

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ С ОБРАТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ

В. Е. Овсянников<sup>1</sup>, Е. М. Кузнецова<sup>2</sup>, Р. Ю. Некрасов<sup>1</sup>, С. Ю. Тицкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> Курганский государственный университет, Курган, Россия

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF OSCILLATORY PROCESSES AT TURNING OF MATERIALS WITH REVERSE HARDNESS DISTRIBUTION

Victor E. Ovsyannikov<sup>1</sup>, Elena M. Kuznetsova<sup>2</sup>, Roman Yu. Nekrasov<sup>1</sup>, Snezhana Yu. Titskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

<sup>2</sup> Kurgan State University, Kurgan, Russia

**Аннотация.** Технологическое обеспечение требуемых показателей качества поверхностного слоя деталей тел вращения из металлических материалов при чистовой и финишной механической обработке требует правильного назначения технологических режимов. При чистовой токарной обработке на формирование шероховатости поверхности существенное (а часто и решающее) воздействие оказывают колебательные процессы. Необходимо выбирать такие значения технологических режимов, которые обеспечивают приемлемый уровень вибраций (предварительно данную задачу целесообразно решать на основе моделирования). Разработка математической модели выполнялась на основании определения деформаций токарного резца под воздействием сил резания. Для определения амплитуд колебаний резца использовался интеграл Мора, определение амплитудно-частотных характеристик производилось с использованием интеграла Дюамеля. Определение сил резания осуществлялось с учетом формы и характера

**Abstract.** For technological guarantee of the required quality indicators of the surface layer of metallic rotation body parts at finishing machining needs the correct assignment of technological modes. During finishing turning, vibrational processes have a significant (and often decisive) effect on the formation of surface roughness. It is necessary to choose such values of technological modes, which provide an acceptable level of vibration (previously it is advisable to solve this problem by modelling). Mathematical model was carried out based on the determination of the turning tool deformations under the influence of cutting forces. To determine the amplitudes of the cutter oscillations, the Mohr integral was used, and the amplitude-frequency characteristics were determined using the Duhamel integral. Cutting forces were determined taking into account the shape and nature of chip formation, the value of technological modes and processing conditions. As the material to be machined, the authors considered the cast iron with a layer hardened by

стружкообразования, величины технологических режимов и условий обработки. В качестве обрабатываемого материала рассматривался чугун с упроченным посредством диффузионного легирования слоем. Определение исходных данных для построения модели проводилось непосредственно при обработке на токарном станке и с помощью дальнейших измерений параметров стружки. В качестве режущих инструментов использовались стандартные резцы с механическим креплением пластин. Оценка результатов моделирования показала высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований: погрешность по амплитуде 8.5 %, по частоте колебаний – 12.3 %; в целом погрешность не превысила 15 %. Таким образом, разработанная модель может быть использована для предварительной оценки вибраций на стадии проектирования технологических операций токарной обработки.

**Ключевые слова:** обработка, точение, качество поверхности, вибрации, моделирование

diffusion alloying. Determination of input data for model was carried out directly during machining on the lathe and with the help of measurements of chip parameters. As cutting tools, we used standard cutters with mechanically fastened plates. The evaluation of the modelling results showed high convergence with the experimental results: the error in amplitude was 8.5 percent, in oscillation frequency - 12.3 percent; in general, the error did not exceed 15 percent. Thus, the developed model can be used for preliminary vibration assessment at the design stage of turning operations.

**Key words:** machining, turning, surface quality, vibration, modelling

**Для цитирования:** Разработка математической модели колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости / В. Е. Овсянников, Е. М. Кузнецова, Р. Ю. Некрасов, С. Ю. Тицкая. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-105-113. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 105–113.

**For citation:** Ovsyannikov, V. E., Kuznetsova, E. M., Nekrasov, R. Yu., & Titskaya, S. Yu. (2024). Development of mathematical model of oscillatory processes at turning of materials with reverse hardness distribution. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 105-113. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-105-113.

