

## Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.7.01

doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-10-17

### МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЯ СРЕЗАЕМЫХ СЛОЕВ ФРЕЗОЙ-ПРОТЯЖКОЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШЕЕК ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ ВАЛОВ

Вадим Васильевич Куц<sup>1✉</sup>, Евгений Владиславович Смоленцев<sup>2</sup>, Юлия Андреевна Мальнева<sup>3</sup>, Абдрахаман Бейе<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

<sup>1</sup> kuc-vadim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

<sup>2</sup> smolentsev.rabota@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

<sup>3</sup> yuliyamaximencko2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8051-4631>

<sup>4</sup> drahbeye17@gmail.com

#### Аннотация

Целью исследования является повышение эффективности обработки эксцентриковых шеек валов применением специального инструмента, фрезы-протяжки, где для обработки применяется схема встречного фрезерования и частоты вращения вала и фрезы-протяжки совпадают и инструмент имеет поперечную к оси заготовки подачу.

Задачей, решению которой посвящена статья, является разработка метода расчета геометрических параметров срезаемых зубьями фрезы-протяжки слоев в процессе съема припуска при обработке эксцентриковых шеек валов.

Исследования выполнены с применением геометрической теории проектирования режущих инструментов и методов компьютерного моделирования

Новизна работы заключается в разработке метода расчета геометрических параметров срезаемых зубьями фрезы-протяжки слоев в процессе

съема припуска на основе построения, исследования и учета особенностей пространственной интерференции поверхностей резания образованных режущими кромками инструмента при обработке эксцентриковых шеек валов.

В результате выполненного исследования было установлено, что при не высоких величинах поперечной подачи инструмента (<10 мм/мин) площадь продольного сечения срезаемого слоя изменяется не значительно для разных зубьев фрезы.

Выводы: разработанная методика расчета геометрических параметров срезаемых слоев позволяет выполнить оценку и исследования процесса съема припуска фрезой-протяжкой при обработке эксцентриковых шеек вала в соответствии с предложенным авторами способом обработки.

**Ключевые слова:** фреза-протяжка, эксцентриковый вал, слой; съём, припуск.

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации на 2022-2023 годы. Номер проекта - МК-264.2022.4.

Ссылка для цитирования:

Куц В.В. Метод расчета параметров сечения срезаемых слоев фрезой-протяжкой при обработке шеек эксцентриковых валов / В.В. Куц, В.Е. Смоленцев, Ю.А. Мальнева, А. Бейе // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 07. – С. 10-17. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-10-17.

Original article

Open Access Article

# METHOD FOR CALCULATING THE CROSS-SECTION PARAMETERS OF THE CUT LAYERS WHEN MACHINING THE NECKS OF ECCENTRIC SHAFTS BY A BROACHING CUTTER

Vadim Vasilyevich Kuts<sup>1✉</sup>, Evgeny Vladislavovich Smolentsev<sup>2</sup>, Yulia Andreevna Malneva<sup>3</sup>, AbdraKhaman Beye<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>1</sup> kuc-vadim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

<sup>2</sup> smolentsev.rabota@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8747-588X>

<sup>3</sup> yuliyamaximencko2010@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8051-4631>

<sup>4</sup> drahbeye17@gmail.com

## Abstract

The study objective is to increase the efficiency of machining eccentric shaft necks using a special tool such as a broaching cutter, where up cutting is used for machining and the rotational speeds of the shaft and the broaching cutter coincide and the tool has a feed parallel to the workpiece axis.

The task to which the paper is devoted is the development of a method for calculating the geometric parameters of the layers cut by the teeth of the broaching cutter during the stock removal when machining eccentric shaft necks.

The research is carried out using the geo-metric theory of cutting tools design and computer modeling methods.

The novelty of the work is in the development of a method for calculating the geometric parameters of

the layers cut by the teeth of the broaching cutter during the stock removal based on the construction, study and consideration of the features of spatial interference of the cutting surfaces formed by the cutting edges of the tool when machining eccentric shaft necks.

