

АНАЛИЗ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Микрофрезерование является широко используемым производственным методом обработки. Основной целью данного исследования является анализ сил резания в коррозионно-стойкой, жаропрочной стали 14X17H2. Исследования полного факторного эксперимента по обработке стали 14X17H2 проводились с использованием микроконцевой фрезы с покрытием AlTiN. Были разработаны новые математические модели силы резания и осевой силы, которые адекватно способны прогнозировать и оптимизировать силы, действующие на режущий инструмент. Получены графики расчета минимально необходимой подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечиваются максимальные силы резания и осевые силы, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента при микрофильмировании. Полученные математические модели описывают с 90 %-ной и более точностью полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: производство, фреза, силы резания, подача на зуб, стратегия фрезерования, встречное фрезерование, попутное фрезерование, канавочное фрезерование.

Введение. Важность процессов микрообработки сильно возрастает, поскольку промышленность требует еще большего количества точных миниатюрных компонентов деталей. Микрофрезерование является очень многообещающей технологией, поскольку оно способно производить даже сложные 3D-геометрии с высокой точностью и относительно высокой скоростью съема материала [1]. Хотя кинематика процесса микрофрезерования аналогична кинематике обычного фрезерования, он обладает большим количеством проблем из-за уменьшенного размера режущего инструмента. Характерный диапазон размеров на детали составляет от 1 до 999 мкм; поэтому размер применяемых микроинструментов обычно находится в этом же диапазоне [2].

1. Постановка задачи. При микрофрезеровании основными проблемами являются относительно большое биение и деформация инструмента [3]. При этом необходимо учитывать величину подачи на зуб и глубину резания, сравнимые с радиусом фрезы, так как они оказывают существенное влияние на силы резания и стойкость режущего инструмента [4].

2. Теория. На основании последних научных работ отношение минимальной толщины стружки к радиусу округления режущей кромки составляет от 0,22 до 0,36 [5]. Влияние сил резания имеет большое значение при микрофрезеровании, так как малогабаритный и легкий инструмент более чувствителен к силам, чем при обычном фрезеровании. Относительно высокие силы резания могут привести к значительной деформации фрезы [6]. Как известно, силы зависят от параметров резания, причем в случае микро размеров существенное влияние на эффективные углы резания оказывают

геометрия инструмента и применяемые параметры резания [7].

В работе [8] представлена аналитическая модель силы резания и модель для оценки деформации инструмента. В аналитической модели рекомендовали учитывать биение инструмента, радиус режущей кромки, скорость резания, угол наклона винтовой спирали и передний угол фрезы. Эта модель учитывает эффект износа инструмента, который основан на ранее представленной трехмерной динамической аналитической модели оценки силы резания [9], которая также учитывает размерный эффект, упругое пружинение материала и износ инструмента. Как известно, возникновение неконтролируемой силы резания может привести к ухудшению качества поверхности, а также к выходу инструмента из строя из-за нестабильных режимов резания [10]. Учитывая особые характеристики процесса микрофрезерования, такие как относительно большое биение и деформация небольшого инструмента (диаметр < 1 мм), очень сложно смоделировать динамическое поведение процесса [11]. Наиболее распространенной формой автоколебаний является регенеративная вибрация, вызывающая нестабильность в процессе резания [12]. Это одно из основных препятствий для повышения производительности и качества изготавливаемых микрофрезерованием деталей [13].

В работе [14] проанализировали возникновение осевой силы и силы резания, основываясь на характерном узоре, оставленном на поверхности микрофрезой, и на основе частотноспектрального анализа сил резания. Подобные наблюдения анализа сил резания имеет большое значение при изучении механики и динамики процесса микрофрезерования, поскольку имеет тесную взаимосвязь с вибрациями

Факторы и уровни эксперимента

Фактор	Уровень	Значение
Глубина резания t (μm)	3	25, 50, 100
Подача на зуб f_z (μm)	7	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12
Стратегия фрезерования	3	Встречное фрезерование, Попутное фрезерование, Канавочное фрезерование