## 1. Введение

Основной целью чистовой и финишной обработки деталей в машиностроении является обеспечение требуемых показателей точности и качества поверхностного слоя деталей. Учитывая, что при механической обработке в современном машиностроительном производстве преимущественно используется метод получения требуемой точности, основанный на предварительной настройке станка, остро стоит вопрос об определении таких значений технологических режимов, которые обеспечивают заданные выходные параметры в автоматическом режиме. Одним из

указанных выше выходных параметров является шероховатость поверхности. В промышленной практике решение задачи технологического обеспечения требуемой шероховатости поверхности обычно базируется на результатах предварительных исследований. Наиболее полные исследования в данном аспекте были проведены научной школой под руководством профессора А. Г. Сулова [1]. Однако при обработке материалов со свойствами, отличающимися от стандартных, возникает проблема назначения режимов, так как использование традиционных методик не совсем уместно. В данной ситуации необходимо

иметь представление о механизме формирования микропрофиля. Изучению данного вопроса посвящены работы научных школ под руководством В. Ф. Безъязычного [2], В. Л. Заковоротного [3], а также зарубежных исследователей Y. Altintas [4], T. Özel [5], S. Kalpakjian [6] и др. При этом установлено, что формирование профиля шероховатости поверхности происходит под воздействием как детерминированных факторов, так и случайных процессов. Исследование особенностей формирования производилось в работах А. Г. Сулова [7], В. Ф. Безъязычного [8], М. М. Радкевича [9], а также G. Saindane [10], M. Sortino [11] и др. Данные исследования показывают, что шероховатость обработанных поверхностей – это сложный объект, который формируется под влиянием большого количества факторов. Часть из этих факторов носит систематический, а часть – случайный характер. Причем важные результаты были получены в работах авторов [12, 13], а также в трудах научных школ И. В. Дунина-Барковского [14] и Н. М. Бобровского [15], которые показывают, что при чистовой обработке материалов на основе лезвийной обработки решающий вклад в формирование текстуры профиля шероховатости поверхности вносят вибрации. Таким образом, исследование вибраций при токарной обработке дает возможность предварительной оценки условий, обеспечивающих гарантированное формирование требуемых параметров качества поверхностного слоя, что особенно актуально при проектировании операций обработки материалов с неизученными аспектами в части обрабатываемости.

Цель настоящего исследования: разработка математической модели, которая дает возможность прогнозировать вибрационные процессы при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать математический аппарат для реализации заявленной модели;
- определить зависимости для вычисления входных параметров модели;
- провести экспериментальную проверку результатов.

## 2. Материалы и методы

В данной работе моделирование колебательных процессов при обработке материалов с обратным распределением твердости производилось на основе определения амплитудно-частотных характеристик с использованием интеграла Дюамеля [16]. Расчетная схема приведена на рис. 1.

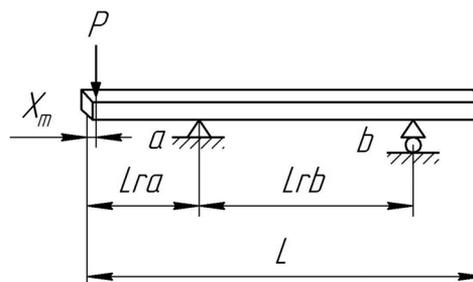


Рис. 1. Расчетная схема модели колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости  
Fig. 1. Calculation scheme of the model of oscillatory processes in turning of materials with inverse hardness distribution

Для того чтобы определить амплитудные значения перемещений вершины резца, необходимо вычислить изгибающие моменты по следующим формулам [17]:

$$M(F, R_A, R_B, x) = R_A(x - L_{Ra}) \cdot (x > L_{Ra}) + R_B \cdot (x - L_{Rb}) \cdot (x > L_{Rb}) - F(x - x_m) \cdot (x > x_m), \quad (1)$$

$$M1(R_A, R_B, xx, x) = R_A(x - L_{Ra}) \cdot (x > L_{Ra}) + R_B \cdot (x - L_{Rb}) \cdot (x > L_{Rb}) - 1(x - xx) \cdot (x > xx), \quad (2)$$

где  $F$  – действующая сила (в нашем случае сила резания);

$L$  – величина, характеризующая расположение опор резца (индексы соответствуют 1 и 2 точке опоры);

$x$  – текущее положение точки расчета;

$x_m$  – точка приложения действующего усилия;

$R$  – опорные реакции.

Зная значения внутренних силовых факторов (изгибающих моментов), можем определить значение деформации консольного участка рез-

ца (соответствующего вершине) на основании вычисления интеграла Отто Мора [17]:

$$\Delta(F) = \int_0^L \frac{M(F, R_A(F), R_B(F), x) \cdot M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)}{EJ} dx, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала державки резца, МПа;

$J$  – момент инерции державки, мм<sup>4</sup>;

$d$  – размер поперечного сечения державки, мм.