As a result of the study, it is found that at not high values of the cross-feed of the tool (<10 mm/min), the area of the longitudinal section of the cut layer does not change significantly for different teeth of the cutter.

Conclusions: the developed method for calculating the geometric parameters of the cut layers allows to evaluate and study the the stock removal with a broaching cutter when machining eccentric shaft necks in accordance with the method proposed by the authors.

**Keywords:** broaching cutter, eccentric shaft, layers; stock removal.

**Funding:** the work is supported by a grant of the President of the Russian Federation for 2022-2023. The project number is MK-264.2022.4.

## Reference for citing:

Kutz VV, Smolentsev VE, Malneva YuA, Beye A. Method of calculating the cross-section parameters of the cut layers when machining the necks of eccentric shafts by a broaching cutter. *Transport Engineering*. 2023; 7: 10-17. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-10-17.

## Введение

В настоящее время в промышленности изготавливается и применяется большое количество изделий, в состав которых входят валы, содержащие эксцентриковые шейки, основное назначение которых заключается в преобразовании вращательного движение вала в возвратно-поступательное движение. Существующие технологии обработки эксцентриковых шеек валов предполагают формирование на валу дополнительных технологических баз в виде центровочных отверстий [1-3], ось которых смещена относительно оси вала на величину эксцентриситета и совпадает с осью эксцентриковой шейки, что делает процесс изготовления данных валов

не эффективным, особенно в условиях серийного и массового производства.

С целью решения указанной проблемы в работах [4, 5] рассматривался способ обработки, не требующий формирования на обрабатываемом валу дополнительных технологических баз, где обработка осуществляется дисковыми фрезами, зубья которой расположены на разном удалении от оси фрезы, т.е. фреза имеет конструктивную подачу (рис. 1).

При обработке используется схема встречного фрезерования и частоты вращения вала и фрезы-протяжки совпадают ( $n_v = n_f$ ), и инструмент имеет поперечную к оси заготовки подачу ( $S$ ). Производящая поверхность инструмента имеет специаль-

ную не цилиндрическую форму, уравнение которой приведено в работах [4, 5], что позволяет режущим кромкам инструмента, после съема необходимого припуска, осуществить процесс формообразования эксцентриковой шейки как минимум за один оборот инструмента. Ранее авторами, применительно к рассматриваемой схеме обработки, были выполнены исследования влияния геометрических параметров инструмента (среднего радиуса фрезы и числа зубьев), а также режимов обработки на величину погрешности формообразования обрабатываемых шеек и изменение кинематических углов при режущих кромках инструмента [6-8].

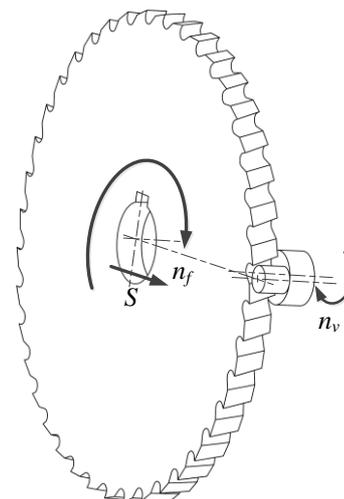


Рис. 1. Обработка эксцентриковых шеек фрезой-протяжкой  
 Fig. 1. Processing of eccentric necks with a broach cutter

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Для оценки и исследования процесса съема припуска, что также является одной из важнейших характеристик процесса обработки эксцентриковых шеек вала фрезой-протяжкой, необходимо построение методов расчета срезаемых слоёв режущими кромками инструмента в процессе резания. Базовые методы подобного расчета, приведенные в работе [9], не позволяют выполнить расчет применительно к рассматриваемой схеме обработки инструментом с конструктивной подачей. В работе [10], были представлены результаты исследования сечения срезаемого слоя в процессе фрезепротягивания РК-

профильных валов, где авторами была установлена его трёх зонная структура, состоящая из участков, формируемых зубьями за текущий оборот инструмента, участков, формируемых зубьями за предыдущий оборот инструмента и участков, формируемых зубьями за текущий оборот инструмента.

