

УДК 621.9

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-570-588

**Для цитирования:** Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложнопрофильным инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов / М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 570–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-570-588.

**For citation:** Vakulin M. S., Gordeev Yu. I., Yasinsky V. B. et al. [Features of processes of high-speed milling with a complex profile tool in the processing of aluminum alloys and composite materials]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 570–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-570-588.

## Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложнопрофильным инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов

М. С. Вакулин<sup>1,2</sup>, Ю. И. Гордеев<sup>2</sup>, В. Б. Ясинский<sup>2</sup>,  
А. С. Бинчуров<sup>2,3\*</sup>, П. В. Тимошев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ») Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: mexanixs@mail.ru

*Комплексными расчетными и экспериментальными исследованиями обоснованы рациональные режимы фрезоточения сложноконтурных равноосных поверхностей с высокой точностью формы, размеров и параметрами шероховатости. В качестве материала заготовки для изготовления новых оригинальных конструкций инструментов использовались прутки из наноструктурированного твердосплавного композита (полученные экструзией бимодальных порошковых смесей WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с повышенными показателями по прочности, трещиностойкости и термостойкости. Совокупность этих свойств является необходимой предпосылкой для эффективной работы разработанных конструкций многолезвийных фрез на высоких скоростях резания и в условиях переменных циклических нагрузок. Более сложная кинематика совместного вращательного движения инструмента при фрезоточении диктует необходимость новых подходов при назначении рациональных режимов резания. Для получения достоверных расчетных формул предварительно были проведены численные эксперименты, в том числе симуляция процесса обработки с использованием интегрированной среды разработки VisualStudio, в которой поддерживается технология WindowsForms. Возможность отображения графических 3D-объектов была реализована за счет дополнительного программного продукта в виде геометрического ядра Open CASCADE. Численные эксперименты с использованием программных продуктов MathCAD и основанные на аналитических положениях, предложенных в работе, позволили оценить влияние режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента (профиля и количества зубьев), кинематики относительного перемещения в системе «инструмент – деталь» на форму поверхностей и параметры контура (шероховатости, получаемые при фрезоточении. Разработана методика, алгоритм и программа автоматизированного расчета режимов резания, которая верифицирована при проведении натурных экспериментов и изготовлении сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов для приводов изделий аэрокосмической отрасли (в форме РК-профиля и деталей цевочной передачи механизмов наведения). При этом на основании 3D-модели изделий создавались управляющие программы для станков с ЧПУ с использованием MasterCAM. Практическая значимость и технико-экономическая эффективность предложенных конструкторско-технологических решений для аэрокосмической отрасли заключается в повышении производительности и снижении трудоемкости обработки*

(в сравнении с базовыми вариантами) за счет использования новых многолезвийных твердосплавных инструментов для высокоскоростного фрезерования (в том числе при обработке композиционных материалов).

*Ключевые слова:* фрезерование, твердосплавный режущий инструмент, математическое моделирование, сложнопрофильные поверхности, алюминиевые и титановые сплавы, композиты, качество обработки.

## **Features of processes of high-speed milling with a complex profile tool in the processing of aluminum alloys and composite materials**

M. S. Vakulin<sup>1, 2</sup>, Yu. I. Gordeev<sup>2</sup>, V. B. Yasinsky<sup>2</sup>, A. S. Binchurov<sup>2, 3\*</sup>, P. V. Timoshev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems" (RESHETNEV JSC)  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail:mexanixs@mail.ru

*Complex computational and experimental studies substantiate rational modes of milling of complex contour equiaxed surfaces with high accuracy of shape, dimensions and roughness parameters. Bars made of nanostructured carbide composite (produced by extrusion of WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bimodal powder mixtures) with increased strength, crack resistance and heat resistance were used as a workpiece material for the manufacture of new original tool designs. The combination of these properties is a necessary prerequisite for the effective operation of the developed designs of multi-blade cutters at high cutting speeds and under conditions of variable cyclic loads. A more complex kinematics of the joint rotational movement of the tool during milling dictates the need for new approaches when assigning rational cutting modes. To obtain reliable calculation formulas, numerical experiments were previously carried out, including simulation of the processing process using the VisualStudio integrated development environment, which supports WindowsForms technology. The ability to display graphical 3D objects was implemented using an additional software product in the form of the Open CASCADE geometric core. Numerical experiments using MathCAD software products and based on the analytical provisions proposed in the work made it possible to evaluate the influence of cutting conditions, geometric parameters of the cutting part of the tool (profile and number of teeth), kinematics of relative movement in the "tool – part" system on the shape of surfaces and contour parameters (roughness obtained during milling. A technique, algorithm and program for the automated calculation of cutting conditions has been developed, which has been verified during full-scale experiments and the manufacture of complex profile parts from aluminum alloys for drives of aerospace products (in the form of a RC profile and parts of a pinion transmission of guidance mechanisms). At the same time, on the basis of a 3D model of products, control programs for CNC machines were created using MasterCAM. The practical significance and technical and economic efficiency of the proposed design and technological solutions is to increase productivity and reduce the complexity of processing (in comparison with the basic options) through the use of new multi-edge carbide tools for high-speed milling (including when processing composite materials).*

*Keywords:* milling, hard metal tools, mathematical modeling, complex surfaces, aluminum and titanium alloys, composites, processing quality.

### **Введение**

Активное использование современных 3–5-осевых многоцелевых станков с ЧПУ открывает расширенные технологические возможности для обработки сложнопрофильных деталей с высокой производительностью и точностью. В то же время, эти цифровые технологии диктуют необ-

ходимость разработки соответствующих их уровню методов новых конструкций инструмента и оснастки для эффективной реализации процессов высокоскоростной прецизионной обработки. Особое значение решение этих комплексных задач имеет при обработке сложнопрофильных изделий для аэрокосмической отрасли, получаемых из труднодеформируемых при резании материалов, таких как композиты, титановые и алюминиевые сплавы. К деталям из этих материалов предъявляются повышенные требования по качеству обработки (точности размеров и взаимного расположения поверхностей, шероховатости), показателям надежности и долговечности.

Поэтому необходимо учитывать, что процессы формообразования при высокоскоростном резании на многоцелевых станках (фрезерование, фрезоточение, точение) имеют ряд особенностей, связанных с так называемым размерным эффектом [1–3]. При назначении режимов резания, кроме известных общепринятых в теории и практике параметров (углы резания и материал режущей части инструмента, свойства материала заготовки, величина усадки, угол наклона поверхностей сдвига, усилия резания и др.), необходимо учитывать и другие характеристики [1; 4]. Большинство исследователей признают, что одним из наиболее информативных показателей при аналитическом описании процессов микрофрезерования является удельная сила резания [5; 6] в зоне деформации. В значительной степени ее величина зависит от геометрии режущей части многолезвийного инструмента, так же как и профиль полученной при обработке поверхности, высота микронеровностей в виде отклонений формы, шероховатость [1]. Однако использование известных аналитических методов расчета на основе геометрических и стереологических моделей [6; 7] при проектировании многолезвийных сложноконтурных фрез ограничено, поскольку они не учитывают повышенной интенсивности и скорости деформационных процессов. Поэтому предпочтительным решением является комплексное использование аналитических и численных методов конечно-элементного анализа. Например, в работах [8; 9] этими методами была определена минимальная толщина срезаемого слоя конструкционных сталей, оцениваемая в зависимости от радиуса режущей кромки ( $r_e$ ) соотношением  $h_{\min} = (0,14 - 0,43) r_e$ , при которой обеспечивается требуемое качество обработки. Аналогичные значения определены экспериментально при изучении размерных эффектов и особенностей микрофрезерования [10; 11]. Но ограничиваться учетом только масштабного фактора при описании особенностей деформационных процессов высокоскоростной обработки недостаточно [12; 13]. Увеличение скорости резания (частота оборотов шпинделя на многоцелевых станках достигает 40000 об/мин), скорости подачи приводит к существенному изменению кинематических углов резания. В частности, может появляться большой отрицательный передний угол [14; 15] и, как результат, возникает эффект «плужения» (вместо срезания поверхностного слоя) [1; 6; 13]. Это приводит к росту удельной энергии, сконцентрированной в зоне резания, что также характерно именно для процессов высокоскоростной микрообработки [4; 8; 9; 11; 14; 15]. В этом случае преобладает упругая деформация, а в срезаемом слое формируется мелкодробленая стружка. Различия в механизмах разрушения при высокоскоростном резании можно косвенно оценить по форме и размерам стружки: размеры недеформированных слоев (фрагментов) стружки могут варьироваться от 0,1 до 900 мкм [8; 9; 14]. С увеличением глубины резания материал пластически деформируется, но до достижения вполне определенной пороговой величины [16]. Характерным признаком процессов микрообработки является также повышенная интенсивность циклических деформационных процессов, частота образования поверхностей, элементов сдвига, формирование в сечении стружки субмикронных ламелей [1]. Теоретическое, аналитическое описание механизмов их образования, моделирование и расчет кинематических параметров, при которых реализуются различные механизмы формообразования, являются необходимыми условиями для определения рациональных режимов резания и обеспечения требуемого качества обработки. В частности, теоретически и экспериментально обоснованные способы высокоскоростного ротационного точения, фрезерования и фрезоточения позволяют повысить интенсивность деформационных процессов, обеспечивают эффективное дробление стружки до микронных и субмикронных размеров. При этом удается одновременно улучшить качество обработки

поверхности по параметрам шероховатости [11; 14; 15]. В работах [16–20] представлен анализ проблем и результаты исследований, которые позволяют различными методами повысить эффективность высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов: за счет выбора правильной стратегии фрезерования [16], назначения рациональных режимов резания [17], сочетания микрофрезерования и электрофизических методов [18], нанесения защитного покрытия на поверхность режущего инструмента [19], оптимизации геометрических параметров фрез [20].