Зная величину деформаций, имеем возможность определить расчетным методом жесткость державки резца  $k$  и коэффициент приведения массы  $k_{пр}$  [17]:

$$k = \frac{1}{\int_0^L \frac{M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)^2}{EJ} dx}, \quad (4)$$

$$k_{пр} = \frac{\rho}{m_0 \Delta(F)^2} \cdot \int_0^L A(X) \Delta_x(X)^2 dx, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность материала державки резца, кг/мм<sup>3</sup>;

$A$  – амплитуда собственных колебаний резца в расчетном сечении;

$d$  – размер поперечного сечения державки, мм.

После вычисления параметров по формулам (4) и (5) можно определить амплитуду  $A$  и частоту собственных колебаний  $\omega$  для резца при токарной обработке [17]:

$$A = \sqrt{u_0^2 + \frac{(v_0 + hu_0)^2}{\omega^2}}, \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m + k_{пр} m_0}}, \quad (7)$$

где  $u_0$  – начальное положение расчетного сечения, мм;

$v_0$  – начальная скорость, мм/с;

$h$  – коэффициент затухания колебаний.

Учет того, что колебания являются затухающими, производится посредством коэффициента  $h$ .

В разрабатываемой модели необходимо учесть тот факт, что при обработке материалов

с обратным распределением твердости образуется элементная стружка, что в свою очередь порождает периодический характер действия возмущающей силы. Это обстоятельство можно учесть посредством использования интеграла Дюамеля для вычисления внешней нагрузки на резец [17]:

$$u(F, t) = \frac{1}{m \cdot \omega} \cdot \int_0^t F(\tau) \cdot e^{-h(t-\tau)} \cdot \sin(\omega \cdot (t - \tau)) d\tau, \quad (8)$$

где  $\tau$  – временная задержка, с;

$t$  – параметр времени, с;

$e$  – экспоненциальная функция.

В выражении (8) переменная  $F$  соответствует силе резания. Для нашего случая удобнее всего использовать теоретические зависимости для определения усилия резания, которые были получены в работах Ю. А. Розенберга [18], так как данный подход позволяет учитывать влияние на характер стружкообразования усилия резания посредством коэффициента усадки стружки  $\zeta$ . Выражение для определения силы резания с учетом коэффициента усадки стружки имеет вид [18]:

$$Pz = Cpp \cdot S \cdot t + Czp \cdot l_{xy}, \quad (9)$$

где  $S$  – продольная подача, мм/об;

$t$  – глубина резания, мм;

$Cpp = \tau \cdot (\xi + 1)$  – удельная сила на передней поверхности резца;

$\tau$  – действующее касательное напряжение, МПа;

$$l_{xy} = \frac{t - r \cdot (1 - \cos(\varphi))}{\sin(\varphi)} + \varphi \cdot r + \frac{S}{2} - \text{ суммарная}$$

длина контакта стружки с поверхностью инструмента, мм;

$\varphi$  – главный угол в плане инструмента;

$Czp = 1.5 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot \rho + \mu_1 \cdot \sigma_t \cdot hz$  – удельная сила на задней поверхности резца, Н/мм;

$\rho$  – радиус закругления режущей кромки;

$\mu_1$  – коэффициент трения в зоне контакта стружки и резца, мм;

$hz$  – износ инструмента по задней поверхности, мм.

Величина коэффициента трения зависит от свойств материала заготовки и может быть определена по следующей расчетной зависимости [18]:

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_b}}{8 - \frac{\sigma_T}{\sigma_b}}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

$\sigma_b$  – предел прочности обрабатываемого материала, МПа.

Значения касательных напряжений также зависят от пластических свойств обрабатываемого материала [18]:

$$\tau = 0.7 \cdot \sigma_b \cdot (1 + \delta), \quad (11)$$

где  $\delta$  – относительное удлинение.

Частота изменения силы резания может быть определена по следующей расчетной зависимости [18]:

$$v = T^{-1} = 2V \sin \varphi (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)) / r, \quad (12)$$

где  $r$  – радиус закругления вершины резца;

$\gamma$  – главный угол в плане;

$V$  – скорость резания, м/мин.

Аналогичным образом определяются и другие составляющие силы резания.

