

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:  
Журавлев, М.П. Износостойкость торцевых ротационных фрез / М.П. Журавлев, Д.М. Элькинд, Е.Э. Абраменко // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 66–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.08

Please cite this article in English as (Perm Polytech Style):

Zhuravlev M.P., Elkind D.M., Abramenko E.E. Wear resistance of self-propelled rotary milling cutters. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 66-72. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.08

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 26, № 2, 2024**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.08

УДК 621.91.01

**М.П. Журавлев, Д.М. Элькинд, Е.Э. Абраменко**

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Российская Федерация

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТОРЦЕВЫХ РОТАЦИОННЫХ ФРЕЗ**

Одним из решений задачи увеличения износостойкости режущих инструментов является ротационное резание. Особенностью данного процесса является самовращение режущих элементов круглой формы в процессе обработки вокруг своей оси. За счёт этого происходит постоянное обновление режущих кромок такого инструмента. Применительно к фрезерной обработке он получил название ротационной фрезы, а изучение процесса резания при ротационном фрезеровании началось только в 60-х гг. прошлого столетия. Поэтому процесс ещё слабо изучен и требует дополнительных исследований. В работе выполнено сравнительное исследование износа торцевой фрезы с жёстким креплением сменных многогранных пластин (СМП) и торцевой ротационной фрезы с самовращающимися СМП при однозубой и многозубой обработке. Разработана методика проведения экспериментальных исследований на основе применения современного оборудования. Использовали фрезерный станок с ЧПУ. Для измерений – микроскоп с возможностью фотографирования как на станке, так и вне его. Обработывали конструкционную закалённую, инструментальную и нержавеющую стали. На основе полученных экспериментальных данных с помощью метода многофакторного планирования эксперимента определены математические модели стойкости в зависимости от режимов резания, в качестве которых принимались скорость резания  $V$ , которая менялась от 100 до 200 м/мин, подача на зуб  $S_z$  – от 0,2 до 0,5 мм/зуб и глубина резания  $t$  – от 0,2 до 0,5 мм. В качестве критерия износа принимался износ по задней поверхности, равный 0,3 мм. Даны рекомендации относительно использования торцевых ротационных фрез в механообрабатывающем производстве.

**Ключевые слова:** фрезерование, торцевая фреза с механическим креплением СМП, торцевая ротационная фреза, износ по задней поверхности, период стойкости, полный факторный эксперимент (ПФЭ), математическая модель, режимы резания, скорость резания, подача, глубина резания.

**M.P. Zhuravlev, D.M. Elkind, E.E. Abramenko**

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

**WEAR RESISTANCE OF SELF-PROPELLED ROTARY MILLING CUTTERS**

One of the solutions to the problem of increasing the wear resistance of cutting tools is rotary cutting. The peculiarity of this process is self-rotation of circular cutting elements during machining around their axis. Due to this the cutting edge of such a tool is constantly renewed. As applied to milling processing, it is called rotary milling cutter, and the study of the cutting process in rotary milling began only in the 60s of the last century. Therefore, the process is still poorly understood and requires further research. A comparative study of wear of the end mill with rigid fastening of replaceable polyhedral inserts (SMP) and end rotary milling cutter with self-rotating SMP at single- and multi-tooth machining is carried out in this work. The methodology of experimental research was developed on the basis of application of modern equipment. A CNC milling machine was used. For measurements – a microscope with the possibility of photographing both on the machine and outside it. Structural hardened, tool and stainless steels were processed. On the basis of the experimental data obtained using the method of multifactor planning of experiment, mathematical models of durability depending on cutting Structural hardened, tool and stainless steels were processed. On the basis of the experimental data obtained using the method of multifactor planning of the experiment, mathematical models of durability depending on cutting modes were determined, as which were taken cutting speed  $V$ , which varied from 100 to 200 m/min, feed per tooth  $S_z$  varied from 0.2 to 0.5 mm/tooth and depth of cut  $t$  varied from 0.2 to 0.5 mm. The wear criterion was taken as wear on the back surface equal to 0.3 mm. Recommendations concerning the use of end rotary milling cutters in machining production are given.

**Keywords:** milling, face milling cutter, self-propelled rotary milling cutter, flank wear, period of resistance, full factorial experiment, mathematical model, cutting modes, cutting speed, feed, depth.