В работах [21–26] проанализированы основные проблемы, возникающие при обработке различных композитов (деламинация, вытягивание волокон композита, сколы и непрорезания волокон композита), даны рекомендации по геометрии режущей части и конструкции инструментов [21–24], выбору способов и технологических режимов обработки композитов [25; 26]. Преимущественные отличия высокоскоростного фрезерования по производительности не всегда являются гарантией обеспечения требуемого качества поверхностей, особенно при обработке изделий на основе труднодеформируемых материалов (алюминиевых и титановых сплавов, волокнистых композитов). Имеются объективные ограничения по режимам резания и конструктивному исполнению инструмента при обработке сложнопрофильных поверхностей. Существующие проблемы могут быть в значительной степени решены за счет расширенного применения методов фрезоточения и новых оригинальных конструкций многолезвийных фрез для их реализации на станках с ЧПУ [27–29]. Фрезерование с высокой геометрической сложностью инструмента позволяет уменьшить объем срезаемого слоя (размеры стружки) и силы резания, а также производить трехмерные микрокомпоненты из широкого спектра металлических и неметаллических материалов, в том числе композиционных. Кроме того, продольную токарную обработку с использованием вершинного режущего инструмента можно заменить на фрезоточение, которое обеспечивает повышение производительности обработки за счет совмещения вращательных движений заготовки и инструмента при одновременном повышении показателей качества поверхностей. При высокоскоростном фрезоточении, кроме уменьшения объема стружки (толщина срезаемого слоя может быть сопоставима с радиусом кромки инструмента), изменяются и механизмы разрушения материала заготовки – разрушение происходит преимущественно в упругой зоне без существенной пластической деформации. Известны методы математического моделирования и изучения влияния кинематики относительного перемещения в системе «инструмент – заготовка» на форму получаемых при обработке сложнопрофильных поверхностей (равноосных контуров) тел вращения [30].

Более того, задаваясь геометрией инструмента, режимами резания и траекторией относительного движения точек инструмента и заготовки можно управлять формой получаемой поверхности детали [31]. Но задачи разработки новых конструкций фрез и методов численной оценки деформационных процессов в срезаемом слое на основе метода конечных элементов (МКЭ), применительно к фрезоточению и высокоскоростным прецизионным методам фрезерования, требуют своего решения так же, как и проблемы создания управляющих программ для станков с ЧПУ. Задачи математического описания кинематики процессов фрезоточения, назначения и оптимизации режимов резания остаются недостаточно изученными как теоретически, так и экспериментально.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование кинематических параметров и режимов высокоскоростного фрезерования для повышения производительности и качества обработки сложнопрофильных поверхностей деталей.

### **Методика и аппаратура проведения исследований**

Экспериментальные исследования по фрезоточению проводились на токарно-фрезерном станке с ЧПУ (модель DMG MORI CTX 310) с приводным инструментом (рис. 1, а). В качестве заготовок при проведении испытаний использовался круглый прокат из алюминиевого сплава Д16 ГОСТ 4784-97 и стали 45 ГОСТ 1050-2013. Изучение высокоскоростного фрезерования композиционных материалов на основе углеродной ткани УТ – 900 – 3 и эпоксидной смолы

Этал – 200М проводили на работе-манипуляторе Kuka KR 90 R3100 extra HA 9 с установленным на нем шпинделем H6161H0902 (рис. 1, б).

В качестве инструментов использовались собственные оригинальные конструкции многолезвийных фрез-роутеров [31] (рис. 1, в, з), использованных при испытаниях в сравнении с аналогами фирм ISCAR (Израиль) и SANDVIK (Швеция). Фреза-аналог 2P350 – 1000 – OA O12M (фирма Sandvik).

Для изучения обрабатываемости алюминиевых сплавов были дополнительно спроектированы многолезвийные концевые фрезы, 3D-модели которых приведены на рис. 1, д, е.

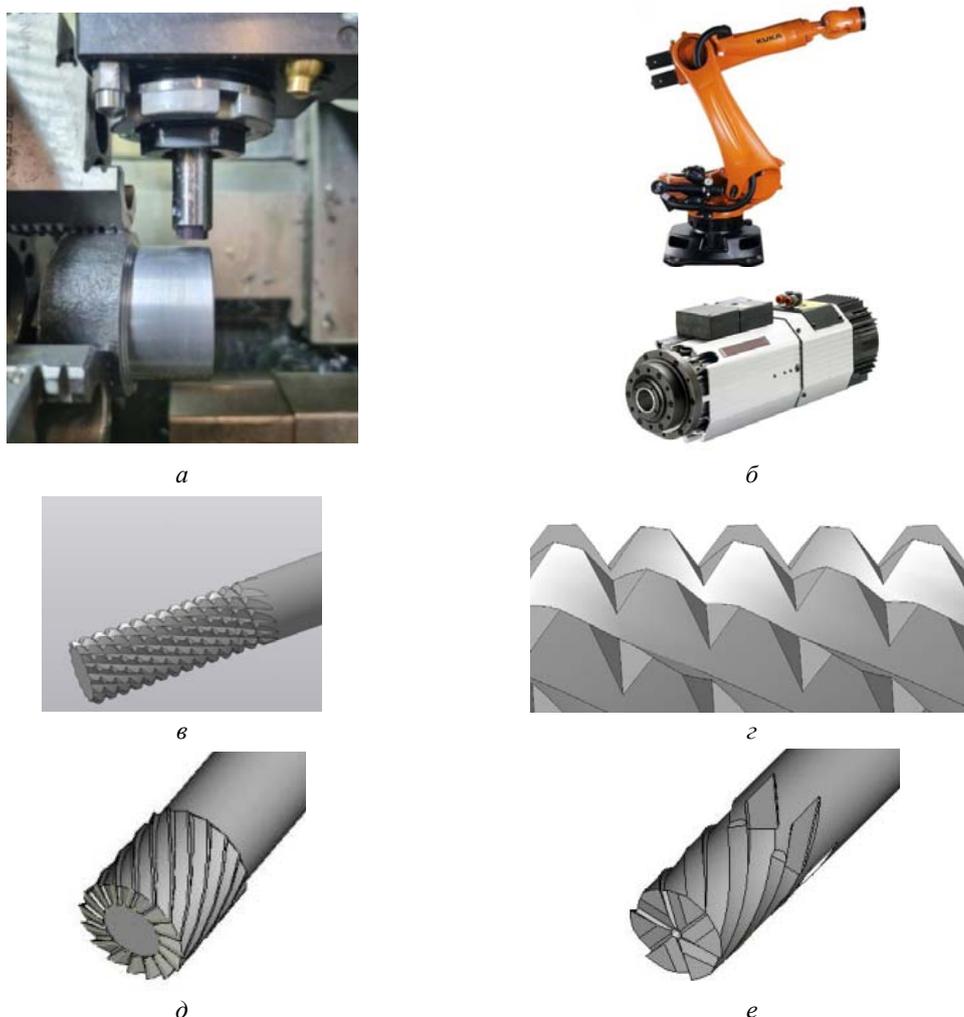


Рис. 1. Оборудование и оснастка для проведения экспериментов:

*a* – токарно-фрезерный станок с ЧПУ DMG MORI CTX 310; *б* – робот Kuka KR 90 R3100 extra HA (Япония) и шпиндель H6161H0902; *в, з* – 3D-модель новой конструкции многолезвийной фрезы-роутера EMC-D10-90-1 и профиль зубьев; *д, е* – геометрия режущей части концевых фрез для обработки алюминиевых сплавов

Fig. 1. Equipment and tool set for experiments:

*a* – CNC turning and milling machine DMG MORI CTX 310; *b* – robot Kuka KR 90 R3100 extra HA (Japan) and spindle H6161H0902; *c, d* – 3D model of a new design of the EMC-D10-90-1 multi-blade cutter-router and tooth profile; *e, f* – geometry of the cutting part of end mills for processing aluminum alloys

В качестве независимых переменных были приняты следующие параметры режимов резания:  $S_0$  – продольная подача инструмента на оборот обрабатываемого вала, 0,15–1,2 мм/об;  $n_3$  – число оборотов заготовки, 50–1000 об/мин;  $v_p$  – скорость резания, 310–933 м/мин;  $n_\phi$  – число оборотов фрезы, 6000–18000 об/мин;  $t$  – глубина резания, 0,1–1,5 мм. Качество обработанной

поверхности образцов оценивалось по двум высотным параметрам шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  на профилометре модели Tr 220 (КНР), диапазон измерений 160 мкм (от -80 до +80 мкм). Анализ микроструктуры образцов и морфологии стружки проводился на растровых электронных микроскопах HITACHI TM 1000 и JEOL JSM-7001F.