Применительно к рассматриваемому способу обработки эксцентриковых шеек вала фрезой-протяжкой с прямолинейным зубом и нулевым углом наклона главной режущей кромки расчет параметров срезаемых слоёв можно выполнить следующим образом (рис. 2).

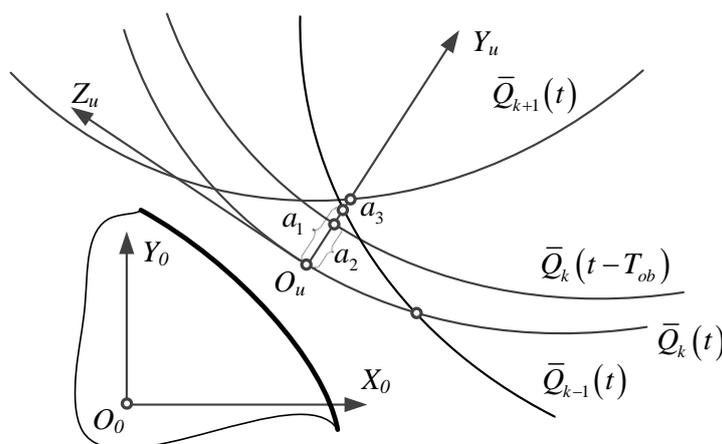


Рис. 2. Схема расчета параметров срезаемых слоёв для фрезы-протяжки при наличии поперечной подачи  
 Fig. 2. Scheme of calculation of the parameters of the cut layers for a broach cutter in the presence of a transverse feed

1. Для рассматриваемого  $k$ -го зуба фрезы, определить точку пересечения поверхности резания, образованной его режущей кромкой и поверхностью резания образованной  $k-1$ -й режущей кромкой, путем решения, относительно моментов времени  $t_k$  и  $t_{k-1}$ , системы уравнений

$$\begin{cases} \bar{i}_0 [\bar{Q}_k(t_k) - \bar{Q}_{k-1}(t_{k-1})] = 0; \\ \bar{j}_0 [\bar{Q}_k(t_k) - \bar{Q}_{k-1}(t_{k-1})] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{i}_0$  и  $\bar{j}_0$  – единичные орты, определяющие положительное направление, соответственно, осей  $OX_0$  и  $OY_0$  системы координат обрабатываемой эксцентриковой шейки вала;  $\bar{Q}_k(t_k)$  и  $\bar{Q}_{k-1}(t_{k-1})$  – векторные уравнения поверхности резания образованные движением  $k$ -м и  $(k-1)$ -м зубом фрезы [4-6];  $t_k$  и  $t_{k-1}$  – моменты времени, соответствующие точке пересечения поверхностей резания  $\bar{Q}_k(t_k)$  и  $\bar{Q}_{k-1}(t_{k-1})$ .

2. При заданном моменте времени  $t \geq t_k$  рассчитать матрицу установки секущей плоскости  $A_u(t)$  по заданным векторам, определяющим положительное направление оси  $OY_u$   $\bar{j}_u = [0, 0, -1, 0]^T$ , оси  $OZ_u$   $\bar{k}_u = \bar{V}_k(t) / |\bar{V}_k(t)|$  и вектора определяющего положение центра системы координат секущей плоскости  $\bar{r}_u = \bar{Q}_k(t)$  [9].

3. Определить время контакта  $k-1$ -й режущей кромки фрезы с секущей плоскостью за текущий оборот заготовки  $t_1 \in [0, T_{ob}]$  путем решения относительно параметра  $t_1$  уравнения

$$\bar{k}_u A_u(t) Q_{k-1}(t_1) = 0. \quad (2)$$

4. Рассчитать толщину срезаемого слоя  $k$ -й режущей кромкой в точке  $\bar{Q}_k(t)$  соответствующей поверхности резания об-

