

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ ЦЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

Высокос Сергей Дмитриевич

аспирант, ФГАОУ ВО Московский государственный технологический университет, РФ, г. Москва

Аннотация. В статье представлен обзор современных исследований, посвящённых проектированию и оптимизации стружечных канавок цельных концевых фрез. Основное внимание уделено влиянию переменной геометрии — угла наклона, глубины и сегментированного профиля — на стойкость инструмента, стабильность процесса и качество обработанной поверхности. Рассматриваются аналитические модели и численные методы, включая моделирование процесса резания и шлифования. Приведены количественные результаты, подтверждающие эффективность переменной геометрии при обработке труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: цельные концевые фрезы, стружечная канавка, переменная геометрия, угол спирали, глубина канавки, виброустойчивость, шлифование, стойкость инструмента.

Введение

Современные требования к обработке труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы, нержавеющие стали и жаропрочные сплавы, обуславливают необходимость разработки режущего инструмента с повышенной стойкостью, виброустойчивостью и способностью к эффективному отводу стружки. Ключевую роль в этом процессе играет геометрия стружечной канавки цельных концевых фрез, оказывающая влияние на характер резания и распределение нагрузок. Развитие CAD/CAM-систем, методов численного моделирования и технологий шлифования позволило перейти от традиционных канавок с постоянной геометрией к более сложным, адаптивным профилям, в том числе с переменным углом наклона, переменной глубиной и сегментированной структурой. В данной статье представлен обзор современных подходов к проектированию стружечных канавок, обсуждаются методы оптимизации и приведены результаты исследований влияния геометрических параметров на производительность и стойкость фрез.

1. Геометрия стружечной канавки: функциональные задачи и ограничения

Стружечная канавка выполняет несколько ключевых функций:

- отвод стружки из зоны резания;
- формирование режущей кромки;
- обеспечение жёсткости режущей части инструмента;
- улучшение условий резания за счёт контроля направления и формы стружки.

Основные параметры канавки включают:

- угол наклона винтовой канавки;
- глубину и ширину канавки;
- радиус кривизны профиля;

С увеличением объёма удаляемого материала и скорости резания возрастает нагрузка на фрезу, и от геометрии канавки зависит не только эффективность стружкоудаления, но и устойчивость режущей кромки к износу и поломке.

2. Переменная геометрия канавки и её влияние на характеристики инструмента

В работе Ding et al. (2023) проведено сравнение фрезы с градиентной спиральной кромкой (GHE) и фрезы с инвариантной геометрией спирали (IHE). Установлено, что сила фрезерования, перпендикулярная режущей поверхности GHE, была меньше на 16,98%, вибрации уменьшились на 29,83%, а качество поверхности улучшилось на 23,41%. Это подтверждает повышение стабильности процесса и эффективности резания при использовании переменной геометрии. Исследование Ding et al. (2023) показало, что использование градиентного угла спирали вдоль оси фрезы способствует подавлению вибраций и улучшает качество поверхности. Согласно результатам экспериментов, амплитуда вибраций снизилась до 35%, а шероховатость поверхности Ra уменьшилась с 1,84 до 1,26 мкм при обработке AISI H13.

В работе Hu et al. (2022) была проанализирована геометрия фрезы с переменной глубиной канавки и конической сердцевинной. При обработке титанового сплава TC4 достигнуто снижение силы резания на 18% и повышение стойкости инструмента на 42% по сравнению с фрезами с постоянной геометрией.

Исследование Li et al. (2023) рассматривает процесс шлифования стружечных канавок с неравными сегментами угла наклона. Представлены параметры сегментов: угол наклона варьируется от 30° до 45° на длине режущей части. Это обеспечивает равномерное распределение нагрузки и снижение вибраций, подтверждённое численным моделированием и экспериментами.

В работе Hu et al. (2022) была проанализирована геометрия фрезы с переменной глубиной канавки и конической сердцевинной. Показано, что такое исполнение позволяет существенно снизить уровень вибраций и нагрузку на инструмент при глубоком фрезеровании титановых сплавов.

Исследование Li et al. (2023) рассматривает процесс шлифования стружечных канавок с неравными сегментами угла наклона. Методика основана на компенсации смещения кромки и предотвращении интерференции профилей, что повышает точность изготовления и улучшает характеристики канавки.

3. Методы проектирования: аналитические и численные подходы

Математические модели позволяют оценить влияние основных параметров геометрии на характеристики резания. В частности, в работе Chen et al. (2017) представлен универсальный математический метод для расчёта сил резания при использовании фрез с переменной геометрией. Это даёт возможность прогнозировать поведение инструмента и оптимизировать его форму до этапа производства. Для более точной оценки используется метод конечных элементов (FEA). Ahmed et al. (2021) продемонстрировали применение FEA в сочетании с серым реляционным анализом для оптимизации геометрии шаровых фрез. Полученные результаты позволили выявить оптимальные значения угла спирали и глубины канавки для повышения стойкости инструмента.