Изготовление цельных твердосплавных фрез производили на шлифовальном станке ANCA RX7 по специально разработанным управляющим программам, с учетом всех конструктивных параметров спроектированных фрез (рис. 2). В качестве материала заготовки для изготовления инструмента использовались прутки из наноструктурированного твердосплавного композита (полученные экструзией бимодальных порошковых смесей WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с повышенными показателями по прочности, трещиностойкости и термостойкости [32; 33]. Совокупность этих свойств является необходимой предпосылкой для эффективной работы разработанной конструкции многолезвийной фрезы на высоких скоростях резания и в условиях переменных циклических нагрузок.

Разработанные новые конструкции фрез из твердосплавного композита имеют расширенную область применения и соответствуют группам  $P$ ,  $N$ ,  $M$ ,  $S$  по стандарту ISO 513:2012.

### Моделирование процессов фрезоточения

В процессе обработки детали по методу фрезоточения инструмент совершает два движения: поступательное вдоль оси детали ( $s_o$ ) и вращательное движение вокруг собственной оси ( $n_\phi$ ), а обрабатываемая заготовка при этом вращается вокруг собственной оси ( $n_o$ ). Возможно как перпендикулярное (рис. 3, а) положение оси вращения фрезы относительно оси вращения заготовки, так и соосное (рис. 3, б). В первом случае реализуется торцевая схема обработки, а во втором – контурная.



Рис. 2. Образцы новых конструкций твердосплавных фрез для проведения испытаний

Fig. 2. Samples of new designs of carbide milling cutters for testing

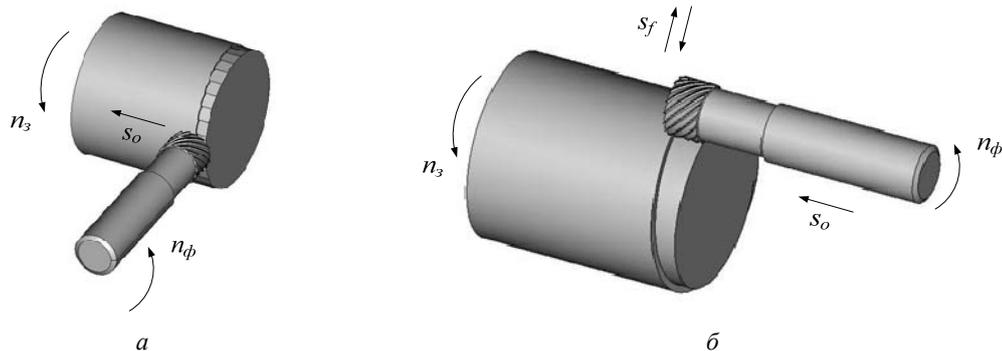


Рис. 3. Схемы обработки поверхностей при фрезоточении

Fig. 3. Schemes of surface treatment during milling

Необходимым условием для достижения высокой точности и производительности при обработке деталей фрезоточением является назначение оптимальных режимов резания.

Более сложная кинематика совместного вращательного движения инструмента при фрезоточении, естественно, влияет и на методику расчета режимов резания. Для получения достоверных расчетных формул предварительно были проведены численные эксперименты, в том числе симуляция процесса обработки с использованием интегрированной среды разработки

VisualStudio, в которой поддерживается технология WindowsForms. Возможность отображения графических 3D-объектов была реализована за счет дополнительного программного продукта в виде геометрического ядра Open CASCADE (рис. 4).

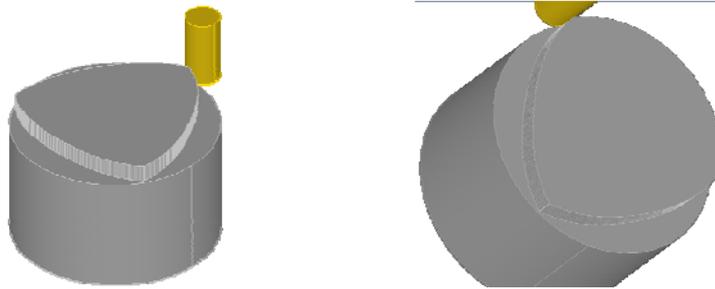


Рис. 4. Кинематическая схема и профиль поверхности при торцевом фрезоточении

Fig. 4. Kinematic scheme and surface profile during face milling

По результатам численных оценок по первой схеме торцевого фрезоточения были разработаны комплексная методика и расчетные формулы для определения основных режимов резания (1–6) приведенные ниже.

Диаметр обрабатываемой заготовки определится по формуле:

$$D_m = D_w - 2 \cdot a_p, \quad (1)$$

где  $a_p$  – глубина резания. Угол смещения по шагу:

$$\theta = \arctg\left(\frac{x}{3,14 \cdot D_m}\right), \quad (2)$$

где  $x$  – шаг винтовой линии.

Частота вращения заготовки, мм/об:

$$n_w = \frac{z \cdot f_z \cdot n_t}{x}, \quad (3)$$

где  $z$  – число зубьев фрезы,  $f_z$  – подача на зуб,  $n_t$  – частота вращения инструмента.

Подача на зуб и подача в осевом направлении определяются по формулам (4), (5):

$$f_z = \frac{f'_z \cdot x \cdot \cos(\theta)}{3,14 \cdot D_m}, \quad (4)$$

$$f'_z = \frac{3,14 \cdot D_m \cdot n_w}{z \cdot \cos(\theta) \cdot n_t}, \quad (5)$$

И, наконец, скорость фрезы по спиральной траектории:

$$V_{f'} = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n_w}{\cos(\theta)}, \quad (6)$$

Расчеты по формулам (1)–(6) показывают существенный (до 2 раз) прирост скорости резания и производительности по объему срезаемого материала по сравнению с точением.

Дополнительное движение подачи фрезы ( $s_f$ ) при контурной (сосной) схеме обработки (рис. 3, б) обеспечивает также возможность обработки сложнопрофильных поверхностей, таких как равноосные контуры с регулярным профилем, циклоидальные, винтовые и т. д.

При моделировании процессов соосного фрезоточения и в экспериментальной части работы использовалась оригинальная конструкция многолезвийного инструмента, которая сочетает

в себе элементы «обычного» срезания слоя материала и роутера. Повышенная интенсивность и частота циклов срезания поверхностного слоя предполагают повышение производительности и качества обработки поверхности детали. Именно этим объясняется эффективность использования высокоскоростного прецизионного фрезоточения по схеме, представленной на рис. 3, б. Численные эксперименты с использованием программных продуктов MathCAD, основанные на аналитических положениях, предложенных в работе, позволили оценить влияние режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента (профиля и количества зубьев), кинематики относительного перемещения в системе «инструмент – деталь» на форму поверхностей и параметры контура (шероховатости, получаемые при фрезоточении).

Теоретическое изучение возможностей использования процессов фрезоточения для получения более сложных поверхностей типа равноосных контуров (рис. 5) потребовало разработки более сложных математических моделей с применением специализированных CAD-систем.

