгород, 20–22 октября 2015 г. – Белгород, 2015. – С. 1661–1664.
19. Каталог режущего сборного инструмента Seco для фрезерной обработки [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.lab2u.ru/katalog-seco-2015-metallorzhushchii-instrument-dlia-frezerovaniia-frezy-smennymi-tverdosplavnymi-mnogogrannymi-plastinami-tortcevye-diskovye-plunzhernye-fasonnye-kukuruznye-rezhimy-rezaniia-instrumentalnaia-produktsiia-shvedskoi-kompanii-seco-lab2u.html> (дата обращения: 29.04.2021).

References

1. Kupcov V.R., Zarubin S.G., Zelenskij A.A. Povyshenie tochnosti konturnogo frezerovaniya profilya zubchatogo venca cikloidalnogo koleasa na tokarno-frezernom mnogocelevom stanke [Improving the accuracy of contour milling of the profile of a gear rim of a cycloidal wheel on a turning-milling center]. Vestnik MSTU "STANKIN", 2016, pp. 22–27.
2. Gimadeev M.R. Issledovanie parametrov mikrorel'efa pri frezerovanii na obrabatyvayushchih centrakh s CHPU [Investigation of microrelief parameters during milling on CNC machining centers]. Electronic scientific journal "Scientists notes PNU", Habarovsk, 2018, pp.61-70.
3. Leshchenko A.I. Kinematicheskie parametry rezaniya, svyazannye s izmeneniem topologicheskikh harakteristik obrabatyvaemykh slozhno-profil'nyh poverhnostej [Kinematic cutting parameters associated with a change in the topological characteristics of machined complex-profiled surfaces]. *PROGRESIVNI TEKHOLOGII I SISTEMI MASHINOBUDUVANNYA*, Doneck, 2013, pp.171-176.
4. Wei Pio Maung. Povyshenie effektivnosti konturnoj obrabotki na stankah s CHPU putem korrekcii traektorii i rezhimov rezaniya [Improving the efficiency of contouring on CNC machines by correcting the trajectory and cutting conditions]. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2014, 163 p.
5. Ovchinnikova K.D., Syrkin S.S. Dorabotka uglov s ispol'zovaniem cikla mayatnikovogo konturnogo frezerovaniya [Refinement of corners using the cycle of pendulum contour milling]. *Sovremennye problemy razvitiya tekhniki, ekonomiki i obshchestva*. Materials of the II international scientific and practical conference of the intramural conference. Kazan, April 04, 2017, pp. 108-110.
6. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kuznecov S.F. Frezerovanie slozhnykh detalej s korrekciej polozheniya instrumenta [Milling complex parts with tool offset]. *Izvestiya Tula State University*, 2016, no. 8-2, pp. 111-119.
7. Kozlov A.M., Malyutin G.E. Upravlenie processom chistovoj obrabotki poverhnostej slozhnoj formy na frezernykh stankah s CHPU [Controlling the finishing process of complex surfaces on CNC milling machines]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 4(82), pp.29-37.
8. Malyutin G.E. Sovershenstvovanie chistovogo frezerovaniya vognutykh poverhnostej na stankah s CHPU [Improvement of finishing milling of concave surfaces on CNC machines]. *Mekhaniki XXI veka. Iz-vo Bratskij gosudarstvennyj universitet*, 2017, pp.155-161
9. Chutverikov I.A., Elnikova I.S. Regulirovanie tekhnologicheskikh rezhimov pri obrabotke slozhno profil'nykh poverhnostej zagotovki [Regulation of technological modes during processing of complexly shaped workpiece surfaces]. *Innovation and Investment: Moscow*, 2015, no.11, pp.239-242.
10. Ovchinnikova K.D. Syrkin S.S. Obespechenie tochnosti i proizvoditelnosti konturnogo frezerovaniya putem upravleniya razmerami staticheskoy i dinamicheskoy nastrojki [Ensuring the accuracy and productivity of contour milling by controlling the dimensions of static and dynamic settings]. *Modern problems of the development of technology, economy and society. Materials of the I International Scientific and Practical Correspondence Conference, Leninogorsk, March 14, 2016*, pp. 82-85.