Экспериментальные исследования проводились на токарном станке марки 16К20. Был использован токарный инструмент со сменными многогранными пластинами. Сечение державки резца 25 × 25 мм. Назначение режимов резания производилось на основе использования известных технологических рекомендаций [18]. В качестве обрабатываемого материала использовался пруток из серого чугуна марки СЧ20 по ГОСТ 1412-85<sup>3</sup>. На поверхности образцов из серого

чугуна был сформирован упрочненный слой посредством термодиффузионного поверхностного легирования нагревом в контакте со смесью оксидом молибдена и хрома. После насыщения поверхности легирующими элементами образцы подвергались закалке.

Также производилась регистрация и запись виброакустического сигнала с использованием датчика-акселерометра и регистрирующей аппаратуры Zetlab [19]. Записанный сигнал подвергался обработке: строилась огибающая сигнала и затем определялась амплитуда перемещений резца с целью провести верификацию значений амплитуды и частоты колебаний, которые получены опытным путем.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведен пример расчета амплитуды вершины резца при затухающих колебаниях, который был получен с использованием математической модели на основе вычисления характеристик по формулам (1)–(9). Переменная  $u$  обозначает положение расчетной точки,  $N$  – номер расчетной точки. Входные данные: толщина упрочненного слоя 3 мм, толщина ферритной каймы 0.5 мм, глубина резания 0.75 мм, скорость резания 180 м/мин, подача 0.1 мм/об.

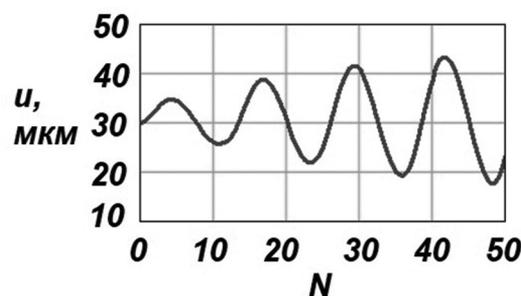


Рис. 2. Пример расчета амплитуды вершины при затухающих колебаниях  
Fig. 2. Example of calculating the peak amplitude for damped oscillations

<sup>3</sup> ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки = Flake graphite iron for castings. Grades : межгосударственный стандарт : утвержден постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 сентября 1985 г. № 3009 : дата введения 1987-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008656?ysclid=lxec50hoi105250333> (дата обращения: 13.03.2024).