## Введение

Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания [1]. Применительно к режущему инструменту это означает способность обрабатывать материал, сохраняя при этом свои свойства. В настоящее время, как известно, существуют проблемы при фрезеровании труднообрабатываемых материалов. Низкая теплопроводность, высокая химическая активность и другие факторы влияют на износ фрезерного инструмента [2], и, как следствие, необходим новый поиск путей повышения износостойкости. Существуют различные пути повышения износостойкости режущего инструмента [3; 4]. Одним из решений задачи по увеличению износостойкости режущих инструментов, как указывалось, является процесс ротационного резания. Существуют различные конструкции торцевых ротационных фрез [5–20]. По способу приведения режущей части во вращение торцевые ротационные фрезы можно разделить на:

1. Торцевые ротационные фрезы, в которых режущие пластины принудительно вращаются от отдельного привода.

2. Торцевые ротационные фрезы, в которых режущие пластины вращаются естественным путем под действием сил трения, возникающих между рабочими поверхностями инструмента и обрабатываемым материалом.

Известны отечественные и зарубежные исследования износа торцевых ротационных фрез [21; 23–25]. Тем не менее в настоящее время в доступной литературе крайне мало исследований, посвященных данной категории фрез, что препятствует их распространению на промышленных предприятиях.

### Методика проведения экспериментальных исследований

В настоящей работе выполнено исследование износа по задней поверхности режущих пластин торцевой фрезы с жёстким креплением сменных многогранных пластин (СМП) в сравнении с самовращающимися пластинами торцевой ротационной фрезы в зависимости от режимов резания при однозубом и многозубом фрезеровании. Исследования проводились с использованием полного факторного эксперимента [22].

**Схема фрезерования.** В экспериментах использовалось попутное фрезерование с шириной обработки 60 % диаметра фрезы (рис. 1).

**Обрабатываемые материалы.** Для исследований были выбраны предварительно обработан-

ные заготовки из инструментальной стали Х12МФ твердостью 255 НВ (длина – 120 мм, ширина 30 мм, высота 78 мм), конструкционной стали 40Х твердостью 40 HRC и нержавеющей стали 40Х13.

**Оборудование.** Испытания проводились на лабораторном стенде с использованием универсально-фрезерного станка с числовым программным управлением модели ФС-300. Состояние станка соответствовало нормам точности и жесткости, указанным в паспортных данных.

**Инструмент.** В качестве режущего инструмента применялись торцевая фреза с жёстким креплением СМП фирмы Sant (КНР) и торцевая ротационная фреза фирмы Pokolm (ФРГ).

При исследовании износа при фрезеровании [23] отмечается, что в основном преобладает износ по задней поверхности, поэтому в данной работе измерялся износ по задней поверхности режущих пластин. Для его измерения использовался микроскоп Digital Microscope (КНР).

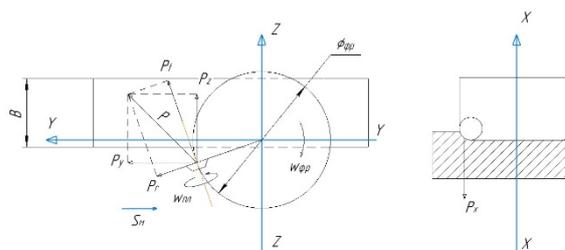


Рис. 1. Схема фрезерования:  $B$  – ширина фрезерования;  $w_{фр}$  – угловая скорость вращения фрезы;  $w_{пл}$  – угловая скорость вращения пластины;  $\phi_{фр}$  – диаметр фрезы;  $S_m$  – минута подача стола;  $X, Y, Z$  – координатные оси;  $P_r$  – радиальная составляющая силы резания;  $P_t$  – тангенциальная составляющая силы резания;  $P_x, P_y, P_z$  – составляющие силы резания по координатным осям;  $P$  – равнодействующая сила резания

Эксперименты проводились следующим образом. Заготовку устанавливали в тисы, делали один проход фрезой, извлекали фрезу из шпинделя станка, измеряли и фотографировали на микроскопе износ по задней поверхности режущей пластины. В качестве критерия износа была выбрана величина, равная 0,3 мм.

### Результаты проведения экспериментов

В результате проведенных исследований были получены фотографии задних поверхностей режущих пластин обоих типов фрез на различных режимах резания.

