

УДК 621.91.01

Расчетное определение геометрических параметров зубьев режущей части концевых фрез

Леквеишвили Мария Анатольевна

m.shaparovskaya@mail.ru

Владимирский государственный университет имени А.Г и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. Работа посвящена повышению стойкости концевых фрез при обработке деталей из титанового сплава ВТ6 путем расчетного определения геометрических параметров зубьев режущей части. В работе использован теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный способ повышения работоспособности предложенных фрез путем управления формой передней поверхности инструмента, что позволяет снизить нагрузки на технологическую систему и обеспечить повышение стойкости инструмента. Программное обеспечение методики расчета силовых параметров и геометрических параметров режущей части концевой фрезы базируется на аналитической модели резания. Результаты сравнительных испытаний на стойкость показали повышение периода стойкости опытной концевой фрезы на 15 % при обработке уступа титанового сплава ВТ6.

Ключевые слова: концевая фреза, передний угол, сила резания, удельная работа разрушения, деформационное упрочнение, стойкость инструмента, титановый сплав ВТ6

Calculation of the geometric parameters of teeth of a cutting part of the end mills

Lekveishvili Maria Anatolievna

m.shaparovskaya@mail.ru

Vladimir State University, Vladimir, Russia

Abstract. The paper is devoted to increasing the tool life of end mills when processing parts from titanium alloy VT6 by calculating the geometric parameters of the teeth of the cutting part. The work uses a theoretically substantiated and experimentally confirmed method for increasing the performance of the proposed cutters by controlling the shape of the rake face of the tool, which allows reducing loads on the technological system and ensuring an increase in the tool life. The software for the calculation method of power parameters and geometric parameters of the cutting part of end mill is based on an analytical cutting model. The results of comparative tests for durability showed an increase in the tool life of the experimental end mill by 15% when machining a shoulder of titanium alloy VT6.

Keywords: end mill, rake angle, cutting force, specific work of fracture, strain hardening, tool life, titanium alloy VT6

Введение. Концевые фрезы являются наиболее широко используемым режущим инструментом в процессах механической обработки. Часть фрезерных операций осуществляется в условиях неэффективного производства. Одним

из факторов, влияющим на снижение эффективности, является некорректное применение инструмента для заданных условий обработки [1], что ведет к преждевременной потере режущих свойств концевых фрез.

В процессе затупления или повреждения режущей кромки инструмента его свойство удалять материал с поверхности заготовки ухудшается. Простой оборудования при смене изношенного или разрушенного инструмента ведут к увеличению оперативного времени обработки и к снижению показателей производительности [2, 3]. Сокращение оперативного времени обработки заготовок возможно при увеличении периода стойкости инструмента за счет более редких смен инструмента [2, 4]. Передний угол режущей части инструмента оказывает непосредственное влияние на процесс стружкообразования: по мере увеличения переднего угла режущей части инструмента от отрицательных до положительных значений главная составляющая силы резания уменьшается, снижается температура резания, а период стойкости увеличивается [5].

Материалы и методы. На базе аналитической модели косоугольного резания [6, 7] разработана методика расчета силовых параметров резания концевыми фрезами [8]. Полученные физические уравнения легли в основу программного комплекса EndMills [9]. Программное обеспечение позволяет оперативно оценить силовые параметры резания, их зависимость от режимов обработки, геометрические параметры винтового и торцового режущих зубьев концевых фрез. Выбор углов выполняется, исходя из условия минимума сил для заданных условий. На рис. 1 в табличном виде показано, что существует такое значение переднего угла, при котором сила резания минимальная.