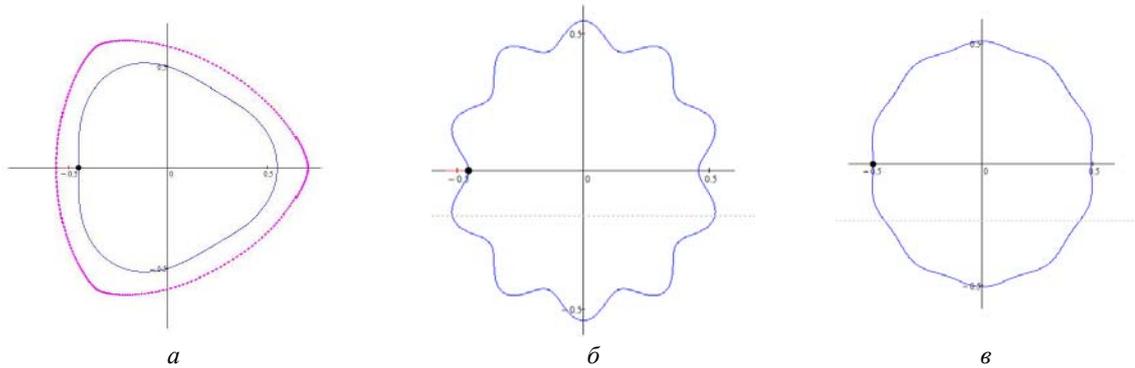


Рис. 5. Результаты моделирования профилей поверхностей деталей:  
*a* – профиль треугольника Рело; *б* – циклоида; *в* – многогранник

Fig. 5. The results of modeling the profiles of the surfaces of parts:  
*a* – profile of the Reuleaux triangle; *b* – cycloid; *c* – polyhedron

Угловые скорости инструмента и детали были заданы в качестве входных данных в модели процесса фрезерования для определения профиля обработанной поверхности, а при определении требуемой траектории эти параметры и их соотношения варьировались. Инструментальные режущие поверхности образуются в результате пересечения плоскости передней поверхности с производящей поверхностью фрезы. Описание движений инструмента и детали представлено в виде системы уравнений (7) и матрицы вращения детали (8). Например, при соотношении угловых скоростей 1/3:  $\omega_I = 2\pi 3$ ,  $\omega_D = -2\pi$ , где  $\omega_I$  – угловые скорости инструмента,  $\omega_D$  – угловые скорости детали.

$$r_I(t, \delta\varphi) = \begin{pmatrix} r_{IO} \cos(\varepsilon_I t + \delta\varphi) + \varepsilon \\ 0 \\ r_{IO} \cos(\varepsilon_I t + \delta\varphi) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$M_Z(t) = \begin{pmatrix} \cos(\omega_D t) & -\sin(\omega_D t) & 0 \\ \sin(\omega_D t) & \cos(\omega_D t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $r_I$  – координаты точек перемещения инструмента;  $\delta\varphi$  – расстояние между режущими кромками;  $\varepsilon$  – отношение радиусов фрезы и заготовки.

Дискретность расчетов задавалась шагом параметра  $t$ . В зависимости от количества режущих кромок фрезы  $N$  и шага между зубьями  $K$  изменяется угол поворота  $\delta\varphi$  – формула (10) и контур обрабатываемой поверхности (9):

$$r(t, \delta\varphi) = M_Z(t) r_I(t, \delta\varphi), \quad (9)$$

$$\delta\varphi_K = \frac{360 \cdot \text{deg}}{N} K \quad (10)$$

Результаты моделирования показывают, что фрезоточение позволяет получать различные профили на детали (рис. 5). Примеры профилей и шероховатости поверхности, полученные фрезерованием при различных значениях числа зубьев  $N$ , угловых скоростей инструмента  $\omega_I$  и заготовки  $\omega_D$ , расстояний между осью инструмента и деталью  $\varepsilon$ , представлены на рис. 5. Например, для равноосного контура RC в форме треугольника Рело (рис. 5, а) координаты точек (изменение угла фигуры равноширокой) могут быть определены по формулам  $p(t) = 9 - \cos(3t)$ .

Описание равноширокой кривой в соответствии с моделью производится путем определения координат точек  $x, y$  по формулам (11) и (12).

$$x(t) = \left( p(t)\cos(t) + \frac{d}{dt}p(t)\sin(t) \right) 0,07, \quad (11)$$

$$y(t) = \left( p(t)\sin(t) + \frac{d}{dt}p(t)\cos(t) \right) 0,07, \quad (12)$$

На основании приведенных выше формул, описывающих процесс формирования равноосного контура, был разработан алгоритм и создана программа расчета, позволяющая автоматизировать процедуру определения координат точек. Построение профиля колеса цевочной передачи осуществляется после расчета основных исходных параметров. Например, для детали редуктора с передаточным отношением 8 и номинальным диаметром обоймы 50 мм диаметр колеса будет равен 44,444 мм и диаметр цевки 8,73 мм. После вспомогательных построений с наложением контуров заготовки и инструмента получаем массив промежуточных окружностей (рис. 6, а) и контур цевочного колеса (рис. 6, б).

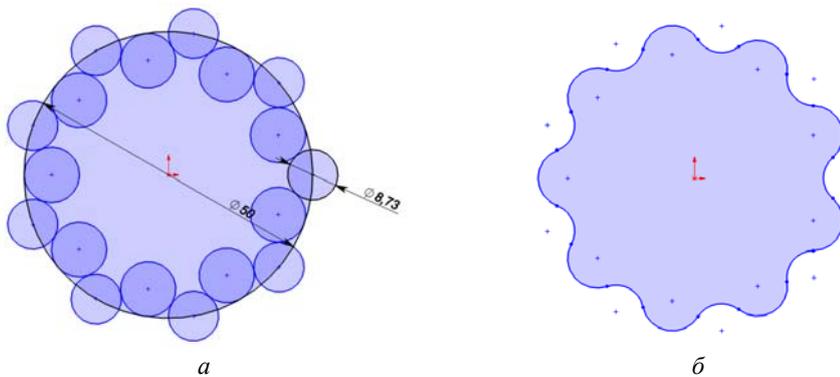


Рис. 6. Построение контура цевочного колеса:  
а – массив промежуточных окружностей; б – профиль детали

Fig. 6. Constructing the outline of the lantern wheel:  
а – array of intermediate circles; б – part profile

Для получения траектории движения фрезы необходимо выполнить операцию «смещение объектов». Величина смещения должна быть равна радиусу фрезы, а траектория представляет собой замкнутый контур из дуг двух различных радиусов (рис. 7, а). В случае, если диаметр фрезы будет равен диаметру цевки, траектория будет состоять из дуг одного радиуса (рис. 7, б).

Ниже приводится алгоритм и фрагменты реализации управляющей программы для изготовления деталей привода циклоидной передачи механизмов управления спутниковой связи. Для получения координат траектории можно воспользоваться встроенными средствами САД-среды

API для трансформации кривых в набор точек с последующим получением зависимости угла поворота детали от точки траектории. CAD-среда предоставляет возможность получения параметров кривых через интерфейс с последующей обработкой в сторонних программных продуктах (рис. 8).

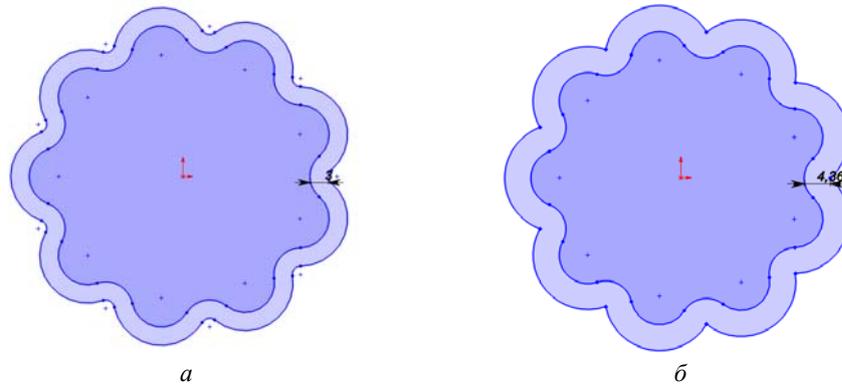


Рис. 7. Траектория для фрезы диаметром, равным диаметру цевок:  
*a* – замкнутый контур из дуг двух различных радиусов; *b* – траектория из дуг одного радиуса

Fig. 7. Trajectory for a cutter with a diameter equal to the diameter of the pins:  
*a* – closed contour of arcs of two different radii; *b* – trajectory of arcs of the same radius