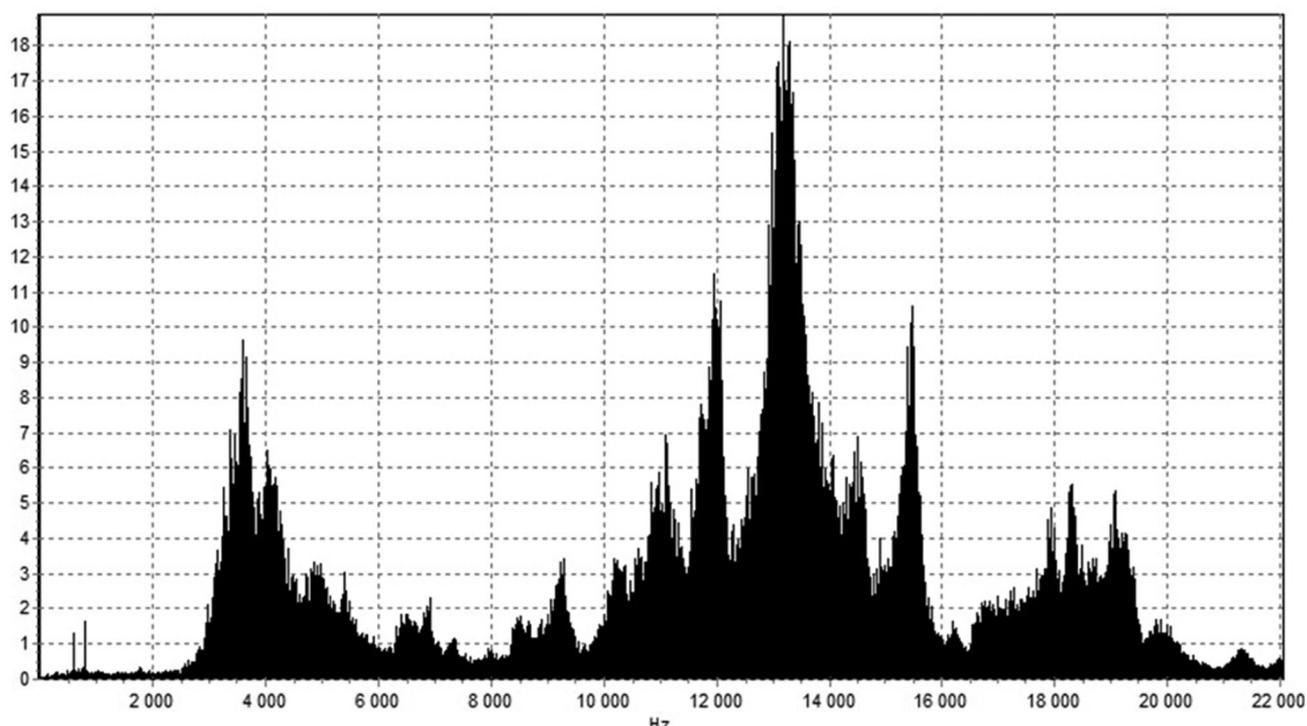


Рис. 3. Спектр вибросигнала  
Fig. 3. Vibration signal spectrum

На рис. 3 приведен пример спектра записанного вибросигнала для этих же условий, а на рис. 4 – график амплитуд перемещений резца (полученный экспериментально), который был получен после обработки экспериментальных данных.

Сравнение полученных результатов теоретического моделирования и экспериментальных исследований, которые приведены на рис. 2–4, показало погрешность по амплитуде 8.5 %, по частоте колебаний 12.3 %. В целом погрешности

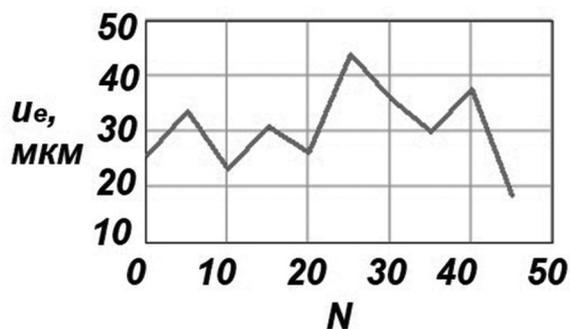


Рис. 4. График амплитуд вершины резца, полученный экспериментально  
Fig. 4. Experimental graph of cutter apex amplitudes

не превышали 15 %, что удовлетворительно при решении задачи предварительной оценки колебательных процессов.

Следует отметить, что достоинством разработанной модели является то, что она учитывает все основные технологические факторы, оказывающие значимое влияние в том числе на шероховатость обработанных поверхностей:

- технологические режимы (глубину, скорость резания, подачу);
- геометрию режущего инструмента (главный угол в плане, передний угол, радиус при вершине резца, радиус закругления режущей кромки);
- характер стружкообразования (величину усадки);
- условия контакта стружки и режущего инструмента (длину контакта по передней и задней поверхности инструмента, коэффициент трения);
- износ режущего инструмента;
- физико-механические свойства обрабатываемого материала.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования позволили сделать ряд выводов:

1. В качестве методологического аппарата для моделирования колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости целесообразно использовать решение уравнений на основе интегралов Мора.
2. Значения усилий резания целесообразно определять с использованием теоретических зависимостей, периодический характер изменения силы резания, связанный с условиями образования стружки, возможно учесть при помощи интеграла Дюамеля.
3. Погрешность, полученная на основе сравнения полученных результатов теоретиче-

ского моделирования и экспериментальных исследований (рис. 2–4), составила 8.5 % по амплитуде и 12.3 % по частоте колебаний. В целом погрешность моделирования не превысила 15 %, что удовлетворительно при решении задачи предварительной оценки колебательных процессов.

В перспективе авторы планируют выявить закономерности между входными параметрами модели (усадка стружки и т. д.) и технологическими режимами, учитывая, что имеет место обратное распределение твердости в упроченном слое, а также провести экспериментальные исследования по выявлению зависимости фаски износа от условий обработки применительно к рассматриваемому обрабатываемому материалу.