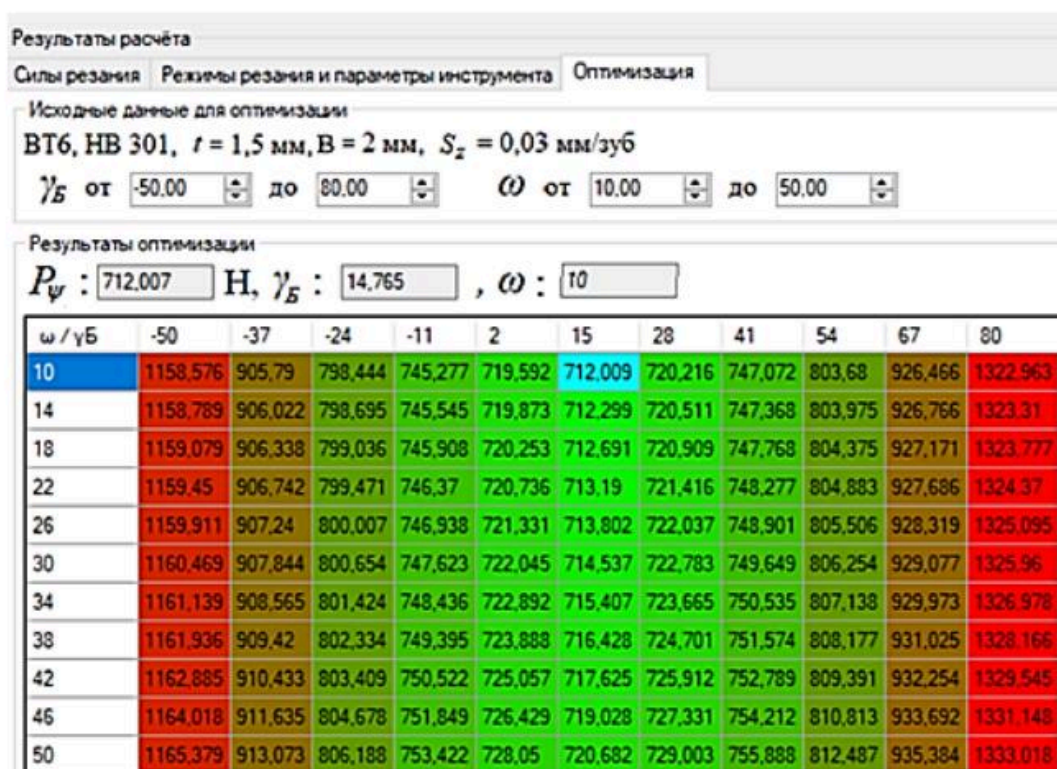


Рис. 1. Зависимость окружной силы от переднего угла на винтовом зубе в табличном виде

На этапе проектирования опытной концевой фрезы для титанового сплава ВТ6 при обработке уступа значение переднего угла режущей части винтового зуба назначено из расчета по программе EndMills: передний угол на винтовом зубе $\gamma_6 = 15^\circ$ и передний угол на торцовом зубе $\gamma_T = 13^\circ$. Опытная монолитная концевая фреза с назначенным передним углом винтового зуба для обработки заготовок из титанового сплава ВТ6 была спроектирована и изготовлена. Материал инструмента — твердый сплав ВК8 с покрытием режущей части nAlCo [10]. Конструкционные и геометрические параметры опытной фрезы приведены на рис. 2.