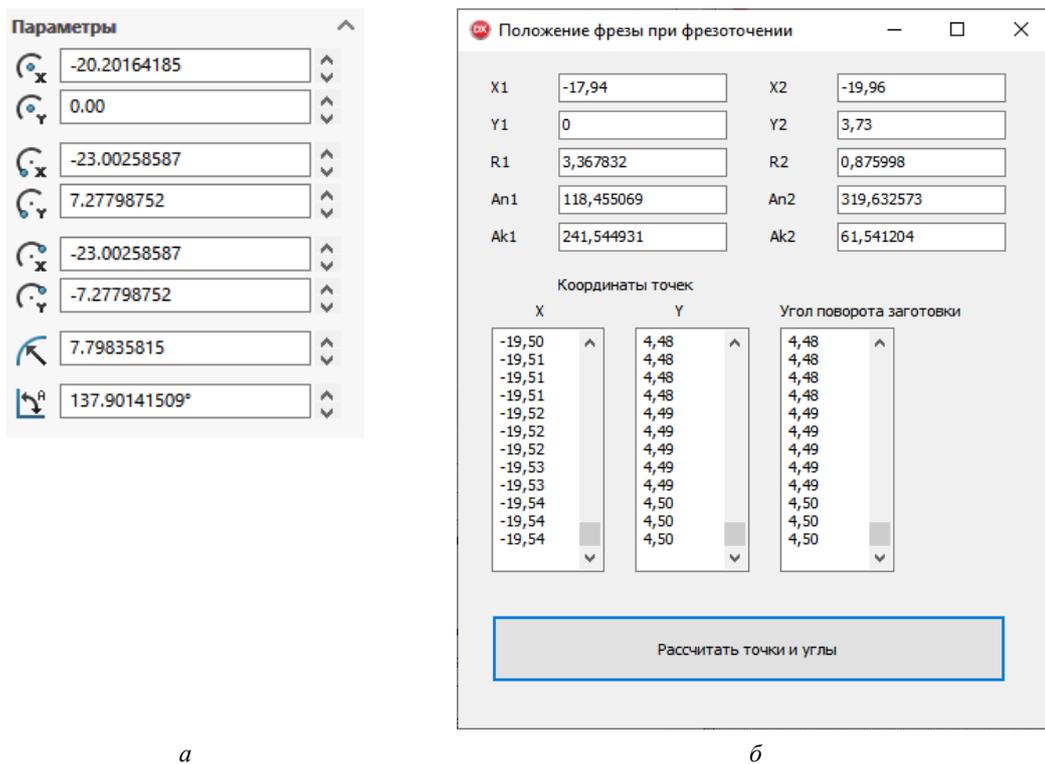


Рис. 8. Получение характеристик дуги в SolidWorks (*a*) и интерфейс приложения (*b*)

Fig. 8. Obtaining arc characteristics in SolidWorks (*a*) and Application interface (*b*)

Поскольку при фрезоточении фреза перемещается только по одной координате, то для формирования траектории выбираются наборы точек координаты *X* и угла поворота заготовки (табл. 1).

Причем для получения профиля методами фрезоточения необходимо произвести соответствующую корректировку на вращение заготовки. Эту процедуру можно произвести на основа-

нии 3D-модели изделий при создании управляющих программ для станков с ЧПУ с помощью программного продукта MasterCAM.

Таблица 1

Соотношение положения фрезы от угла поворота заготовки

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Положение фрезы относительно заготовки, мм	-19,57	-19,59	-19,6	-19,62	-19,63	-19,65	-19,66	-19,68	-19,69	-19,71	-19,72
Угол поворота заготовки, град.	2,94	2,94	2,93	2,92	2,91	2,9	2,89	2,89	2,88	2,87	2,86

### Экспериментальные исследования процессов высокоскоростного фрезерования. Результаты и обсуждения

Назначение режимов резания при фрезоточении для получения сложноконтурных равноосных поверхностей изделий аэрокосмической отрасли производилось с помощью управляющих программ для станков с ЧПУ. В качестве основных параметров для верификации результатов моделирования при проведении экспериментальных исследований использовались значения точности размеров и формы равноосных контуров, шероховатости поверхности, обработанной фрезоточением при изготовлении реальных деталей в производственных условиях. В результате удалось с высокой точностью размеров, формы и требуемым качеством поверхностного слоя изготовить детали в форме РК-профиля (треугольника Рело) (рис. 9, *а*). Процесс постадийной обработки при получении контура детали для привода (цевочной передачи) представлен на рис. 9, *б-г*.

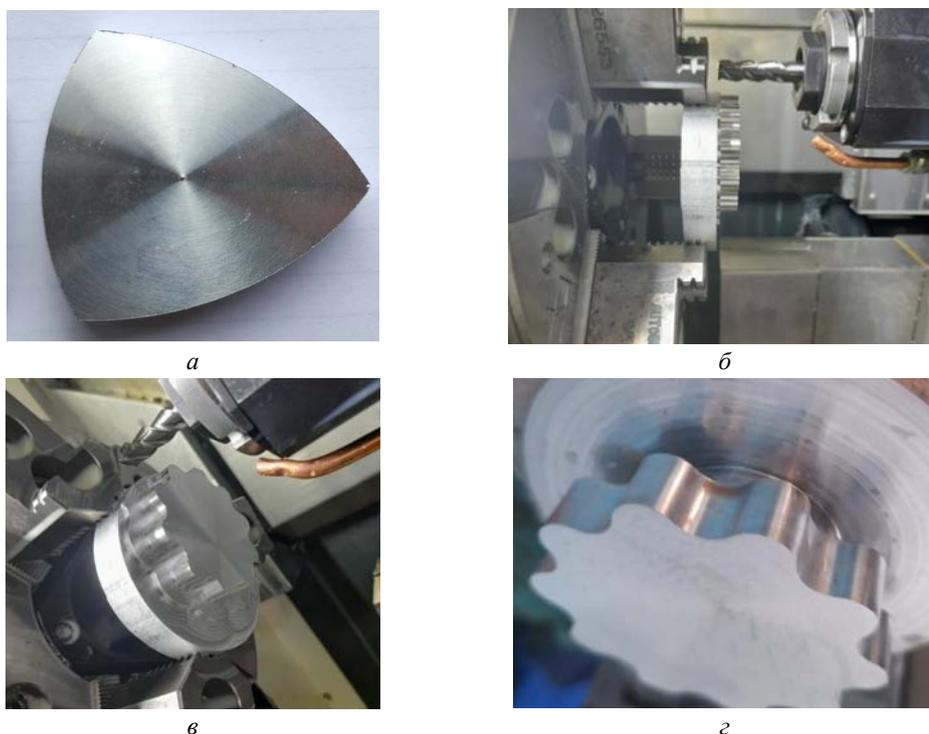


Рис. 9. Сложноконтурные поверхности деталей, полученные фрезоточением: *а* – треугольник Рело; *б* – схема наладки при фрезоточении; *в* – профиль циклоиды для цевочной передачи; *г* – готовая деталь

Fig.9. Complex contour surfaces of parts obtained by milling: *a* – Reuleaux triangle; *b* – setup diagram for milling; *c* – cycloid profile for lantern drive; *d* – finished part

Высокая интенсивность процессов фрезоточения подтверждается результатами изучения микроструктуры поверхностного слоя. Обнаружено повышение микротвердости деталей из стали на глубину до 80 мкм в 2,5 раза по сравнению с основой, т. е. этот способ обработки резанием может быть использован вместо термообработки. При этом обеспечивается высокое качество поверхности по шероховатости, что исключает необходимость дополнительных чистовых (финишных) операций. Косвенным подтверждением преимуществ высокоскоростных видов фрезоточения являются результаты электронно-микроскопических исследований формы и размеров стружки. Для экспериментальной проверки численных результатов исследований методом МКЭ использовались значения шероховатости поверхности. Морфологию стружки, полученной фрезоточением алюминиевого сплава многолезвийной контурной фрезой, иллюстрирует рис. 10. Размеры стружки изменяются в диапазоне от 2 до 50 мкм, причем при более детальном изучении обнаруживается, что крупные по размеру типы стружек представляют собой агломераты из фрагментов с размерами 480– 880 нм (рис. 10, б).