На рис. 2, 3 проиллюстрированы задние поверхности пластин двух типов фрез при однозубом фрезеровании стали Х12МФ в разные моменты времени обработки. Скорость резания составила 200 м/мин, подача 0,2 мм/зуб, глубина резания 0,5 мм.

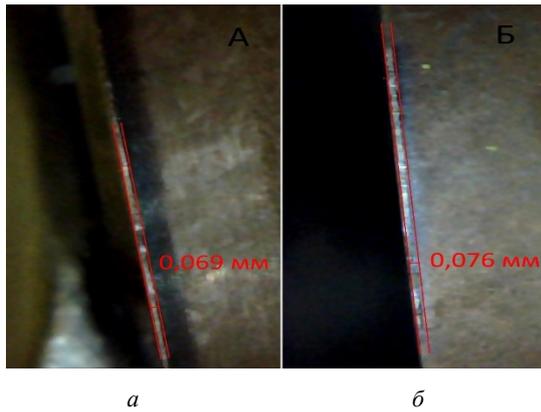


Рис. 2. Износ по задней поверхности режущей пластины: *a* – торцевой ротационной фрезы; *б* – торцевой фрезы с жёстким креплением СМП при однозубом фрезеровании стали Х12МФ и времени обработки 1,88 мин

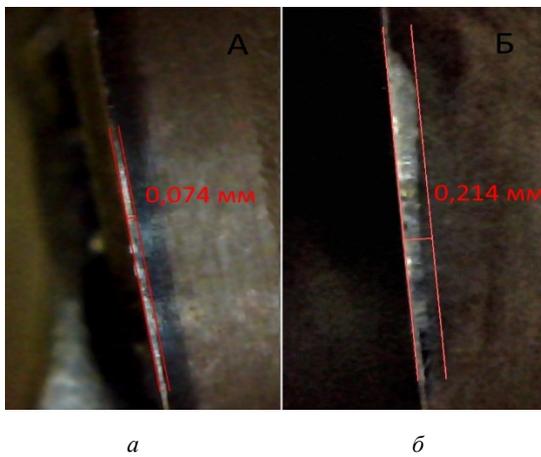


Рис. 3. Износ по задней поверхности: *a* – торцевой ротационной фрезы; *б* – торцевой фрезы с жёстким креплением СМП при однозубом фрезеровании стали Х12МФ и времени обработки 14,14 мин

Были получены сравнительные графики зависимости износа по задней поверхности режущих пластин торцевой ротационной фрезы и торцевой фрезы с жёстким креплением СМП. На рис. 4 представлен график износа по задней поверхности режущей пластины торцевой ротационной фрезы в сравнении с торцевой фрезой с жёстким креплением СМП при однозубом фрезеровании инструментальной стали Х12МФ. Скорость резания составила 200 м/мин, подача на зуб 0,2 мм/зуб, глубина резания 0,5 мм.

На рис. 5 представлен график износа по задней поверхности режущей пластины торцевой ротационной фрезы в сравнении с торцевой фрезой с жёстким креплением СМП при однозубом фрезеровании конструкционной стали 40Х, закалённой до 40 единиц твёрдости по HRC. Скорость резания составила 150 м/мин, подача на зуб 0,1 мм/зуб, глубина резания 0,5 мм.

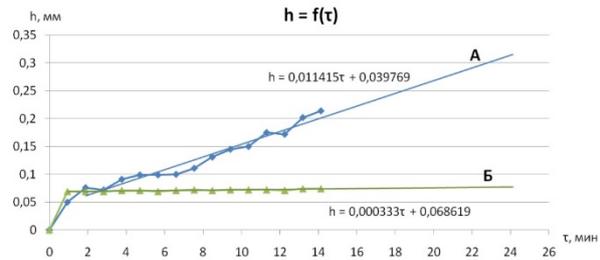


Рис. 4. График зависимости  $h = f(\tau)$  при однозубом фрезеровании стали Х12МФ: А – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой фрезы с жёстким креплением СМП; Б – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой ротационной фрезы