разованной  $k-1$ -й режущей кромки за текущий оборот заготовки

$$a_1 = \bar{i}_u A_u(t) Q_{k-1}(t_1). \quad (3)$$

5. Повторить расчет (шаги 3 и 4) для  $k$ -й режущей кромки фрезы за предыдущий оборот заготовки  $t_2 \in [-T_{ob}, 0]$  и рассчитать толщину срезаемого слоя  $k$ -й режущей кромкой в точке  $\bar{Q}_k(t)$  соответствующей поверхности резания образованной  $k$ -й режущей кромки за предыдущий оборот заготовки

$$a_2 = \bar{i}_u A_u(t) Q_k(t_2). \quad (4)$$

6. Повторить расчет (шаги 3 и 4) для  $k$ -й режущей кромки фрезы за текущий оборот заготовки  $t_3 \in [0, T_{ob}]$  и рассчитать толщину срезаемого слоя  $k$ -й режущей кромкой в точке  $\bar{Q}_{k+1}(t)$  соответствующей поверхности резания образованной  $k+1$ -й режущей кромки за текущий оборот заготовки

$$a_3 = \bar{i}_u A_u(t) Q_{k+1}(t_3). \quad (5)$$

7. Рассчитать толщину срезаемого слоя, для случая, когда все рассчитанные величины  $a_j > 0, j = \bar{1}, \bar{3}$ , как

$$a_k(t) = \min(a_j), j = \bar{1}, \bar{3}, \quad (6)$$

для случая, когда это условие не выполняется, принять, что  $k$ -я режущей кромка фрезы в момент времени  $t$  резать не будет и  $a_k(t) = 0$ .

8. Определить площадь продольного сечения срезаемого слоя  $k$ -й режущей кромкой как

$$S_k = \int_{t_k}^{t_k^{\max}} \left| \frac{\partial \bar{Q}_k(t)}{\partial t} \right| a_k(t) dt \quad (7)$$

или в дискретном виде

$$S_k = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=0}^{\left\lfloor \frac{t_k^{\max} - t_k}{\Delta t} \right\rfloor} \left| \bar{Q}_k(t_k + (j+1)\Delta t) - \bar{Q}_k(t_k + j\Delta t) \right| a_k(t_k + j\Delta t). \quad (8)$$

9. Определить площадь контакта  $k$ -й режущей кромки фрезы с припуском

$$S_k(t) = a_k(t) B. \quad (9)$$

10. Определим объем срезаемого слоя  $k$ -й режущей кромкой фрезы

$$V_k = S_k B. \quad (10)$$

Геометрическое моделирование сечения срезаемого слоя для рассматриваемого инструмента, позволило сделать аналогичные выводы по его структуре (рис. 3), описанные в [10].