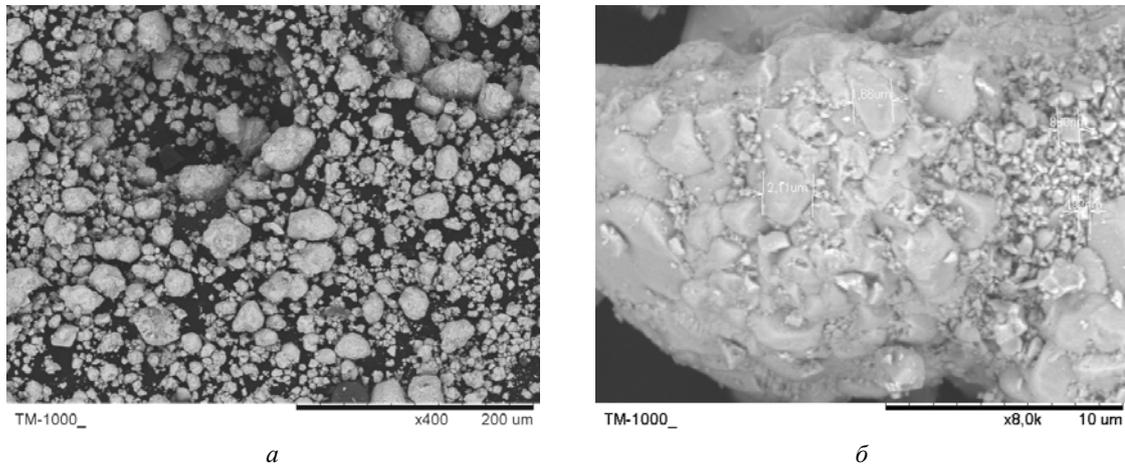


Рис. 10. Морфология алюминиевой стружки, полученной при фрезоточении:  
*a* – распределение по размерам,  $\times 400$ ; *б* – наноструктурированный фрагмент стружки

Fig. 10. Morphology of aluminum chips obtained by milling:  
*a* – size distribution,  $\times 400$ ; *b* – nanostructured chip fragment

В процессе экспериментальных исследований подтверждена также возможность повышения качества поверхностей волокнистых композитов при высокоскоростной обработке с использованием новых оригинальных конструкций многолезвийных фрез-роутеров (см. рис. 1, в, з и 2). При проведении экспериментальных исследований влияния режимов резания на параметры шероховатости использовались образцы-свидетели из углепластика (рис. 11, *a*), полученные параллельно из того же материала, который применялся для изготовления изделий (рис. 11, *б*).



Рис. 11. Образцы для изучения высокоскоростного фрезерования композитов на основе углепластиков:  
*a* – образцы для испытаний; *б* – изделия

Fig. 11. Samples for studying high-speed milling of composites based on carbon fiber:  
*a* – samples for testing; *b* – products

Изображения обработанных поверхностей показывают, что обеспечивается эффективный поперечный срез волокон (рис. 12, *a*, *б*). Это можно объяснить увеличенной частотой циклов срезания (до 4000–6000 с<sup>-1</sup>). Косвенным подтверждением эффективности работы инструмента является морфология стружки – ее размеры варьируются в диапазоне от 3 до 8 мкм (рис. 12, *в*, *г*), т. е. коррелируют с шероховатостью обработанной поверхности (рис. 12, *a*).

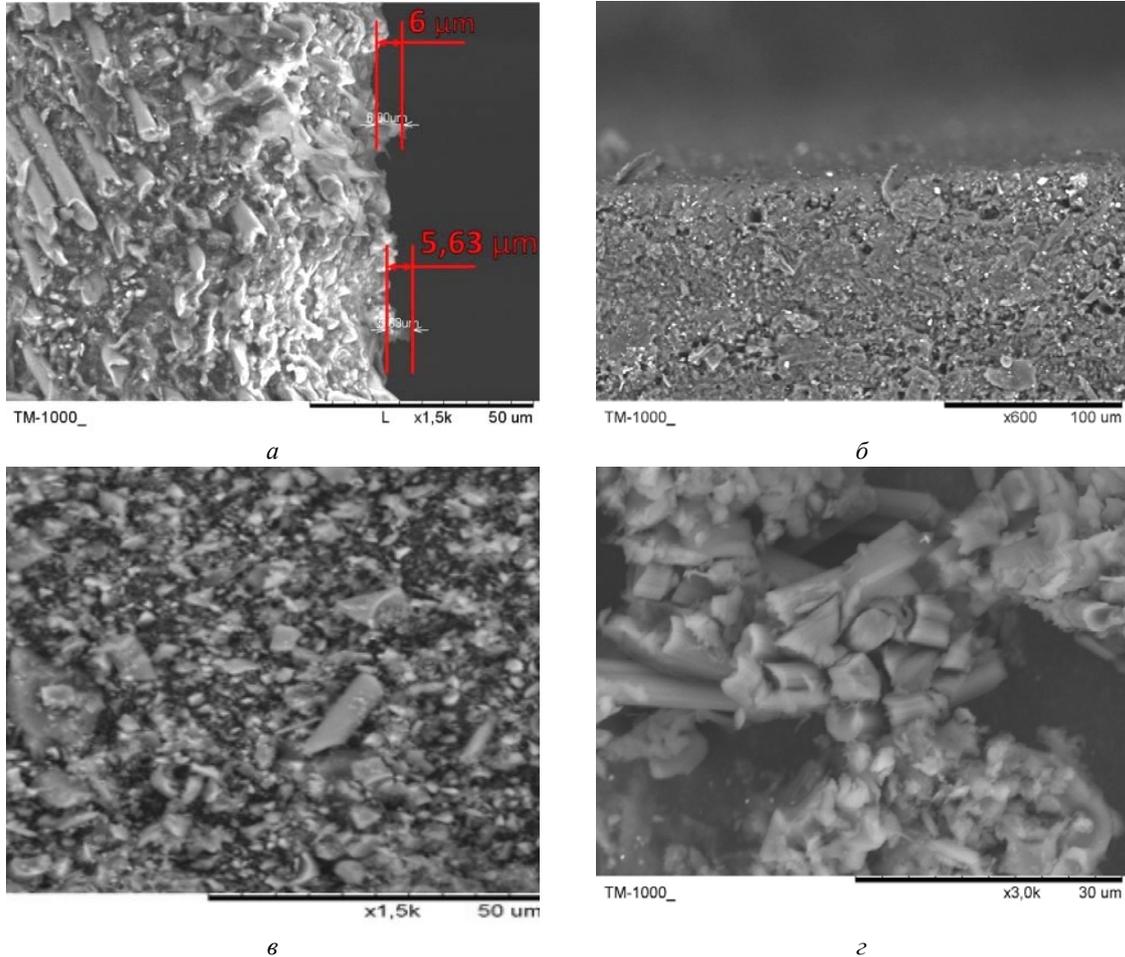


Рис. 12. Результаты электронно-микроскопического исследования:  
*a* – обработанная поверхность стеклопластика; *б* – обработанная поверхность углепластика;  
*в* – морфология стружки стеклопластика; *г* – морфология стружки углепластика

Fig. 12. Results of electron microscopic examination:  
*a* – treated surface of fiberglass; *b* – treated surface of carbon fiber;  
*c* – morphology of fiberglass chips; *d* – morphology of CFRP chip

Коэффициент дробления стружки при глубине фрезерования 0,5 мм и скорости вращения 4000 об/мин равен  $k = 250$ . Этот факт косвенно подтверждает повышение производительности процесса обработки и уменьшение удельной силы резания.

Применение высокоскоростной обработки деталей из композиционных материалов подтверждает эффективность использования новых конструкций многолезвийных фрез (качество обработки соответствует характеристикам лучших мировых аналогов). В качестве подтверждения результаты экспериментальных исследований преобразованы (представлены) в виде сравнительных диаграмм измерения шероховатости поверхности углепластиков по параметрам  $R_a$  и  $R_z$  различными типами фрез (рис. 13, 14).

Применение высокоскоростной обработки деталей из композиционных материалов подтверждает эффективность использования новых конструкций многолезвийных фрез (качество

обработки поверхности по шероховатости соответствует характеристикам, полученным при использовании лучших мировых инструментов-аналогов).

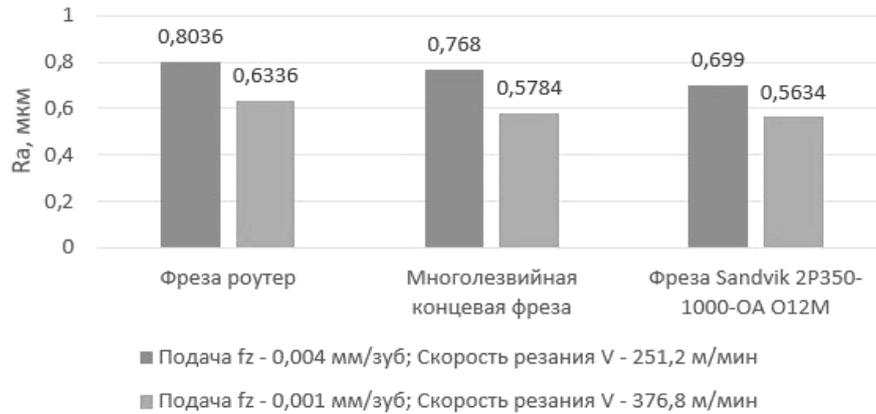


Рис. 13. Шероховатость обработанной поверхности Ra после сравнительных испытаний различными конструкциями фрез

Fig. 13. Roughness of the machined surface Ra after comparative tests with different cutter designs