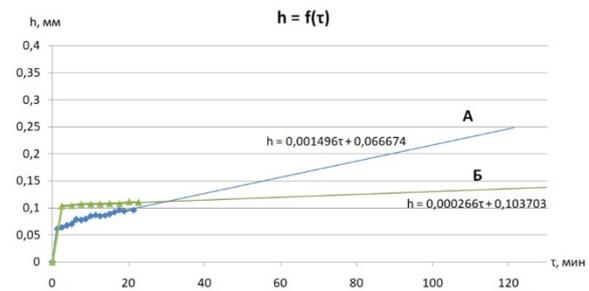


Рис. 5. График зависимости  $h = f(\tau)$  при однозубом фрезеровании стали 40Х твёрдостью 40 HRC: А – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой фрезы с жёстким креплением СМП; Б – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой ротационной фрезы

В результате проведенных экспериментов получены экспериментальные значения периодов стойкости обоих типов фрез при однозубом фрезеровании сталей Х12МФ и 40Х, данные представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Периоды стойкости фрез Sant(T<sub>1</sub>) и Pocolm (T<sub>2</sub>) при фрезеровании стали Х12МФ

| № п/п | V, м/мин | S <sub>z</sub> , мм/зуб | t, мм | T <sub>1</sub> , мин | T <sub>2</sub> , мин | T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub> |
|-------|----------|-------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 1     | 100      | 0,2                     | 0,2   | 304                  | 4545                 | 15                             |
| 2     | 200      | 0,2                     | 0,2   | 36                   | 1587                 | 44,1                           |
| 3     | 100      | 0,5                     | 0,2   | 62                   | 1714                 | 27,6                           |
| 4     | 200      | 0,5                     | 0,2   | 27                   | 415                  | 15,4                           |
| 5     | 100      | 0,2                     | 0,5   | 294                  | 3093                 | 10,5                           |
| 6     | 200      | 0,2                     | 0,5   | 26                   | 901                  | 34,7                           |
| 7     | 100      | 0,5                     | 0,5   | 61                   | 1195                 | 19,6                           |
| 8     | 200      | 0,5                     | 0,5   | 25                   | 87                   | 3,5                            |

Помимо однозубого фрезерования, также проводились эксперименты по многозубому фрезерованию с использованием данных фрез. Испытания осуществлялись на стали 40Х13, скорость резания составила 100 м/мин, подача 0,5 мм/зуб, глубина резания 0,2 мм. На рис. 6 представлен график износа по задней поверхности режущих пластин.

В табл. 3 представлены полученные периоды стойкости для каждой режущей пластины и усред-

нённые значения периодов стойкости для обоих типов фрез.

На рис. 7 показаны два типа стружки, производимые фрезами при многозубом фрезеровании стали 40X13.

Таблица 2

Периоды стойкости торцевой фрезы с жёстким креплением СМП ( $T_1$ ) и торцевой ротационной фрезы ( $T_2$ ) при однозубом фрезеровании стали 40X твёрдостью 40 HRC

| № п/п | $V$ , м/мин | $S_z$ , мм/зуб | $t$ , мм | $T_1$ , мин | $T_2$ , мин | $T_2/T_1$ |
|-------|-------------|----------------|----------|-------------|-------------|-----------|
| 1     | 100         | 0,1            | 0,2      | 696         | 8571        | 12,3      |
| 2     | 150         | 0,1            | 0,2      | 208         | 2586        | 12,4      |
| 3     | 100         | 0,15           | 0,2      | 436         | 3191        | 7,3       |
| 4     | 150         | 0,15           | 0,2      | 155         | 2143        | 13,8      |
| 5     | 100         | 0,1            | 0,5      | 513         | 5882        | 11,5      |
| 6     | 150         | 0,1            | 0,5      | 201         | 1128        | 5,6       |
| 7     | 100         | 0,15           | 0,5      | 383         | 1163        | 3         |
| 8     | 150         | 0,15           | 0,5      | 155         | 620         | 4         |

поверхность. Также следует отметить, что при фрезеровании торцевой ротационной фрезой по мере увеличения длины фрезерования структура стружки изменяется незначительно, так как режущая кромка, участвующая в резании, изменяется попеременно, что снижает температуру в зоне резания и износ инструмента.