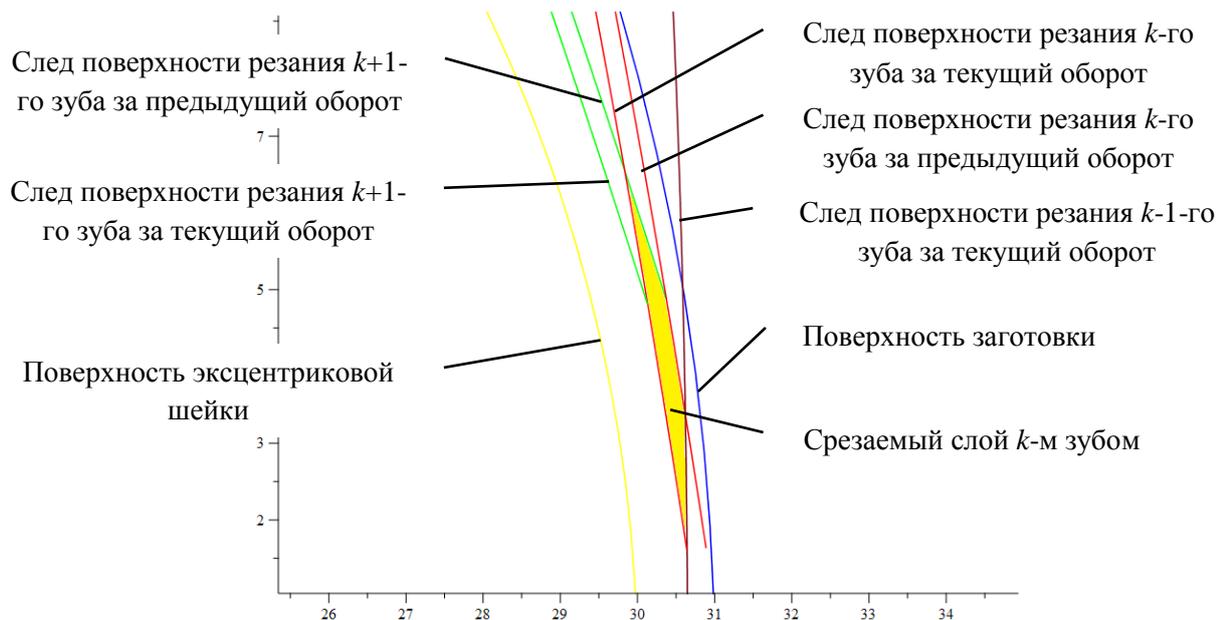


Рис. 3. Структура срезаемого слоя фрезой-протяжкой [11]  
 Fig. 3. Structure of the cut layer by a broach cutter [11]

## Результаты

На рис. 3 показан результат (приведённый в работе [11]) геометрического моделирования сечения срезаемого слоя зубьями фрезы-протяжки с диаметром

равным 400 мм при обработке шейки с эксцентриситетом равным 10 мм соответствующий различным значениям продольной подачи инструмента.

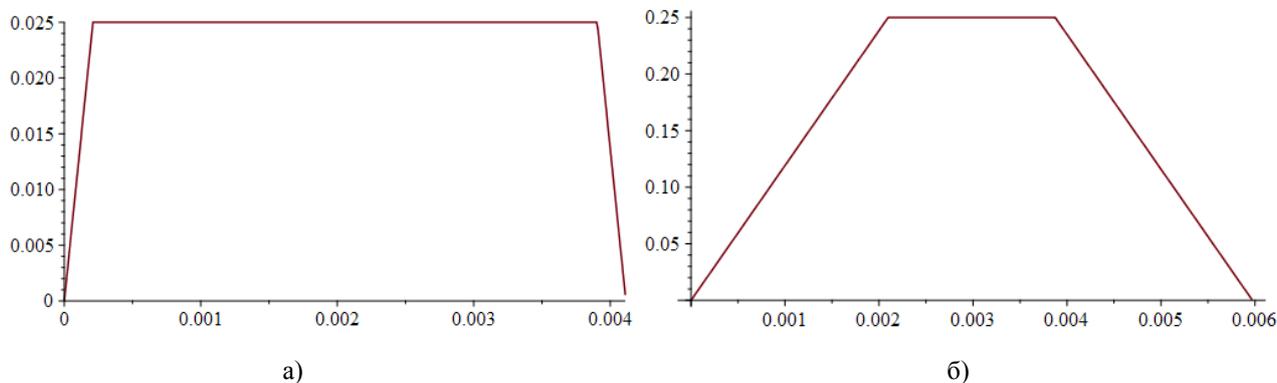


Рис. 4. Изменение величины  $S_k$  ( $\text{мм}^2$ ) от времени (с) при поперечной подаче [11]:

а – 1 мм/мин; б – 10 мм/мин

Fig. 4. Change in value  $S_k$  ( $\text{мм}^2$ ) from time (s) with transverse feed [11]

а – 1 mm/min; б – 10 mm/min

На рис. 5 показано изменение площади продольного сечения срезаемого слоя зубьями инструмента, при различных величинах поперечной подачи, рассчитанное с применением формулы (8), где геометрические параметры инструмента при-

нимались равными: средний диаметр 400 мм; число зубьев 40.

Из рис. 5 следует, что при не высоких величинах поперечной подачи инструмента площадь продольного сечения срезаемого слоя изменяется не значительно для разных зубьев фрезы (рис. 5 а и б).