Таблица 2

Матрица эксперимента и полученные результаты испытаний

	Изменяемое значение		Силы при встречном фрезеровании		Силы при канавочном фрезеровании		Силы при попутном фрезеровании	
	f_z (мм)	t (мм)	F_c , Н	F_z , Н	F_c , Н	F_z , Н	F_c , Н	F_z , Н
1	1	25	0,6	1,7	0,4	1,3	0,5	1,7
2	2	25	1,1	2,3	0,7	1,5	0,8	1,9
3	4	25	2	1,8	1,4	1,8	1,4	2
4	7	25	2,3	2	2,1	2,8	2	2,3
5	9	50	1,4	1,9	2,2	1,6	2,4	3
6	10	50	1,6	2	3,0	1,9	2,6	3
7	11	50	1,7	2,3	2,4	2,2	2,9	3,6
8	12	50	1,9	2,6	2,8	2,8	3,3	3,6
9	2	50	0,6	0,4	1,3	0,7	1,2	2,7
10	3	100	3,7	3,1	5,0	1,4	3,4	3
11	5	100	3,9	3,2	5,3	1,9	3,8	3,2
12	6	100	4,6	3,4	5,8	2	4,4	3,6
13	8	100	5,2	3,5	6,1	2,8	5,4	3,7
14	9	100	5,6	3,7	6,9	2,9	5,8	3,8

[15]. На основании ранее полученных исследований [16] регенеративные эффекты сильнее в случае обработки микроразмеров, чем в случае при обработке макроразмеров. Причину этого явления можно найти и во влиянии на стружкообразование небольшой теоретической толщины стружки, и во влиянии относительно большого радиуса режущей кромки.

В последнее время в секторе научных разработок, посвященных микрофрезерованию, недостаточно работ, посвященных выбору режима резания для обработки различных материалов. Основываясь на упомянутых выше пробелах в исследованиях, основной целью данной статьи является исследование влияния параметров резания на силу резания и осевую силу в коррозионностойкой закаленной стали. Еще одна цель состоит в том, чтобы проанализировать влияние стратегий фрезерования на характеристики выходных параметров получаемых при обработке.

3. Проведение эксперимента и его результаты. Для анализа сил резания использовался станок с ЧПУ Mazak серии VARIAXIS j-500. Этот ЧПУ применялся для двух различных стратегий обработки — линейного и трохойдального фрезерования. Станок серии VARIAXIS j-500 представляет собой вертикальный обрабатывающий центр с функцией отображения сил резания, оказывающих влияние на шпиндель.

Образец для испытаний имеет прямоугольную форму размером 50×120×50 мм из легированной,

коррозионностойкой, жаропрочной стали 14X17H2. Сталь 14X17H2 содержит углерода 0,14 %, X17 — указывает на 17 % содержания хрома, H2 — указывает на 2 % содержания в стали никеля.

Нержавеющая сталь 14X17H2 применяется для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах и при пониженных температурах. Наибольшей коррозионностойкостью обладает после закалки с высоким отпуском. Из нержавеющей стали 14X17H2 изготавливают диски, валы, втулки, фланцы, крепеж и другие детали для топливно-регулирующей аппаратуры авиационного назначения.

Обработка велась двузубыми фрезами диаметром 500 мкм с покрытием AlTiN и радиусом при вершине 50 мкм с передним углом фрезы 3°, задний угол фрезы 7° и угол наклона винтовой канавки фрезы 15°.

Эксперименты были спланированы методом полного факторного эксперимента с изменениями глубины резания, подачи на зуб и стратегии фрезерования. Факторы и их уровни были выбраны на основе экспериментальной работы [16] и предложений производителя инструмента. Скорость резания была установлена на 90 м/мин, а радиальная глубина резания была установлена на 50 % от диаметра режущего инструмента (в случае встречного и попутного фрезерования). Независимые переменные и их уровни перечислены в табл. 1.

Одной из важнейших характеристик процессов резания является сила резания [17], так как она

Полученные значения математических моделей

Значение для зависимости	Уравнение 1	Уравнение 4	Уравнение 2	Уравнение 5	Уравнение 3	Уравнение 6
Множество R	0,983421	0,95268	0,991528	0,958547	0,984669	0,977358
Множество R2	0,96711	0,90761	0,98312	0,918814	0,969573	0,955230
F(3,10)	98,03620	32,74871	194,24038	37,72471	106,21963	71,12147
p	0,00000010264	0,0000175	0,00000000368	0,00000922	0,0000000697	0,00000047771

дает актуальную информацию о механизме съема материала, вибрации, деформации инструмента и его биении. В рамках этого исследования были проанализированы равнодействующая сила резания (F_c) и осевая сила (F_z). F_c была рассчитана на основе следующего уравнения:

$$F_c = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} \quad (1)$$

Таблица плана эксперимента и полученные результаты испытаний представлены в табл. 2. Определение зависимости $F_c = f(t, fz)$ и $F_z = f(t, fz)$ выполнялось в программе для статистического анализа и визуализации данных Statistica.