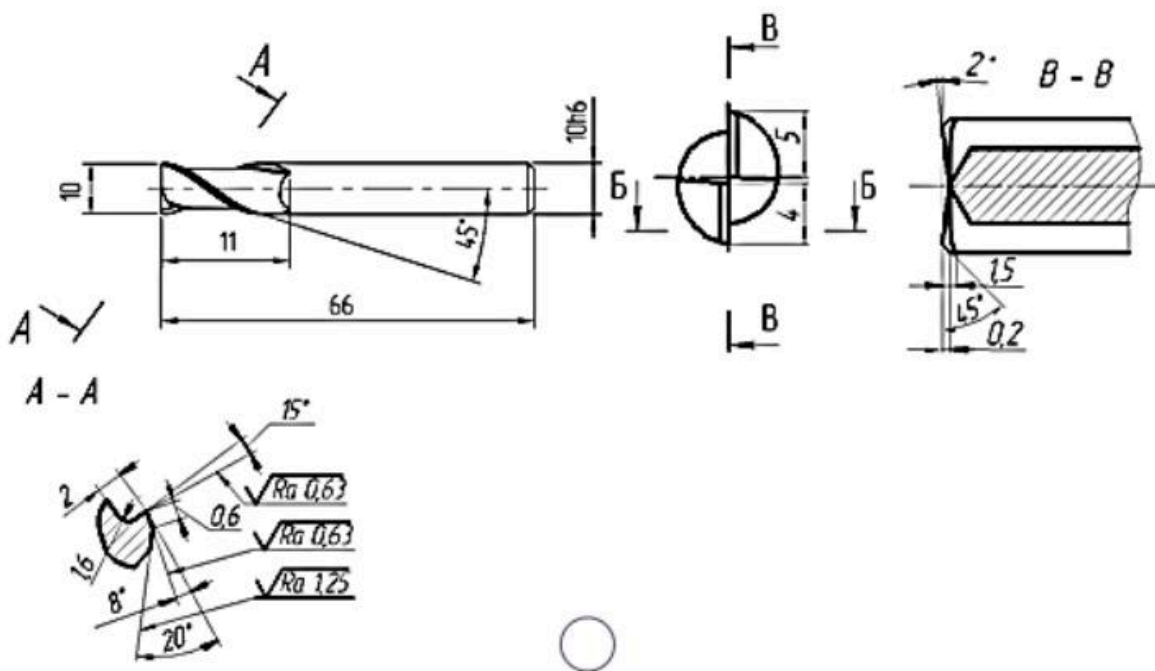


Рис. 2. Эскиз с размерами опытной фрезы для обработки титанового сплава ВТ6

Результаты. С целью сопоставления результатов фрезерования заготовки из титанового сплава ВТ6 опытной фрезой по сравнению с результатами фрезерования стандартными фрезами проведены сравнительные стойкостные испытания.

Передние углы на винтовом зубе у стандартных фрез назначены по рекомендациям, изложенным в каталоге фирмы «Sandvik Coromant» ($\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$) [11] и в книге по обработке титановых сплавов резанием ($\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$) [12].

Ускорение процесса испытания стойкости спроектированной фрезы обеспечено предельными режимами по скорости резания для получистовой обработки уступа из титанового сплава ВТ6: скорость резания $v = 110$ м/мин, глубина фрезерования $t = 1,5$ мм, подача на зуб $s_z = 0,03$ мм/зуб, ширина резания $B = 2$ мм.

Фрезерование выполнено на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ фирмы Dugard EAGLE 1500 с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Контроль величины износа и выкрашиваний инструмента проведен с помощью лупы с 8-кратным увеличением. Вид и состояние режущих кромок по каждому зубу фрезы зафиксировано в электронном виде на фото с помощью микроскопа Zeiss Axio. Критерием предельного износа для титанового сплава ВТ6 принята ширина фаски износа по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм [10]. Состояние зубьев испытываемых фрез при обработке уступа показано на рис. 3.

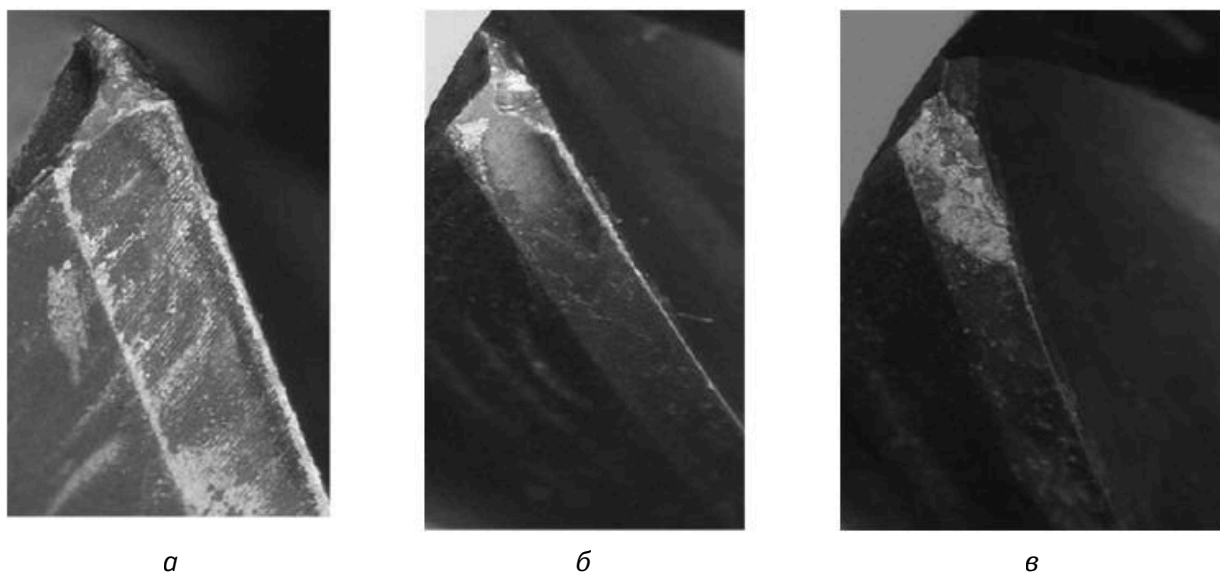


Рис. 3. Состояние режущих зубьев испытываемых фрез:

а — фреза с $\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$ (время работы 7,6 мин); *б* — фреза с $\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$ (время работы 8 мин); *в* — фреза с $\gamma_B = 15^\circ$ и $\gamma_T = 13^\circ$ (время работы 8,75 мин)

Обсуждение полученных результатов. В ходе сравнительных испытаний стойкости режущего инструмента при обработке уступа установлено, что период стойкости фрезы с передними углами $\gamma_B = 15^\circ$ и $\gamma_T = 13^\circ$, назначенными по программе EndMills, на 9,38 % превышает период стойкости фрезы с передними углами $\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$ и на 15,13 % превышает период стойкости фрезы с передними углами $\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$. Физический смысл влияния положительного переднего угла на процесс стружкообразования объясняется тем, что чем больше передний угол, тем больше угол сдвига [13]. Увеличение угла сдвига приводит к снижению коэффициента усадки стружки. Снижение коэффициента усадки стружки ведет к снижению пластической деформации и к уменьшению мощности резания, которая затрачивается на пластическую деформацию в зоне стружкообразования. Изменение мощности резания, затрачиваемой на пластическую деформацию, приводит к изменению величины мощности резания, затрачиваемой на весь процесс резания [1].

Заключение. Разработанное программное обеспечение EndMills позволяет в режиме реального времени для заданных условий определить силовые параметры процесса, их зависимость от режимов обработки и от геометрии режущей части концевых фрез. Кроме того, программа позволяет сделать выбор передних углов винтового и торцового зубьев. Расчет по программе EndMills определены передние углы зубьев фрезы для обработки титанового сплава ВТ6, исходя из условия минимума сил для заданных условий. Выполнено сопоставление результатов фрезерования заготовки из титанового сплава ВТ6 модернизированной фрезой по сравнению с результатами фрезерования стандартными фрезами. Достигнуто повышение периода стойкости модернизированной концевой фрезы на 15 % при обработке уступа титанового сплава ВТ6. Применение научно обоснованной методики расчета процесса резания позволило сократить сроки на отработку геометрических параметров режущей части концевых фрез по сравнению с экспериментальным методом.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, Госзадание ВлГУ).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Astakhov V.P., Xiao X. The Principle of Minimum Strain Energy to Fracture of the Work Material and Its Application in Modern Cutting Technologies. *Metal Cutting Technologies: Progress and Current*. Berlin, Boston, De Gruyter Oldenbourg, 2016, pp. 1–35. <https://doi.org/10.1515/9783110451740-004>
- [2] Локтев Д.А. Исследование влияния элементов технологической системы на эффективность высокопроизводительной обработки на обрабатывающих центрах. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2003, 223 с.
- [3] Vagnorius Z., Rausand M., Sørby K. Determining optimal replacement time for metal cutting tool. *European Journal of Operational Research*, 2010, no. 206, pp. 407–416.
- [4] Эстерзон М.А., Нахова Т.М. Технология обработки на станках с ЧПУ. *Стружка*, 2004, № 4 (7), с. 26–30.
- [5] Singh K.K., Bahuguna A., Pant R. Effect of rake angles and material properties on chip formation: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2014, vol. 3, pp. 696–700.
- [6] Оленин Л.Д. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2008, № 1, с. 183–190.
- [7] Оленин Л.Д., Сторчак М.Г., Леквеишвили М.А. К разработке аналитической модели ко-соугольного резания. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2014, т. 8, № 1–2, с. 123–128. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67804>
- [8] Davydov N., Lyukhter A., Lekveishvili M. Calculation Models for a Priori Assessment of Power Parameters and Milling Modes of Difficult-to-Machine Metals of Supporting Structures. *Proceedings of MPCPE 2024. MPCPE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2025, vol. 576, pp. 91–101. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81635-2_10
- [9] Люхтер А.Б., Леквеишвили М.А., Оленин Л.Д. Программа расчета геометрии концевых фрез EndMills. Свидетельство № 2024614116 РФ, 2024.

-
- [10] Давыдов Н.Н., Люхтер А.Б., Леквеишвили М.А. *Концевая фреза*. Патент № RU226849U1 РФ, 2024.
 - [11] *Sandvik Coromant. Точение. Фрезерование. Сверление: каталог продукции*. Москва, ООО «Сандвик», 2007, 208 с.
 - [12] Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. *Обработка резанием титановых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1970, 184 с.
 - [13] Balaji H., Krishnaraj V., Yogeswaraj S. Investigation on high speed turning of titanium alloys. *Procedia Engineering*, 2013, no. 64, pp. 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>