

УДК 621.9.025

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-8-303-14-16

*Н. В. Лукьянов, Ю. С. Багайсков, Д. М. Шарабаев***АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПРОФИЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ****Волжский политехнический институт (филиал)****Волгоградского государственного технического университета**

E-mail: nikitos-091999@mail.ru, bagaiskov@bk.ru, vto@post.volpi.ru

Представлен анализ современных направлений совершенствования профильного фрезерования, включая новые схемы обработки, конструкции фрез и методы оптимизации процесса. Рассмотрены инновационные решения, такие как фрезоточение с переменными угловыми скоростями, модульные и гибридные фрезы с улучшенной аэродинамикой, а также системы внутреннего охлаждения и динамической балансировки. Особое внимание уделено влиянию новых технологий на ключевые показатели: точность, шероховатость поверхности, жесткость, виброустойчивость, производительность. Прогрессивные предложения: оптимизации режимов резания, включая алгоритмы компенсации ошибок, применение аддитивных технологий для изготовления инструмента. На основе критического анализа выявлены наиболее перспективные направления развития для повышения эффективности и качества профильного фрезерования, такие как разработка специализированных САПР, внедрение IoT-мониторинга, использование нанокompозитных материалов.

Ключевые слова: профильное фрезерование, модульные фрезы, фрезоточение, фрезы-роутеры, компенсация ошибок, аддитивные технологии

*N. V. Lukyanov, Yu. S. Bagayskov, D. M. Sharabaev***ANALYSIS OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT
OF PROFILE MILLING****Volzhsky Polytechnic Institute (branch)
of Volgograd State Technical University**

The article presents an analysis of modern trends in improving profile milling, including new processing schemes, cutter designs, and process optimization methods. Innovative solutions such as variable-speed milling, modular and hybrid cutters with improved aerodynamics, as well as internal cooling and dynamic balancing systems are considered. Particular attention is paid to the impact of new technologies on key indicators: accuracy, surface roughness, rigidity, vibration resistance, productivity. Progressive proposals: optimization of cutting modes, including error compensation algorithms, the use of additive technologies for tool manufacturing. Based on the critical analysis, the most promising areas of development for improving the efficiency and quality of profile milling are identified. Such as the development of specialized CAD systems, the introduction of IoT monitoring, the use of nanocomposite materials.

Keywords: profile milling, modular cutters, milling, router cutters, error compensation, additive

Профильное фрезерование играет ключевую роль в машиностроении, особенно при обработке сложных поверхностей деталей для аэрокосмической, автомобильной и других высокотехнологичных отраслей. Требования при этом: достижение высокой точности формы и размеров, низкой шероховатости поверхности, эффективной обработки труднодеформируемых материалов, таких как титановые и алюминиевые сплавы или композиты. Особенно востребовано профильное фрезерование при изготовлении деталей с РК-профилями, равноосными контурами, циклоидальными и винтовыми поверхностями, где традиционные методы не обеспечивают нужного качества и производительности [1].

Для решения этих задач применяются различные виды фрезерования, включая торцевое, контурное, фрезоточение и высокоскоростную обработку. Торцевое фрезерование обеспечивает высокую точность при обработке плоских поверхностей, тогда как контурное используется для создания сложных профилей, включая равноосные контуры [2]. Фрезоточение, сочетающее вращение фрезы и заготовки, позволяет достичь высокой производительности и качества, особенно при обработке нестандартных форм, таких как треугольник Рело (рис. 1) или циклоидальные профили. Высокоскоростное фрезерование минимизирует дефекты при работе с композитами и жаропрочными материалами.



Рис. 1. Треугольник Рело

Инструментальная база профильного фрезерования включает сборные торцовые фрезы с твердосплавными сменными пластинами (СМП), модульные фрезы с настраиваемыми компонентами, фрезы-роутеры (рис. 2) для композитов и цельные твердосплавные фрезы для прецизионной обработки [4].

Известны конструктивные инновации, такие как оптимизированная геометрия режущих пластин (например, радиус при вершине $R_e = 0,8$ мм и задний угол $\alpha = 15^\circ$ для обработки жаропрочных сплавов), улучшенные стружколомы (например, типа К85) и модульные фрезы с аэроди-

намическими корпусами, позволяют снизить вибрации на 30 % и повысить эффективность резания [5]. Одним из перспективных направлений является фрезоточение с переменными угловыми скоростями, где управление соотношением скоростей фрезы и заготовки (например, 1:3) обеспечивает высокую точность и низкую шероховатость ($R_a \leq 0,8$ мкм) [2]. Другой инновацией стало высокоскоростное фрезерование с внутренним охлаждением, где фрезы с интегрированными каналами подачи СОЖ позволяют увеличить скорость резания на 20–30 % за счет снижения тепловых деформаций.

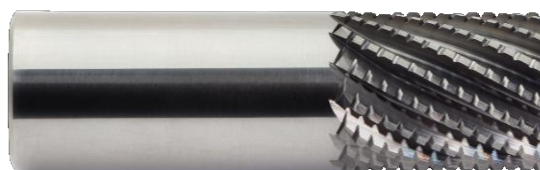


Рис. 2. Фреза-роутер для композитов

На рис. 3 показано сравнение достигаемой производительности и температуры при традиционном фрезеровании, фрезоточении и фрезеровании с внутренним охлаждением, подтверждающее эффективность новых разработок.