#### Библиографический список

1. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва : Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5. – Текст : непосредственный.
2. Безъязычный, В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения : монография / В. Ф. Безъязычный. – Москва : Инфра-инженерия, 2021. – 356 с. – ISBN 978-5-9729-0766-3.
3. Синергетический системный синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей / В. Л. Заковоротный, А. Д. Лукьянов, Д. А. Нгуен, Д. Т. Фам. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2008. – 324 с. – ISBN 5-7890-0278-1. – Текст : непосредственный.
4. Altintas, Yu. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Yu. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka. – DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.048. – Текст : непосредственный // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57, No. 1. – P. 371–374.
5. Özel, T. Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining / T. Özel, E. Zeren. – DOI 10.1007/s00170-006-0720-2. – Текст : непосредственный // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 35, No. 3. – P. 255–267.
6. Kalpakjian, S. Manufacturing Engineering and Technology / S. Kalpakjian, S. Schmid. – Pearson Education, 2009. – 1197 p. – Текст : непосредственный.
7. Суслов, А. Г. Выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхностей деталей машин по ГОСТу 2789-73 : учебное пособие / А. Г. Суслов. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 1983. – 83 с. – Текст : непосредственный.
8. Анализ используемых методик для назначения режимных условий процесса резания / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко, Э. В. Киселев. – Текст : непосредственный // Технология металлов. – 2017. – № 12. – С. 2–10.
9. Черных, Л. Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля при участии вершины резца с радиусом, главной и вспомогательной режущих кромок и подачи / Л. Г. Черных, С. Н. Степанов, М. М. Радкевич. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в машиностроении : Сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апреля 2023 года. – Новополоцк : Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 38–41.
10. Saindane, G. Experimental investigation of vibration damping in boring operation using passive damper / G. Saindane, A. Jakikore, A. Umbarkar. – Текст : непосредственный // International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology. – 2014. – Vol. 2, Issue 3. – ISSN: 2320-8791. – URL: <http://www.ijreat.org/Papers%202014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf> (дата обращения: 13.03.2024).

11. Sortino, M. Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning / M. Sortino, G. Totis, F. Prosperi. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.010. – Текст : непосредственный // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 61. – P. 58–70.
12. Овсянников, В. Е. Исследование геометрических особенностей рельефа шероховатости, волнистости и профиля деталей в поперечном сечении / В. Е. Овсянников, Р. Ю. Некрасов. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, посвященной 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : Сборник статей конференции. В 3-х томах, Тюмень, 16–18 ноября 2023 года. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 144–147.
13. Рогов, Е. Ю. Автоматическое обеспечение точности формы при обработке на станках с ЧПУ / Е. Ю. Рогов, А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников. – Курган : Курганский государственный университет, Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. – 174 с. – ISBN 978-5-4217-0652-6. – Текст : непосредственный.
14. Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 232 с.
15. Исследование текстуры поверхности детали «коленчатый вал», обработанной шлифованием и выглаживанием / И. Н. Бобровский, П. Ф. Зибров, Н. М. Бобровский, Ф. В. Гречников. – Текст : непосредственный // СТИН. – 2020. – № 6. – С. 7–10.
16. Чернов, Ю. Т. К расчету систем виброизоляции с демпферами вязкого трения / Ю. Т. Чернов, М. Зебилина. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 2. – С. 34–38.
17. Бункин, Н. Ф. Стохастические системы в физике и технике / Н. Ф. Бункин, А. Н. Морозов. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-7038-3368-1. – Текст : непосредственный.
18. Розенберг, Ю. А. Резание материалов : учебник / Ю. А. Розенберг ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Курганский гос. ун-т, Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Курган : Курганский гос. ун-т : Тюменский гос. нефтегазовый ун-т, 2007. – 294 с.