Рис. 7. Стружка, производимая при многозубом фрезеровании стали 40X13: а – стружка, полученная при фрезеровании торцевой ротационной фрезой, б – стружка, полученная при фрезеровании торцевой фрезой с жёстким креплением СМП

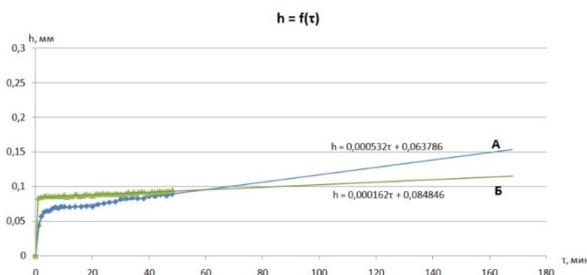


Рис. 6. Графики зависимости  $h = f(\tau)$  при многозубом фрезеровании стали 40X13: А – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой фрезы с механическим креплением СМП; Б – зависимость  $h = f(\tau)$  торцевой ротационной фрезы

Таблица 3

Периоды стойкости торцевой фрезы с жестким креплением СМП ( $T_1, T_2, T_3$ ) торцевой ротационной фрезы ( $T_4, T_5, T_6$ ) при многозубом фрезеровании стали 40X13

| Торцевая фреза с жестким креплением СМП |             |             |                | Торцевая ротационная фреза |             |             |                  | $T_{cp}^*$ /<br>$T_{cp}$ |
|---|-------------|-------------|----------------|----------------------------|-------------|-------------|------------------|--------------------------|
| $T_1$ , мин                             | $T_2$ , мин | $T_3$ , мин | $T_{cp}$ , мин | $T_4$ , мин                | $T_5$ , мин | $T_6$ , мин | $T_{cp}^*$ , мин |                          |
| 564                                     | 604         | 562         | 577            | 1852                       | 1415        | 1587        | 1618             | 2,8                      |

Стружка, производимая торцевой ротационной фрезой, закручивается в большей степени, чем стружка от торцевой фрезы с жёстким креплением СМП, и стремится к спирально завитой форме. Стружка закручивается главным образом потому, что трение инструмента о стружку, возникающее при вращении пластины, тянет стружку в сторону и назад, когда стружка проходит через переднюю

**Определение математических моделей стойкости торцевой фрезы с жёстким креплением СМП и торцевой ротационной фрезы в зависимости от режимов резания.** Полученные экспериментальные данные периодов стойкости обоих типов фрез для разных режимов резания были обработаны с использованием программы для работы с электронными таблицами Microsoft Excel. В результате определены следующие эмпирические зависимости стойкости от режимов резания:

– при однозубом фрезеровании стали X12МФ торцевой фрезой с жёстким креплением СМП (1):

$$T = \frac{e^{1,407}}{V^{(-0,299-2,231 \cdot \ln(S_z))} \cdot S_z^{11,996} \cdot t^{0,124}}; \quad (1)$$

– при однозубом фрезеровании стали X12МФ торцевой ротационной фрезой (2):

$$T = \frac{e^{40,439}}{V^{(7,452+3,405 \cdot \ln(S_z)+1,759 \cdot \ln(S_z) \cdot \ln(t))} \cdot S_z^{(-14,669-8,136 \cdot \ln(t))} \cdot t^{(-13,975+3,113 \cdot \ln(t))}}; \quad (2)$$

– при однозубом фрезеровании стали 40X твёрдостью 40 HRC торцевой фрезой с жестким креплением СМП (3):

$$T = \frac{e^{12,971}}{V^{(1,897-0,539 \cdot \ln(t))} \cdot S_z^{0,81} \cdot t^{2,72}}; \quad (3)$$

– при однозубом фрезеровании стали 40X твёрдостью 40HRC торцевой ротационной фрезой (4):

$$T = \frac{e^{-57,949}}{V^{(-11,807-7,271 \cdot \ln(S_z))} \cdot S_z^{(38,694+8,57 \cdot \ln(t))} \cdot t^{(14,48-2,196 \cdot \ln(t))-1,487 \cdot \ln(S_z)}} \cdot (4)$$

### Заключение

Из анализа фотографий задних поверхностей режущих пластин следует, что у обоих типов фрез наблюдается износ абразивно-механического характера. Износ по задней поверхности режущей пластины торцевой ротационной фрезы характеризуется равномерной полосой вдоль всей режущей кромки, в то время как износ по задней поверхности режущей пластины торцевой фрезы с жёстким креплением СМП неравномерный и локализуется в строго одной зоне. На рис. 8 представлено схематичное изображение износа по задним поверхностям режущих пластин двух типов фрез.