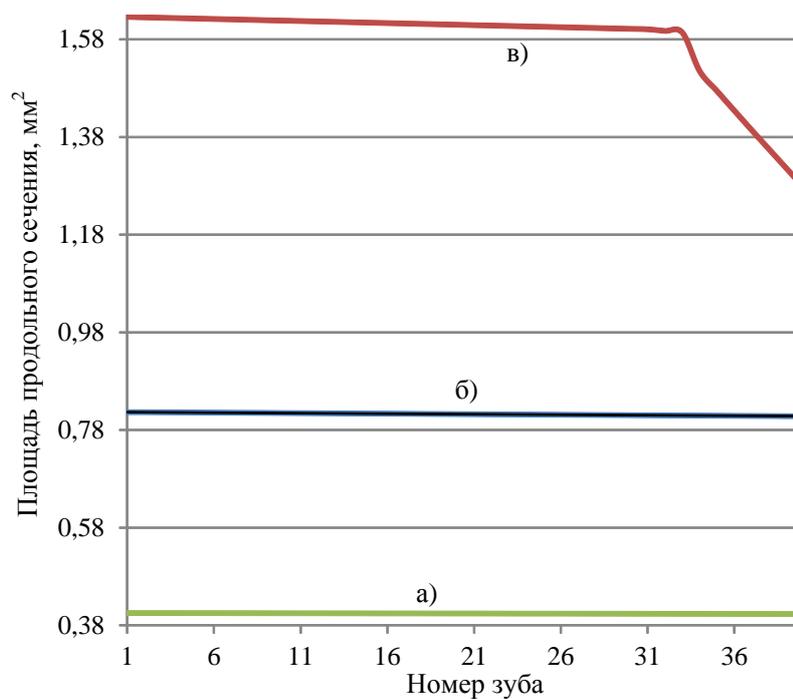


Рис. 5. Изменение площади продольного сечения срезаемого слоя:  
 а –  $S = 5$  мм/мин; б –  $S = 10$  мм/мин; в –  $S = 20$  мм/мин  
 Fig. 5. Change in the area of the longitudinal section of the cut layer:  
 а –  $S = 5$  mm/min; б –  $S = 10$  mm/min; в –  $S = 20$  mm/min

## Заклучение

Разработанная и представленная в статье методика расчета позволяет выполнить, на основе рассчитанных геометрических параметров срезаемых слоёв, оценку и исследование процесса съема припуска

фрезой-протяжкой при обработке эксцентриковых шеек вала в соответствии с предложенным авторами способом обработки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Игнатъев Н.П. Проектирование механизмов: справочно-методическое пособие // Азов. 2015.
- Ткачѳв, А.Г. Технология машиностроения: курс лекций / А.Г. Ткачѳв, И.Н. Шубин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 164 с.
- Виноградов Д.В. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. М.: Издательство «Полиграфия», 2003. – 301 с.ил.
- Куц В.В., Разумов М.С., Мальнева Ю.А. Моделирование производящих поверхностей фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки эксцентриковых валов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 126-131.
- Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Синтез производящих поверхностей фрез-протяжек для обработки валов с равноосным контуром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.
- Определение момента времени контакта режущих кромок фрезы-протяжки с заготовках при обработке шеек эксцентриковых валов / Куц В.В., Мальнева Ю.А., Бейе А., Лыкова Л.Н. // В сборнике: Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем. Сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-технической конференции. Редакция: Е.В. Павлов (отв. редактор). Курск, 2022. С. 108-112
- Исследование изменения погрешности формообразования эксцентриковых шеек валов при фрезе-протягивании / Куц В.В., Мальнева Ю.А., Бейе А., Толмачева Т.А. // В сборнике: За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества. Сборник научных статей 3-й Всероссийской молодежной научной конференции. В 3-х томах. Отв. редактор А.А. Горохов. Курск, 2022. С. 298-302
- Исследование кинематических углов фрезы-протяжки при обработке эксцентриковых валов / Куц В.В., Мальнева Ю.А., Бейе А. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 133-138
- Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами [Текст]: монография / С.И. Лашнев, А.Н. Бори-

сов, С.Г. Емельянов; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. 391 с.