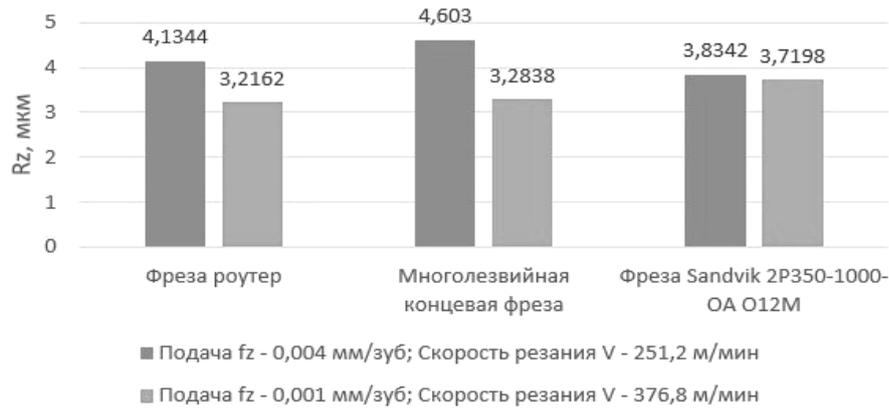


Рис. 14. Результаты замеров параметра Rz после сравнительных испытаний

Fig. 14. Results of measurements of parameter Rz after comparative tests

### Заклучение

По результатам комплекса расчетных и экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложенные на основании исследований полуэмпирические расчетные формулы достаточно адекватно отражают результаты натуральных экспериментов и позволяют определять рациональные режимы резания для получения сложнопрофильных поверхностей типа равноосного контура.

2. Натурными экспериментами подтверждена практическая значимость и технико-экономическая эффективность предложенных конструкторско-технологических решений – фрезоточением изготовлены сложнопрофильные детали приводов, причем время обработки с 6 ч на электроэрозионном станке G-64S (в базовом варианте технологического процесса) сократилось до 18 мин.

3. Многолезвийная конструкция новой фрезы – роутера с трапецидальной формой режущей кромки зуба обеспечивает повышение качества обработки композиционных материалов, а именно, снижение шероховатости и дефектности поверхностного слоя (на уровне лучших мировых аналогов).

4. Экспериментальные исследования позволили оценить влияние режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента (профиля и количества зубьев), кинематики относительного перемещения в системе «инструмент – заготовка» на форму и размеры сложно-контурной поверхности, полученной фрезоточением.

### Библиографические ссылки

1. De Oliveira F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. P. 39–54. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>.
2. Chuzhoy L., Devor R. E., Kapoor S. G. et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2002. Vol. 124, no. 2. P. 162–169. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>.
3. Cuba Ramos A., Autenrieth H., Strauß T. et al. Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212, no. 3. P. 594–600. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007>.
4. Hideaki O., Koji U., Ippei K. et al. High speed milling processes with long oblique cutting edges // *J. Manuf. Process.* 2015. Vol. 19. P. 95–101. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>.
5. Высокоскоростное микрофрезерование деталей из композиционных материалов и алюминиевых сплавов / Е. В. Патраев, М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский // *Известия ВУЗов Машиностроение*. 2021. № 12(741). С. 62–72. Doi: [doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-62-72).
6. Воронцов А. Л., Султанзаде Н. М., Албагачиев А. Ю. Разработка новой теории резания. 1. Введение // *Вестник машиностроения*. 2008. № 1. С. 57–67.
7. Vogler M. P., Devor R. E., Kapoor S. G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2004. Vol. 126, no. 4. P. 685–694. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1813470>.
8. High speed processes with long oblique cutting edges / O. Hideaki, U. Koji, K. Ippei et al. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 19. P. 95–101. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>.
9. Furukawa Y., Moronuki N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes // *Ann. CIRP*. 1988. Vol. 37 (1). P. 113–116. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61598-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61598-4).
10. Cheng K., Huo D. *Micro-Cutting Fundamentals and Applications*, 1th ed., Wiley, United Kingdom. 2013. 348 p.
11. Kim J., Kim S. D. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultraprecision machining // *J. Mater. Process. Technol.* 1995. Vol. 49 (3–4). P. 387–398. Doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01345-2](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01345-2).
12. Chae J., Park S. S., Freiheit T. Investigation of micro-cutting operations // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46. P. 313–332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>.
13. Built-up-edge effects on surface deterioration in micromilling processes / Z. Wang, V. Kovvuri, A. Araujo et al. // *J. Manuf. Process.* 2016. vol. 24. pp. 321–327. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.016>.
14. Niu F. Jiao, Cheng K. An innovative investigation on chip formation mechanisms in micro-milling using natural diamond and tungsten carbide tools // *J. Manuf. Process.* 2018. Vol. 31. P. 382–394. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.023>.
15. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters / A. S. Binchurov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 3. P. 032101. Doi: [10.1088/1757-899X/537/3/032101](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032101).
16. Андриященко С. А., Ростовцев П. А., Рошупкин С. И. Экспериментальное исследование влияния стратегий обработки на шероховатость поверхности при фрезеровании алюминиевых

сплавов концевыми фрезами // Современные технологии: проблемы и перспективы. 2019. С. 11–15.

17. Трусов В. Н., Законов О. И., Шикин В. В. Исследование параметров процесса фрезерования алюминиевого сплава Д16Т // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 155–162.

18. Куликов М. Ю., Иноземцев В. Е., Бочаров А. А. Исследование процесса формообразования при совмещении фрезерной и электрохимической обработки алюминия // Металлообработка. 2015. № 6 (90). С. 50–53.

19. Демин А. С., Лаврентьев С. В. Режущий инструмент с покрытием DLC при обработке алюминиевых сплавов // Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Омск, 24 ноября 2017 г.), 2017. Ч. 3. С. 116–118.

20. Ковалевский А. В. Выбор рациональных режимов фрезерования для обработки алюминиевых сплавов // Омский научный вестник. 2008. № 4 (73). С. 64–66.

21. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / В. А. Вавилин, К. А. Пасечник, А. Ю. Пушкарев, Н. А. Амельченко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Том 1, №. 14. С. 12–14.

22. Abd Halim N. F. H., Ascroft H., Barnes S. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) // Procedia Engineering. 2017. Vol. 184. P. 185–191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.084>.

23. Мешкас А. Е., Макаров В. Ф., Ширинкин В. В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 291–299.

24. Стуров А. А., Чащин Н. С. Механообработка композиционного материала с использованием робототехнического комплекса на базе робота Kuka KR210 // Вестник Иркутского гос. тех. ун-та, 2019. Т. 23, № 4 (147). С. 743–750.

25. Минибаев М. И., Раскутин А. Е., Гончаров В. А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. №. 1 (73). С. 105–114. Doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.

26. Раскутин А. Е., Хрульков А. В., Гирш Р. И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). С. 106–118. Doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.

27. Влияние кинематических и технологических параметров ротационного точения многогранными резцами на формирование стружки и шероховатость поверхности / Ю. И. Гордеев, Н. С. Индаков, А. С. Бинчуров и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 379–386.

28. Simulation of high-speed machining processes by multi-edge mills / Y. I. Gordeev, V. B. Yasinsky, E. A. Spirin et al. // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Vol. 2373, No. 3. P. 032012. Doi: 10.1088/1742-6596/2373/3/032012.

29. 2019 Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters / A. S. Binchurov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing 537 № 3. P. 032101. Doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032101.

30. Тимченко А. И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений. М. : ВНИИТЭМР, 1988. 160 с.

31. Vakulin M. S., Gordeev Yu. I., Yasinsky V. B. Design of tools with the cutting part of the original profile for high-speed milling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 754(1). P. 012008. Doi: 10.1088/1757-899X/754/1/012008.

32. Investigation of nanostructured hard metal composites obtained from powder mixtures (WC-Co)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Y. I. Gordeev et al. // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Vol. 2373, No. 3. P. 032025. Doi: 10.1088/1757-899X/754/1/012008.

33. Combined Application of Composite Powders WC-Co and Additives of Nanoparticles as an Effective Method of Improving the Properties of Hard Metals / Y. I. Gordeev, V. B. Yasinsky, A. S. Binchurov // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 769. P. 134–140. Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.769.134>.