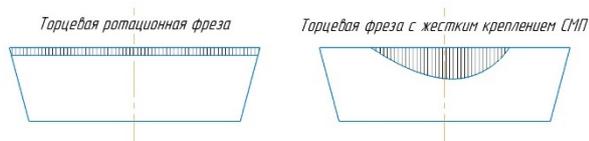


Рис. 8. Схематичное изображение износа режущих пластин двух типов фрез

В результате определён механизм и характер износа по задней поверхности режущей пластины обоих типов фрез в зависимости от режимов резания, а также впервые созданы математические модели износа по задней поверхности в зависимости от режимов резания для ротационных фрез при обработке различных материалов,

Анализируя табл. 1–3, можно сделать вывод, что стойкость торцевой ротационной фрезы на исследуемых режимах резания при однозубом фрезеровании стали Х12МФ выше стойкости торцевой фрезы с жёстким креплением СМП от 3,5 до 44,1 раза, при однозубом фрезеровании стали 40Х твердостью 40 HRC – от 3 до 13,8 раза, при многозубом фрезеровании – выше в 2,8 раза.

На основе полученных значений стойкости торцевые ротационные фрезы можно рекомендовать к обработке труднообрабатываемых материалов.

### Библиографический список

1. Износостойкость [Электронный ресурс]. – URL: <https://dic.academic.ru/-dic.nsf/ruwiki/598586> (дата обращения: 22.09.2023).
2. Виды износа твердосплавных пластин при лезвийной обработке и методы борьбы с ними / Д.С. Реченко, А.А. Ежов, Д.Г. Балова, И.А. Царенко, А.Г. Кисель, Р.У. Каменов // Омский научный вестник – 2015 – № 3 – С. 83–87.
3. Зубков, Н.Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н.Н. Зубков // Наука и образование. – 2013. – № 2 – С. 75–100.
4. Максимов, Е.И. Износостойкие покрытия и их применение в повышении эксплуатационных характеристик режущего инструмента / Е.И. Максимов // Технология машиностроения и материалы. – 2014. – № 4 – С. 27–34.

5. Коновалов, Е.Г. Ротационные режущие инструменты / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Л., 1969. – 39 с.
6. Пат. 261873 СССР. Фреза с круглыми самовращающимися резами / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко; Физико-технический институт АН Белорусской ССР. – № 1283643/25-8; Заяв. 22.11.1968; Опубл. 13.01.1970; Бюл. №5.
7. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Минск: Наука и техника, 1972. – 272 с.
8. Пат. US 4893967, Cutting tool arrangement / Leonard A. Briese, Rancho Palos Verdes California. – Заявка: 313757/22.02.1989; Опубл. 16.01.1990.
9. Патент US 4378184, Rotary tool cutting insert / Leonard A. Briese, Rancho Palos Verdes, California. – Заявл. 215937/12.12.1980; Опубл. 29.03.1983.
10. Пат. US 5478175, Cutting insert assembly / Rolf H. Kraemer, Greenleaf Corporation. Заявка 111163/24.08.1993; Опубл. 26.12.1995.
11. Пат. US 2020/0016664 A1, Rotary metal-cutting insert and mounting cartridge therefor / William J. Endres, Douglas J. Woodruff [et al.], Rotary Technologies Corporation, El Segundo. – №16/563,767; Заявл.: 06.09.2019; Опубл. 16.01.2020.
12. Пат. US 9550240 B2, Round wiper tooth and face milling incorporating the same / William J. Endres, Douglas J. Woodruff [et al.], Rotary Technologies Corporation, Rancho Domingues. – № 14/242,680; Заявл. 1.04.2014; Опубл. 24.01.2017.
13. Пат. CN101264533A, Self-propelled type end cutter with smoothing blade / Pang Xuehui, Zhang Xiaoyan, North University of China. – № 200810054911.7; Заявл. 30.04.2008; Опубл. 17.09.2008.
14. Пат. CN213496767U, Self-rotating blade milling cutter head / Chen Guofeng Wang Dan, Wuxi Yunhang Precision Tools Co Ltd. – № 202022618458.7; Заявл. 13.11.2020; Опубл. 22.06.2021.
15. Пат. CN2558487Y, Self-rolled cutting end milling cutter / Li Dewen, Chang Xing, Pang Xuehui, Ye Hongtao, Pang Jiyou, Cao Zuan, Shenyang Liming Aero Engine Group Co Ltd. – № 02210332.5; Заявл. 02.07.2003; Опубл. 19.04.2002.
16. Пат. RU 2489233 C2. Фрезерный инструмент для механической обработки заготовок со снятием стружки / Франц-Йозеф Покольм. – № 2010142366/02; Заяв. 27.04.2012; Опубл. 10.08.2013; Бюл. №22.
17. Пат. DE 202021102340U1, Gebrauchsmusterschrift / Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. – № 202021102340.6; Заявл. 30.04.2021; Опубл. 10.06.2021.
18. Пат. DE 202008013759U1, Gebrauchsmusterschrift / Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. – № 202208013759.4; Заявл. 05.11.2008; Опубл. 17.12.2009.
19. Пат. EP 1943098B1, Fras- und/oder drehwerkzeug / Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. – № 06818035.5; Заявл. 26.10.2006; Опубл. 16.07.2008.
20. Пат. DE 202008008863U1, Gebrauchsmusterschrift / Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. – № 202008008863.1; Заявл. 08.10.2008; Опубл. 03.12.2009.
21. Пат. DE 202008000027U1, Gebrauchsmusterschrift / Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. – № 202008000027.0; Заявл. 18.03.2008; Опубл. 04.06.2009.