11. Yurev V.L., Starovojtov S.V. Algoritm naznacheniya tekhnologicheskikh trebovaniy chistovogo frezerovaniya bliskov sfericheskimi frezami [Algorithm for assigning technological requirements for finishing blisk milling with spherical cutters]. *Nauka-proizvodstvu*. Annual scientific and technical collection. Ufa 2017, pp.39-46.

12. Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Oleksyuk V.S. Povyshenie proizvoditelnosti obrabotki zubchatykh kolez [Increased productivity in gear machining]. *ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING*, 2015, no.2, pp. 148-151.

13. Zavarzin D.A., Kiselev I.A., Cyganov D.L. Modelirovanie processa ploskogo frezerovaniya s uchedom zavisimosti dinamicheskikh harakteristik stanka [Simulation of the process of surface milling taking into account the dependence of the dynamic characteristics of the machine]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2016, no.4, pp.53-68.

14. Egunov O.V., Chepchurov M.S. Patent RU 125501 U1. Ustrojstvo dlya frezerovaniya slozhnoprofilnykh poverhnostej [A device for milling complex-profile surfaces]. Publication year: 2013. Application number: 2012114364/02. Date of registration: 11.04.2012. Date of publication: 03/10/2013.

15. Gimadeev M.R., Analiz mekhanizma formirovaniya mikrorel'efa pri pyatikoordinatnoj indeksnoj obrabotke [Analysis of the mechanism of microrelief formation during five-coordinate index processing]. *Molodye uchenye – Habarovskomu krayu*. Materials of the XIX regional competition of young scientists and graduate students. Khabarovsk. January 13-20, 2017, pp. 172-176.

16. Tarasov S.V., Svirshchev V.I. Tekhnologicheskoe obespechenie trebuemykh pokazatelej kachestva pri strochnom frezerovanii pera lopatki gazoturbinnogo dvigatelya na mnogokoordinatnykh stankah s CHPU [Technological support of the required quality indicators for line milling of the blade of a gas turbine engine blade on multi-axis CNC machines]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no.4-1, pp. 22-26.

17. Khomenko V.A., Cherdantsev A.O., Cherdantsev P.O. Optimizatsiya operatsii tortsovogo frezerovaniya po kriteriyu maksimal'noy proizvoditelnosti na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Optimizing face milling operation for maximum productivity based on simulation]. *Polzunovskiy vestnik*, 2015, no.2, pp.49-54.

18. Gudkova O.S., Sakharov D.V. Issledovaniye sherokhovatosti poverkhnosti pri frezerovanii legirovannoy stali [Investigation of surface roughness when milling alloy steel]. *Proceedings of the conference of the VII international youth forum «Obrazovaniye, nauka i proizvodstvo»*, Belgorod, October 20-22, 2015, P. 1661-1664.

19. Katalog rezhushchego sbornogo instrumenta Seco dlya frezernoy obrabotki 2015 [Catalog of cutting assembly tools Seco for milling 2015]. URL: <http://www.lab2u.ru/katalog-seco-2015-metallorazhushchii-instrument-dlya-frezernoy-obrabotki-2015>. (Date of access: 04/29/2021).

Об авторах

Сингатуллина Лилия Раисовна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15; e-mail: eliz.singatullina@yandex.ru).

Крутихина Ирина Антоновна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15; e-mail: 89617595817@mail.ru).

Туктамышев Виталий Рафаилович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 15; e-mail: tuktvr@gmail.com).

About the authors

Lilia R. Singatullina (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student of Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University (15, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: eliz.singatullina@yandex.ru).

Irina A. Krutikhina (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student of Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University (15, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: 89617595817@mail.ru).

Vitaly R. Tuktamyshev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University (15, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: tuktvr@gmail.com).

Получено 29.04.2021