4. Технологии изготовления и их влияние на реализацию переменной геометрии

Внедрение переменной геометрии требует высокой точности при шлифовании канавок. В работе Zheng et al. (2023) рассматривается метод финишной шлифовки конических фрез с переменным углом наклона, позволяющий добиться высокой повторяемости профиля и качества поверхности. Использование 4-осевой или 5-осевой шлифовки позволяет изготавливать сложные формы канавок, включая волнообразные и ступенчатые профили. Это значительно расширяет возможности по индивидуальной настройке инструмента под конкретные условия обработки. Важную роль также играет предварительное моделирование процесса шлифования, которое позволяет избежать ошибок формы и отклонений от проектной геометрии.

5. Влияние геометрии канавки на эффективность фрезерования

По результатам анализа исследований можно выделить основные закономерности:

- увеличение угла спирали повышает эффективность отвода стружки, но снижает жёсткость инструмента;
- переменная глубина канавки снижает вибрации и улучшает распределение напряжений (снижение силы резания до 18%, повышение стойкости инструмента до 42% — Hu et al., 2022);
- переменный угол наклона канавки способствует снижению амплитуды вибраций до 35% и улучшению качества поверхности на 23% (Ding et al., 2023);
- сложнопрофильные канавки позволяют регулировать толщину и форму стружки;
- использование сегментированных углов наклона от 30° до 45° приводит к равномерному распределению нагрузки и снижению вибраций (Li et al., 2023);
- оптимизация геометрии позволяет снизить силы резания до 20–30% и повысить стойкость инструмента на 30–50%.

Публикации Guo et al. (2020), Guo Y. et al. (2019) и Song et al. (2011) подтверждают, что комбинированные схемы переменной геометрии улучшают стабильность и производительность при фрезеровании труднообрабатываемых материалов.

Заключение

Переменная геометрия стружечной канавки является одним из ключевых направлений совершенствования цельных концевых фрез. Современные методы проектирования и технологии шлифования позволяют реализовать сложные профили, обеспечивающие улучшенный отвод стружки, снижение вибраций и повышение стойкости инструмента. На основе анализа литературы подтверждена высокая эффективность применения переменной геометрии, особенно при работе с титаном, нержавеющей сталью и сплавами на основе никеля. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией моделей резания и шлифования в единый оптимизационный процесс.

Список литературы:

1. Ding M., Wang X., Wang G., Ren Y., Fu Y. Research on design and cutting performance of gradient helix edge end mill // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129, No. 11–12. – P. 5005–5018. – DOI: 10.1007/s00170-023-12100-3. – Preprint: <https://www.researchsquare.com/article/rs-2650717/v1> // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129, No. 11–12. – P. 5005–5018. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/375607849>

2. Hu X., Wang M., Lu Y., Wang Y., Wang L. Research on Milling Characteristics of Titanium Alloy TC4 with Variable Helical End Milling Cutter // *Machines*. - 2022. - Vol. 10, No. 7. - P. 537. - URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/7/537>
3. Li Y., Li Z., Wang S., Liu Y., Wang J. A Grinding Process Method of Solid End Mills Groove with Segmented Unequal Helical Angles by Cutting Edges Offset and Interference // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2023. - Vol. 102. - P. 849-864. - URL: <https://www.researchgate.net/publication/373763612>
4. Chen D., Wang X., Lu Y., Xu X. A unified analytical cutting force model for variable helix end mills // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2017. - Vol. 92, No. 9-12. - P. 3167-3185. - URL: <https://disk.yandex.ru/i/H6ceEHbHRzROBA>
5. Ahmed F., Ahmad S., Raza A., Ahmed N., Ali A. Tool Geometry Optimization of a Ball End Mill Based on Finite Element Simulation of Machining the Tool Steel-AISI H13 Using Grey Relational Method // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. - 2021. - Vol. 22, No. 7. - P. 1191-1203. - URL: <https://www.researchgate.net/publication/352045132>
6. Zheng G., Li Y., Lu Y., et al. A novel method for flute grinding of conical end milling cutter // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2023. - Vol. 126, No. 3-4. - P. 907-917. - URL: <https://www.researchgate.net/publication/368605832>
7. Guo Q., Jiang X., Liu Y., et al. Study on the stability for non-uniform helix angle tools in the milling process // *Journal of Industrial and Production Engineering*. - 2020. - Vol. 37, No. 8. - P. 387-393. - URL: <https://www.researchgate.net/publication/343434265>
8. Guo Y., Lin B., Wang W. Optimization of variable helix cutter for improving chatter stability // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - Vol. 104, No. 5-8. - P. 2553-2565. - URL: <https://disk.yandex.ru/d/aICJyS3UBC5Wzw>
9. Song Q., Ai X., Zhao J. Design for variable pitch end mills with high milling stability // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2011. - Vol. 55, No. 9-12. - P. 891-903. - URL: <https://www.researchgate.net/publication/225477740>