22. Tao, Chen. Comparative study on the cutting performance of self-propelled rotary cutters and indexable cutters in milling TC titanium alloy / Tao Chen, Yongsheng Wang, Weijie, Rui Li // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, China. – 2020.

23. Журавлев, М.П. Исследование и испытание технологических систем: учеб. пособие / М.П. Журавлев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 84 с.

24. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.

25. Development of a SPRT milling technology for Ni-based super alloy / Norizaki Suzuki, Yuya Kato, Eiji Shamoto, Yukio Naiki, Yuji Takagi // 2018 International Symposium of Flexible Automation. – Kanazawa, 2018.

26. Lu, Yujiang. Research on Cutting Performance in High-speed Milling of TC11 titanium alloy using self-propelled rotary milling cutters / Lu Yujiang, Chen Tao; School of Mechanical and Power Engineering. – Harbin University of Science and Technology. – Harbin, 2021.

### References

1. Iznosostoikost' [Wear resistance]. URL: <https://dic.academic.ru/-dic.nsf/ruwiki/598586> (data available 22.09.2023)

2. Rechenko D.S. Vidy iznosa tverdosplavnykh plastin pri lezviinoi obrabotke i metody bor'by s nimi [Types of wear of carbide inserts during blade machining and methods of their control]. Rechenko D.S., Ezhov A.A., Balova D.G., Tsarenko I.A., Kisel' A.G., Kamenov R.U. Omskii nauchnyi vestnik, 2015, no. 3, pp. 83-87.

3. Zubkov N.N. Instrumental'nye materialy dlia izgotovleniia lezviinykh instrumentov [Tooling materials for the manufacture of lez-vius tools]. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 2, pp. 75 – 100.

4. Maksimov E.I. Iznosostoikie pokrytiia i ikh primenenie v povyshenii ekspluatatsionnykh kharakteristik rezhushchego instrumenta [Wear-resistant coatings and their application in improving performance characteristics of cutting tools]. *Tekhnologiya mashinostroeniia i materialy*, 2014, no. 4, pp. 27-34.

5. Konovalov E.G. Rotatsionnye rezhushchie instrument [Rotary cutting tools]. E.G. Konovalov, V.A. Sidorenko, A.V. Sous'. Leningrad, 1969, 39 p.

6. Konovalov E.G., Sidorenko V.A. Freza s kruglymi samovrashchhaiushchimisia reztzami [Cutter with self-rotating circular cutters]. Patent no. 1283643/25-8 (1970).

7. Konovalov E.G. Progressivnye skhemy rotatsionnogo rezaniia metallov [Progressive schemes of rotary cutting of metals]. E.G. Konovalov, V.A. Sidorenko, A.V. Sous'. Minsk: Nauka i tekhnika, 1972, 272 p.