## References

1. De Oliveira F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, Vol. 89, P. 39–54. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001>.
2. Chuzhoy L., Devor R. E., Kapoor S. G. et al. Microstructure-level modeling of ductile iron machining. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2002, Vol. 124, No. 2, P. 162–169. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1455642>.
3. Cuba Ramos A., Autenrieth H., Strauß T. et al. Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, Vol. 212, No. 3, P. 594–600. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.007>.
4. Hideaki O., Koji U., Ippei K. et al. High speed milling processes with long oblique cutting edges. *J. Manuf. Process.* 2015, Vol. 19, P. 95–101. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>.
5. Patraev E. V., Vakulin M. S., Gordeev Yu. I., Yasinsky V. B. [High-speed micro-milling of parts made of composite materials and aluminum alloys]. *Proceedings of Universities of Mechanical Engineering*. 2021. No. 12 (741), P. 62–72. Doi: [doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-62-72). Doi: [10.18698/0536-1044-2021-12-62-72](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-62-72).
6. Vorontsov A. L., Sultan-Zade N. M., Albagachiev A. Yu. [Development of a new cutting theory. 1. Introduction]. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2008, No. 1, P. 57–67. Doi: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9947574>.
7. Vogler M. P., Devor R. E., Kapoor S. G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2004. vol. 126, no. 4, pp. 685–694, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1813470>.
8. Hideaki O., Koji U., Ippei K., Junichi H., Yasuhiro N. High speed processes with long oblique cutting edges. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, Vol. 19, P. 95–101. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.004>.
9. Furukawa Y., Moronuki N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes. *Ann. CIRP* 1988, Vol. 37 (1), P. 113–116. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61598-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61598-4).
10. Cheng K., Huo D. *Micro-Cutting Fundamentals and Applications*, 1th ed., Wiley, United Kingdom, 2013, 348 p.
11. Kim J., Kim S. D. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultraprecision machining. *J. Mater. Process. Technol.* 1995, Vol. 49 (3–4), P. 387–398. Doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01345-2](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01345-2).
12. Chae J., Park S. S., Freiheit T. Investigation of micro-cutting operations. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006, Vol. 46, P. 313–332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>.
13. Wang Z., Kovvuri V., Araujo A. et al. Built-up-edge effects on surface deterioration in micromilling processes. *J. Manuf. Process.* 2016, Vol. 24, P. 321–327. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.016>.
14. Niu F. Jiao, Cheng K. An innovative investigation on chip formation mechanisms in micro-milling using natural diamond and tungsten carbide tools. *J. Manuf. Process.* 2018, Vol. 31, P. 382–394. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.023>.
15. Binchurov A. S. et al. Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (IOP Publishing 537 No. 3). 2019, P. 032101. Doi: [10.1088/1757-899X/537/3/032101](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032101).
16. Andryushchenko S. A., Rostovtsev P. A., Roshchupkin S. I. [Experimental study of the influence of machining strategies on surface roughness when milling aluminum alloys with end mills]. *Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy*. 2019, P. 11–15 (In Russ.).

17. Trusov V. N., Zanov O. I., Shikin V. V. [Investigation of the parameters of the milling process of aluminum alloy D16T]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2012, No. 3 (35), P. 155–162 (In Russ.).
18. Kulikov M. Yu., Inozemtsev V. E., Bocharov A. A. [Study of the process of shaping when combining milling and electrochemical processing of aluminum]. *Metalloobrabotka*. 2015, No. 6 (90), P. 50–53 (In Russ.).
19. Demin A. S., Lavrentiev S. V. [DLC coated cutting tool for aluminum alloy machining]. *Problems, prospects and directions of innovative development of science: Sat. articles of the International scientific and practical conference* (Omsk, November 24, 2017), Part 3, Sterlitamak, AMI, 2017, P. 116–118 (In Russ.).
20. Kovalevsky A. V. [Choice of rational milling modes for processing aluminum alloys]. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2008, No. 4 (73), P. 64–66 (In Russ.).
21. Vavilin V. A., Pasechnik K. A., Pushkarev A. Yu., Amelchenko N. A. [Features of mechanical processing of polymer composite materials]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2018, Vol. 1, No. 14, P. 12–14 (In Russ.).
22. Abd Halim N. F. H., Ascroft H., Barnes S. Analysis of tool wear, cutting force, surface roughness and machining temperature during finishing operation of ultrasonic assisted milling (UAM) of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Procedia Engineering*. 2017, Vol. 184, P. 185–191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.084>.
23. Meshkas A. E., Makarov V. F., Shirinkin V. V. [Technologies to improve the efficiency of processing composite materials by milling]. *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. Tekhnicheskie nauki*. 2016, No. 8-2, P. 291–299 (In Russ.).
24. Sturov A. A., Chashchin N. S. [Machining of a composite material using a robotic complex based on the Kuka KR210 robot]. *Vestnik Irkutskogo gos. tekhn. un-ta*. 2019. V. 23, no. 4 (147), p. 743–750 (In Russ.).
25. Minibaev M. I., Raskutin A. E., Goncharov V. A. Features of the technology for manufacturing samples from PCM on CNC machines (review). *Proceedings of VIAM*. 2019, No. 1 (73), P. 105–114. Doi: [10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114).
26. Raskutin A. E., Khrulkov A. V., Girsh R. I. Technological features of mechanical processing of composite materials in the manufacture of structural parts (review). *Proceedings of VIAM*. 2016, No. 9 (45), P. 106–118. Doi: [10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12).
27. Gordeev Yu. I. et al. [Influence of kinematic and technological parameters of rotary turning by multifaceted cutters on chip formation and surface roughness]. *Siberian journal of science and technology*. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 379–386 (In Russ.).
28. Gordeev Y. I., Yasinsky V. B., Spirin E. A. et al. Simulation of high-speed machining processes by multi-edge mills. *Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing*, 2022, Vol. 2373, No. 3, P. 032012. Doi: [10.1088/1742-6596/2373/3/032012](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/3/032012).
29. Binchurov A. S. et al. 2019 Influence of cutting modes on power characteristics of rotational turning by multifaceted cutters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (IOP Publishing 537 № 3). P. 032101. Doi: [10.1088/1757-899X/537/3/032101](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032101).
30. Timchenko A. I. *Tekhnologiya izgotovleniya detaley profil'nykh besshponochnykh soedineniy* [Technology for the manufacture of details of profile keyless joints]. Moscow, VNIITEMR Publ., 1988, 160 p.
31. Vakulin M. S., Gordeev Yu. I., Yasinsky V. B. Design of tools with the cutting part of the original profile for high-speed milling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 754(1), P. 012008. Doi: [10.1088/1757-899X/754/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899X/754/1/012008).
32. Gordeev Y. I. et al. Investigation of nanostructured hard metal composites obtained from powder mixtures (WC-Co)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing*. 2022, Vol. 2373, No. 3, P. 032025. Doi: [10.1088/1757-899X/754/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899X/754/1/012008).

33. Gordeev Y. I., Yasinsky V. B., Binchurov A. S. et al. Combined Application of Composite Powders WC-Co and Additives of Nanoparticles as an Effective Method of Improving the Properties of Hard Metals. *Key Engineering Materials*. 2018, Vol. 769, P. 134–140. Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.769.134>.

© Вакулин М. С., Гордеев Ю. И., Ясинский В. Б., Бинчуров А. С., Тимошев П. В., 2023

---

**Вакулин Максим Сергеевич** – инженер-технолог 3 категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»; аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: [mixdib@mail.ru](mailto:mixdib@mail.ru).

**Гордеев Юрий Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства; Сибирский федеральный университет. E-mail: [tms-mtf@rambler.ru](mailto:tms-mtf@rambler.ru).

**Ясинский Виталий Брониславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства; Сибирский федеральный университет. E-mail: [VYasinskiy@sfu-kras.ru](mailto:VYasinskiy@sfu-kras.ru).

**Бинчуров Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства; Сибирский федеральный университет. E-mail: [mexanixs@mail.ru](mailto:mexanixs@mail.ru).

**Тимошев Павел Викторович** – руководитель центра демонстрационного экзамена; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [timoshevpv@yandex.ru](mailto:timoshevpv@yandex.ru).

**Vakulin Maxim Sergeevich** – 3rd category process engineer, JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems” (RESHETNEV JSC); graduate student, Siberian Federal University. Tel.89135631797; E-mail: [mixdib@mail.ru](mailto:mixdib@mail.ru).

**Gordeev Yuri Ivanovic** – Cand. Sc., Associate Professor of Design-technology ensuring machine – building production; Siberian Federal University. E-mail: [tms-mtf@rambler.ru](mailto:tms-mtf@rambler.ru).

**Jasinski Vitaly Bronislavovich** – Cand. Sc., Associate Professor of Design- technology ensuring machine – building production; Siberian Federal University. E-mail: [VYasinskiy@sfu-kras.ru](mailto:VYasinskiy@sfu-kras.ru).

**Binchurov Aleksandr Sergeevich** – Cand. Sc., Associate Professor of Design-technology ensuring machine – building production; Siberian Federal University. E-mail: [mexanixs@mail.ru](mailto:mexanixs@mail.ru).

**Timoshev Pavel Viktorovich** – Head of the Demonstration Examination Center; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [timoshevpv@yandex.ru](mailto:timoshevpv@yandex.ru).

---