10. Максименко Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. 135 с.

## REFERENCES

1. Ignatyev NP. Designing of mechanisms: reference manual. Azov; 2015.
2. Tkachev AG, Shubin IN. Technology of mechanical engineering: lectures. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University; 2009.
3. Vinogradov DV. High-performance metal cutting. Moscow: Publishing House Polygraphiya; 2003.
4. Kutz VV, Razumov MS, Malneva YuA. Modeling of the producing surfaces of milling cutters with a constructive radial feed for machining eccentric shafts. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2016;8-1:126-131.
5. Kutz VV, Ivakhnenko AG, Storublev ML. Synthesis of producing surfaces of milling cutters for machining shafts with an equiaxial contour. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2012;8:42-48.
6. Kutz VV, Malneva YuA, Beye A, Lykova LN. Determining the moment of contact of the milling cutter edges with the workpieces when machining the necks of eccentric shafts. In: Pavlov EV, editor. Quality management at the stages of the life cycle of technical and technological systems. Collection of Scientific Papers of the 4th All-Russian Scientific and Technical Conference. Kursk; 2022. p. 108-112.
7. Kutz VV, Malneva YuA, Beye A, Tolmacheva TA. Study of changes in the error of forming eccentric

## Информация об авторах:

**Куц Вадим Васильевич** - доцент, д.т.н., тел. +79036399401, профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета, Author-ID-РИНЦ – 362984.

**Смоленцев Евгений Владиславович** - профессор, д.т.н., тел. +79107464075, профессор кафедры «Технология машиностроения» Воронежского гос-

**Kuts Vadim Vasilyevich** - Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment at the Southwest State University; phone: +79036399401, Author-ID-RSCI – 362984.

**Smolentsev Evgeny Vladislavovich** - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Voronezh

11. Исследование сечения срезаемых слоев фрезой-протяжкой при обработке эксцентриковых валов / Куц В.В., Мальнева Ю.А., Бейе А. // В сборнике: Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2022. сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 2022. С. 391-393.

shaft necks during milling. In: Gorokhov AA, editor. The future is ours: the view of young scientists on the innovative development of society. Collection of Scientific Papers of the 3rd All-Russian Youth Scientific Conference. Kursk; 2022. p. 298-302

8. Kutz VV, Malneva YuA, Beye A. Investigation of changes in the kinematic angles of the milling cutter during the processing of eccentric shafts. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2022;18(3):133-138.
9. Lashnev SI, Borisov AN, Yemelyanov SG. Geometric theory of forming surfaces by cutting tools: monograph. Kursk: Kursk State Technical University; 1997.
10. Maksimenko YuA. Development of a method for designing disk cutters with a radial feed for machining shafts with RK- and K-profiles [abstract of dissertation]. [Kursk (RF)]; Southwest State University; 2014.
11. Kutz VV, Malneva YuA, Beye A. Study of the cross section of the cut layers by a milling cutter when machining eccentric shafts. / Kutz V.V., Malneva Yu.A., Beye A. Generation of the future: The View of Young Scientists - 2022. Collection of Scientific Papers of the 11th International Youth Scientific Conference. Kursk; 2022. p. 391-393.

ударственного технического университета. Author-ID-РИНЦ – 438790.

**Мальнева Юлия Андреевна** - доцент, к.т.н., тел. +79513339288, зав. кафедрой, Author-ID-РИНЦ – 650284.

**Абдрахаман Бейе** – аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета.

State Technical University; phone: +79107464075; Author-ID-RSCI –438790.

**Malneva Yulia Andreevna** - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department; phone: +79513339288; Author-ID-RSCI – 650284.

**Beye AbdraKhaman** – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment at the Southwest State University.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 26.04.2023; одобрена после рецензирования 14.06.2023; принята к публикации 27.06.2023. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 26.04.2023; approved after review on 14.06.2023; accepted for publication on 27.06.2023. The reviewer is NagorkinM.N., Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**