8. Leonard A. Briese. Rancho Palos Verdes a. Cutting tool arrangement. Patent Californi US 4893967 (1990).

9. Leonard A. Briese, Rancho Palos Verdes. Rotary tool cutting insert. Patent California US 4378184 (1983).

10. Rolf H. Kraemer. Cutting insert assembly. Patent Greenleaf Corporation US 5478175 (1995).

11. William J. Endres, Douglas J. Woodruff et al. Rotary metal-cutting insert and mounting cartridge therefor.

Rotary Technologies Corporation. Patent El Segundo no. 16/563,767 US (2020).

12. William J. Endres, Douglas J. Woodruff et al. Round wiper tooth and face milling incorporating the same. Patent Rotary Technologies Corporation, Rancho Domingues US 9550240 B2 no.14/242,680 (2017).

13. Pang Xuehui, Zhang Xiaoyan. Self-propelled type end cutter with smoothing blade. Patent North University of China CN101264533A no. 200810054911.7 (2008).

14. Chen Guofeng Wang Dan, Wuxi Yunhang. Self-rotating blade milling cutter head. Patent Precision Tools Co Ltd CN213496767U no. 202022618458.7 (2021).

15. Li Dewen, Chang Xing, Pang Xuehui, Ye Hongtao, Pang Jiyou, Cao Zuan, Shenyang Liming. Self-rolled cutting end milling cutter. Patent Aero Engine Group Co Ltd. CN2558487Y no. 02210332.5 (2002).

16. Frants-Iozef Pokol'm. Frezernyi instrument dlia mekhanicheskoi obrabotki zagotovok so sniatiem struzhki. Patent RU 2489233 C2 no. 2010142366/02 (2012).

17. Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. Gebrauchsmusterschrift. Patent DE 202021102340U1 no. 202021102340.6 (2021).

18. Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. Gebrauchsmusterschrift. Patent DE 202008013759U1 no. 202208013759.4 (2009).

19. Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG Fräs- und/oder drehwerkzeug. Harsewinkel. Patent EP 1943098B1 no. 06818035.5 (2008).

20. Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. Gebrauchsmusterschrift. Patent DE 202008008863U1 no. 202008008863.1 (2009).

21. Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, Harsewinkel. Gebrauchsmusterschrift. Patent DE 202008000027U1 no. 202008000027.0 (2009).

22. Tao Chen, Yongsheng Wang, Weijie, Rui Li. Comparative study on the cutting performance of self-propelled rotary cutters and indexable cutters in milling TC titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, China, 2020.

23. Zhuravlev M.P. Issledovanie i ispytanie tekhnologicheskikh sistem: ucheb. Posobie [Research and testing of technological systems]. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2017, no. 84, p. 23.

24. Loladze T.N. Prochnost' i iznosostoikost' rezhushchego instrumenta [Strength and wear resistance of cutting tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 320 p.

25. Norikazu Suzuki, Yuya Kato, Eiji Shamoto, Yukio Naiki, Yuji Takagi. Development of a SPRT milling technology for Ni-based super alloy. *International Symposium of Flexible Automation, Kanazawa*, 2018.

26. Lu Yujiang, Chen Tao. Research on Cutting Performance in High-speed Milling of TC11 titanium alloy using self-propelled rotary milling cutters. *School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin*, 2021.

Поступила: 21.12.2023

Одобрена: 14.04.2024

Принята к публикации: 13.05.2024

### Об авторах

**Журавлев Михаил Петрович** (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Институт новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: mzhuravlev12@gmail.com).

**Элькинд Дмитрий Михайлович** (Екатеринбург, Российская Федерация) – преподаватель кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Институт новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: D.M.Elkind@urfu.ru).

**Абраменко Евгений Эдуардович** (Екатеринбург, Российская Федерация) – магистрант кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Институт новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: Evgeny.Abramenko@urfu.me).

### About the authors

**Michail P. Zhuravlev** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and

Tools, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: mzhuravlev12@gmail.com).

**Dmitry M. Elkind** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Teacher, Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: D.M.Elkind@urfu.ru).

**Evgeny E. Abramenko** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Undergraduate, Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, e-mail: Evgeny.Abramenko@urfu.me).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Благодарность.** Авторы благодарны аспиранту кафедры УрФУ «Технологии машиностроения, станков и инструментов» Мошкову Кириллу Сергеевичу за помощь в верстке материалов для данной публикации.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.