

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ ЦЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

Высокос Сергей Дмитриевич

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

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к повышению эффективности цельных концевых фрез за счёт применения переменной геометрии режущей части. Описаны основные типы конструктивных решений: неравномерный шаг зубьев, переменный угол наклона винтовой канавки, переменная глубина канавки и волнообразная режущая кромка. На основе анализа публикаций отечественных и зарубежных авторов показано, как такие геометрические модификации влияют на устойчивость процесса фрезерования, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности. Обобщены результаты исследований, подтверждающие целесообразность применения комбинированных решений для повышения производительности и надёжности обработки труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: цельные концевые фрезы, переменная геометрия, переменный шаг, угол наклона канавки, виброустойчивость, стружкоотвод, стойкость инструмента, качество поверхности, труднообрабатываемые материалы.

Введение

Современная промышленность предъявляет всё более жёсткие требования к обработке труднообрабатываемых материалов — титана, нержавеющей и жаропрочных сталей. Для таких условий традиционные режущие инструменты часто оказываются недостаточно эффективными. В связи с этим особое внимание уделяется геометрии режущей части цельных твердосплавных концевых фрез, от которой напрямую зависят стойкость, виброустойчивость и качество обработки.

Один из перспективных подходов — применение переменной геометрии режущей части фрезы. К наиболее часто используемым видам переменной геометрии относят: неравномерный шаг зубьев, переменный угол наклона винтовой канавки, переменную глубину канавки, волнообразную режущую кромку, а также их сочетания. В данной статье рассмотрено, как каждый из этих видов влияет на устойчивость процесса, стойкость инструмента и качество обработки, на основе современных исследований.

1. Влияние различных видов переменной геометрии на эффективность фрез

1.1 Неравномерный шаг зубьев.

Использование неравномерного шага зубьев — одно из наиболее распространённых решений для повышения стабильности фрезерной обработки. При равномерном шаге каждый зуб инструмента вступает в резание с одинаковыми интервалами, что может вызывать резонансные колебания. Неравномерный шаг разрушает эту периодичность, препятствуя развитию автоколебаний и дрожания.

Как показано в исследовании Otto et al. (2016), фрезы с неравномерным шагом обладают

существенно большей зоной стабильной работы, что позволяет увеличить глубину резания и подачу без ухудшения качества поверхности. Это особенно эффективно при высокоскоростном фрезеровании, где устойчивость системы «станок-инструмент-деталь» критична.

1.2 Переменный угол наклона винтовой канавки

Переменный угол спирали обеспечивает комбинацию преимуществ пологой и крутой винтовой канавки. В зоне режущей кромки более крутая спираль улучшает отвод стружки, а ближе к хвостовику пологая спираль повышает жёсткость инструмента.

Исследование Ding et al. (2023) показало, что такая геометрия способствует снижению вибраций и повышает стойкость инструмента. Плавное изменение угла винтовой канавки также обеспечивает более равномерное распределение нагрузки между зубьями, снижая риск микровыкрашивания.

1.3 Переменный радиус стружечной канавки

Одним из наиболее перспективных направлений является реализация переменной глубины стружечной канавки вдоль оси инструмента. Это означает, что сердцевина фрезы постепенно утолщается от вершины к хвостовику. Такая геометрия позволяет совместить повышенный объём канавки для стружки в режущей части с увеличенной жёсткостью у хвостовика.

Работа Hu et al. (2022) демонстрирует, что применение конусной сердцевины повышает устойчивость инструмента к изгибу, снижает уровень вибраций и улучшает теплоотвод через стружку. Это особенно важно при глубоком фрезеровании титановых сплавов, где высока вероятность перегрева и вибрационного разрушения.

1.4 Волнообразная (синусоидальная) режущая кромка

Некоторые фрезы имеют зубья с волнообразной режущей кромкой, что позволяет дробить стружку на более мелкие фрагменты. Это способствует улучшению отвода стружки, особенно при черновой обработке вязких материалов.

Как отмечено в описаниях промышленных инструментов (например, Crest-Kut), такая кромка уменьшает нагрузку на каждый отдельный зуб, способствует более плавному ходу и снижает уровень шума. Дополнительным плюсом является повышение срока службы инструмента за счёт равномерного износа кромок.

1.5 Комбинированные решения

Наибольший эффект достигается при одновременном применении нескольких типов переменной геометрии: неравномерного шага, переменного угла спирали и переменной глубины канавки. Такие фрезы (например, серии HARVI II от Kennametal) демонстрируют высокую производительность, минимальные вибрации и отличное качество обработки.

Объединение этих решений позволяет одновременно решить сразу несколько задач:

подавление дрожания и резонансных колебаний,

улучшение отвода стружки,

повышение жёсткости инструмента,

увеличение стойкости к износу,

обеспечение высокой чистоты обработанной поверхности.

Заключение

Применение переменной геометрии в конструкции цельных концевых фрез доказало свою эффективность в условиях обработки трудных материалов. Каждое из рассмотренных решений вносит вклад в повышение стабильности, качества и стойкости инструмента. В сочетании они обеспечивают значительное улучшение производительности и надёжности фрезерного процесса.

Дальнейшее развитие данного направления связано с численным моделированием и экспериментальной оптимизацией параметров переменной геометрии под конкретные условия обработки.

Список литературы:

1. Ding M., Li J., Zhao W., et al. 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.
2. Otto A., Denkena B., Biermann D., et al. Stability of milling with non-uniform pitch and variable helix Tools // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 89, No. 9-12. P. 2613-2625.
3. Hu X., Song Q., Li L., et al. Research on Milling Characteristics of Titanium Alloy TC4 with Variable Helical End Milling Cutter // Machines. 2022. Vol. 10, No. 7. P. 537.
4. Buranský I., Bračák M., Šimna V. Influence of End Mill Helix Angle on Surface Quality of Aluminium Thin-Walled Parts // Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. 2018. Vol. 26, No. 42. P. 177-188.
5. 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.
6. Yu H., Zhang W., Liu Y., et al. Research on chip flute design of variable pitch variable helix end milling cutter based on manufacturability // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 120. P. 478-492.
7. Ahmed F., Qamar S. Z., Ali M. Y., et al. 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.