#### References

1. Suslov, A. G. (2000). *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 320 p. (In Russian). ISBN 5-217-02976-5.
2. Bez'yazychnyy, V. F. (2021). *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya*. Moscow, Infra-inzheneriya Publ., 356 p. (In Russian). ISBN 978-5-9729-0766-3.
3. Zakovorotnyy, V. L., Luk'yanov, A. D., Nguen, D. A., & Fam, D. T. (2008). *Sinergeticheskiy sistemnyy sintez upravleniya dinamikoy metallovezhushchikh stankov s uchetom evolyutsii svyazey*. Rostov-na-Donu, Don State Technical University Publ., 324 p. (In Russian). ISBN 5-7890-0278-1.
4. Altintas, Yu., Eynian, M., & Onozuka, H. (2008). Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping. *CIRP Annals*, 57(1), pp. 371-374. (In English). DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
5. Özel, T., & Zeren, E. (2007). Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(3), pp. 255-267. (In English). DOI 10.1007/s00170-006-0720-2.
6. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology*. Publ. Pearson Education, 1197 p. (In English).
7. Suslov, A. G. (1983). *Vybor, naznacheniye i tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sherokhovatosti poverkhnostey detaley mashin po GOSTu 2789-73*. Bryansk, Bryansk State Technical University Publ., 83 p. (In Russian).
8. Bezyazychnyy, V. F., Timofeyev, M. V., Fomenko, R. N., & Kiselyov, E. V. (2017). Analysis of used procedures for purpose of regime conditions of cutting process. *Tehnologia Metallov*, (12), pp. 2-10. (In Russian).
9. Chernykh, L. G., Stepanov, S. N., & Radkevich, M. M. (2023). *Raschet sistematicheskoy sostavlyayushchey pervichnogo profilya pri uchastii vershiny reztsa s radiusom, glavnoy i vspomogatel'noy rezhushchikh kromok i podachi*. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 55-letiyu Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoy*, Novopolotsk, April, 18-19, 2023. Novopolotsk, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk Publ., pp. 38-41. (In Russian).

10. Saindane, G., Jakikore, A., & Umbarkar, A. (2014). Experimental investigation of vibration damping in boring operation using passive damper. *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 2(3). (In English). ISSN: 2320–8791. Available at: <http://www.ijreat.org/Papers%202014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf> (accessed 13.03.2024).
11. Sortino, M., Totis, G., & Prospero, F. (2012). Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 61, pp. 58-70. (In English). DOI 10.1016/j.ijmactools.2012.05.010.
12. Ovsyannikov, V. E., & Nekrasov, R. Yu. (2024). Issledovanie geometricheskikh osobennostey rel'efa sherokhovatosti, volnistosti i profilya detaley v poperechnom sechenii. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. D.I. Mendeleeva, posvyashchenoy 15-letiyu Instituta promyshlennykh tekhnologiy i inzhiniringa: Sbornik statey konferentsii. V 3-kh tomakh*, Tyumen, November, 16–18 2023. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., pp. 144-147. (In Russian).
13. Rogov, E. Yu., Ostapchuk, A. K., & Ovsyannikov, V. E. (2023). *Avtomaticheskoe obespechenie tochnosti formy pri obrabotke na stankakh s ChPU*. Kurgan, Kurgan State University, & Ural State University of Railway Transport Publ., 174 p. (In Russian). ISBN 978-5-4217-0652-6.
14. Dunin-Barkovskiy, I. V., & Kartashova, A. N. (1978). *Izmereniya i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 232 p. (In Russian).
15. Bobrovskiy, I. N., Zibrov, P. F., Bobrovskiy, N. M., & Grechnikov, F. V. (2020). Issledovanie tekstury poverkhnosti detali "kolenchatyy val", obrabotannoy shlifovaniem i vyglazhivaniem. *STIN*, (6), pp. 7-10. (In Russian).
16. Chernov, Yu. T., & Zebilila, M. D. H. (2018). To the calculation of vibration isolation systems with fluid viscous dampers. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*, (2), pp. 34-38. (In Russian).
17. Bunkin, N. F., & Morozov, A. N. (2011). *Stokhasticheskie sistemy v fizike i tekhnike*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 368 p. (In Russian). ISBN: 978-5-7038-3368-1.
18. Rozenberg, Yu. A. (2007). *Rezanie materialov*. Kurgan, Kurgan State University, & Tyumen State Oil and Gas University Publ., 294 p. (In Russian).

#### Сведения об авторах

Овсянников Виктор Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: ovsjannikovve@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-8775-0781

Кузнецова Елена Михайловна, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов, Курганский государственный университет, e-mail: imk@kgsu.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Некрасов Роман Юрьевич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: syncler@mail.ru. ORCID 0000-0001-7594-6114

Тицкая Снежана Юрьевна, ассистент-стажер кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: titskajasj@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-4048-0802

#### Information about the authors

Viktor E. Ovsyannikov, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: ovsjannikovve@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-8775-0781

Elena M. Kuznetsova, Senior Lecturer at the Department of Automation of Production Processes, Kurgan State University, e-mail: imk@kgsu.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Roman Yu. Nekrasov, Cand. Sc. in Engineering, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: syncler@mail.ru. ORCID 0000-0001-7594-6114

Snezhana Yu. Titskaja, Intern-Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: titskajasj@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-4048-0802