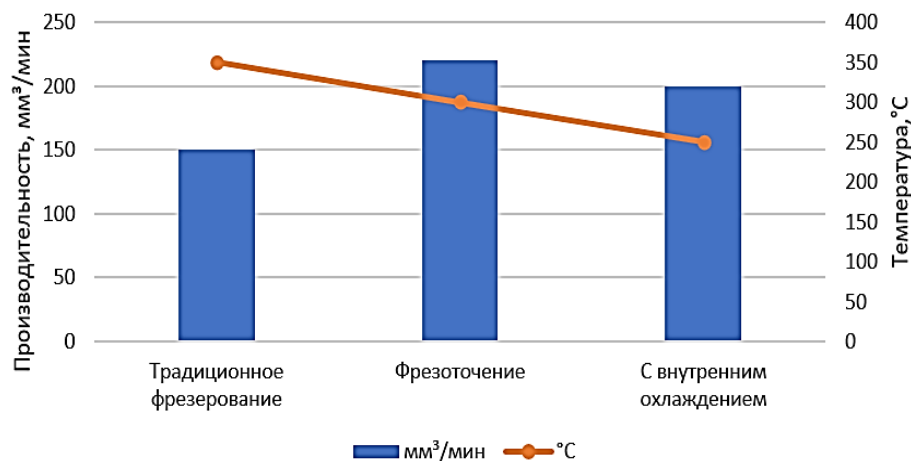


Рис. 3. Производительность и температура при традиционном фрезеровании, фрезоточении и фрезеровании с внутренним охлаждением

Для расчета режимов резания применяются алгоритмы, учитывающие динамические ошибки инструмента. Например, подача на зуб (f_z) определяется по формуле:

$$f_z = \frac{f' * x * \cos(\theta)}{z * 3.14 * Dm},$$

где f' – осевая подача, x – шаг винтовой линии, θ – угол смещения.

Дополнительно используются нейросетевые модели для прогнозирования динамических оши-

бок ($\Delta\delta$) с точностью до 4 мкм, что позволяет корректировать NC-коды, компенсируя отклонения инструмента [6].

Новые технологические решения включают аддитивные технологии для 3D-печати корпусов фрез, что сокращает время и стоимость производства на 30–50 %, повышает жесткость инструментов, а также системы охлаждения с многоканальными распределителями СОЖ, снижающие температуру в зоне резания на 40 % [6]. Динамиче-

ская балансировка с использованием спиральных пазов и регулируемых грузов уменьшает вибрации на 25 %, повышая стойкость инструмента.

Примеры влияния новых разработок на основные показатели профильного фрезерования приведены в таблице.

Влияние нововведений на показатели фрезерования

Параметр	Влияние нововведений	Пример улучшения
Точность	Компенсация динамических ошибок, оптимизация геометрии пластин	Уменьшение погрешности до 5 мкм
Жесткость	Гибридные конструкции (полимерные корпуса+металлические пластины)	Повышение жесткости на 15%
Виброустойчивость	Балансировочные механизмы, аэродинамические корпуса	Снижение вибраций на 15 %
Производительность	Высокоскоростное фрезерование, фрезоточение	Увеличение скорости резания на 20–30 %
Шероховатость	Оптимизация стружколома, точное управление режимами	$Ra \leq 0,8$ мкм

При проектировании технологий надо иметь в виду, что несмотря на преимущества, новые методы и конструкции имеют и недостатки: гибридные фрезы сложны в изготовлении, а алгоритмы компенсации ошибок требуют очень точной настройки.

Кроме вышеназванного перспективными направлениями развития профильного фрезерования являются:

- разработка универсальных САПР для проектирования фрез с учетом аэродинамики и тепловых деформаций;
- внедрение IoT-мониторинга износа инструмента в реальном времени;
- использование нанокompозитных материалов (например, WC-Co-Al₂O₃), повышающих термостойкость на 20 %.

В заключение можно отметить, что совершенствование профильного фрезерования требует комплексного подхода, объединяющего оптимизацию инструментов, внедрение инновационных схем обработки и цифровых технологий. Это позволит повысить точность, качество и производительность обработки сложно-профильных деталей, обеспечивая конкурентоспособность в высокотехнологичных отраслях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобанов, Д. В. Моделирование сборного лезвийного инструмента для обработки композиционных материалов / Д. В. Лобанов, М. В. Купцов, А. У. Запашева // Современные технологии: проблемы и перспективы : сб. ст. всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых. – Севастополь, 2020. – С. 27–33. URL: <https://disk.yandex.ru/i/Qf9AeSX92t4IJg>.

2. Исаев, А. В. Разработка системы исходных данных для проектирования сборных торцовых фрез / А. В. Исаев, М. С. Николаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 7. – С. 563–567. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-ishodnyh-dannyh-dlya-proektirovaniya-sbornyh-tortsovyh-frez>.

3. Вакулин, М. С. Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложнопрофильным инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов / М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский, А. С. Бинчуров, П. В. Тимошев // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24. – № 3. – С. 570–588. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-protsessov-vysokoskorostnogo-frezirovaniya-slozhnoprofilnym-instrumentom-pri-obrabotke-alyuminievyh-splavov-i>.

4. Куц, В. В. Снижение величины неравномерности стойкости зубьев сборной фрезы-протяжки при осевом фрезеровании РК-профильных валов / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 382–388. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-velichiny-neravnomernosti-stoykosti-zubiev-sbornoy-frezy-protyazhki-pri-osevom-frezirovanii-rk-profilnyh-valov>.

5. Попок, Н. Н. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3d-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 29–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-issledovaniya-rabotosposobnosti-frezernyhi-osevyh-rezhushchih-instrumentov-na-osnove-3d-prototipirovaniya>.

6. Schönecker R. I. E. et al. Fundamental Investigation of the Application Behavior and Stabilization Potential of Milling Tools with Structured Flank Faces on the Minor Cutting Edges (Фундаментальное исследование поведения при применении и потенциала стабилизации фрезерных инструментов со структурированными боковыми поверхностями на вспомогательных режущих кромках) // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8. – N. 4. – P. 174. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/4/174>.