Сила резания F_c в основном увеличивается с увеличением глубины резания t при встречном, канавочном и попутном фрезеровании. Силы F_c при встречном фрезеровании выше, чем при канавочном фрезеровании. Однако это явление имеет ограниченное увеличение до подачи на зуб при половине диаметра ($fz > 6$ мкм) или равна радиусу при вершине инструмента. Возможная причина в явлениях утончения стружки, вызванных меньшим главным углом режущей кромки из-за углового радиуса и малых значений глубины резания. В этом случае условия резания приводят к более высоким осевым усилиям, что хорошо видно в таблице полученных экспериментальных значений F_z (табл. 3). При всех стратегиях фрезерования осевая сила F_z увеличивается с увеличением fz . Самые большие силы F_z и F_c наблюдались при фрезеровании канавок с $t = 100$ мкм и $fz = 9$ мкм, что можно объяснить удвоенным сечением стружки по сравнению со стратегиями фрезерования по кромке заготовки.

Максимальные полученные значения F_c при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 23 %. Максимальные полученные значения F_z при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 3 %.

Минимальные полученные значения F_c при всех трех стратегиях фрезерования отличаются не более чем на 30 %. Минимальные полученные значения F_z при всех трех стратегиях фрезерования отличаются не более чем на 3 %.

4. Разработка математических моделей зависимости силы резания и осевой силы резания от подачи на зуб и глубины резания для встречного, канавочного и попутного фрезерования. Определение зависимости $F_c = f(t, fz)$ и $F_z = f(t, fz)$ для трех стратегий фрезерования выполнялось в программе для статистического анализа и визуализации данных Statistica. Полученные характеристики математических значений представлены в табл. 3 и табл. 4. Коэффициент детерминации у всех полученных моделей выше 0,95, т.е. 95 % и более колебаний изучаемых значений F_c и F_z описывается данными

Таблица 4

Полученные значения коэффициентов регрессии и их уровень значимости в полученных математических моделях

Св. член	Уравнение 1		Уравнение 2		Уравнение 3		Уравнение 4		Уравнение 5		Уравнение 6	
	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.
fz (mm)	3,900313	0,000070	3,569106	0,015300	3,315072	0,000005	1,279393	0,044774	0,663133	0,049851	0,097280	0,000170
t (mm)	0,201126	0,000142	0,148780	0,000053	0,214259	0,000001	-0,058968	0,038166	0,255816	0,000010	0,044495	0,007016
ap ²	-0,163736	0,000108	-0,110420	0,013349	-0,109987	0,000056	0,000759	0,002221	-0,000226	0,000043	-0,000226	0,046294

ми моделями. Значение F-критерий Фишера выше табличного у всех разработанных математических моделей, поэтому все модели статистически значимы и объясняют общую дисперсию полученных данных при эксперименте (табл. 2). Коэффициенты регрессии глубины резания (t), глубины резания (t), возведенной во вторую степень, и подачи на зуб (fz) являются статистически значимыми у моделей, описывающих изменение сил резания (F_c) и осевых сил (F_z) от глубины резания (t) и подачи на зуб (fz) (табл. 3). Уровень значимости (p) у всех уравнений меньше 0,05, поэтому данные модели пригодны для использования (табл. 4).

Сила резания (F_c) может быть рассчитана на основе уравнения (1) для встречного фрезерования, уравнения (2) для канавочного фрезерования и уравнения (3) для стратегии попутного фрезерования. Соответствующие R2 значения составляют 96,71 %, 98,31 % и 96,95 % соответственно.

$$F_c = 0,001583ap^2 - 0,163736t + 0,201126fz + 3,900313; \quad (1)$$

$$F_c = 0,001023ap^2 - 0,073017t + 0,207810fz + 1,605086, \quad (2)$$

$$F_c = -0,000226ap^2 + 0,044495t - 0,097280fz + 0,663133. \quad (3)$$

Сила резания (F_z) может быть рассчитана на основе уравнения (4) для встречного фрезерования, уравнения (5) для канавочного фрезерования и уравнения (6) для стратегии попутного фрезерования. Соответствующие R2 значения составляют 90,76 %, 91,88 % и 95,52 % соответственно.

$$F_z = 0,000993ap^2 - 0,110420t + 0,148780fz + 3,569106, \quad (4)$$

$$F_z = 0,000856ap^2 - 0,109987t + 0,214259fz + 3,315072, \quad (5)$$

$$F_z = 0,000856ap^2 - 0,109987t + 0,214259fz + 3,315072. \quad (6)$$

Методом наименьших квадратов получены графические представления полученных математических уравнений 1-6. Полученные графики позволя-

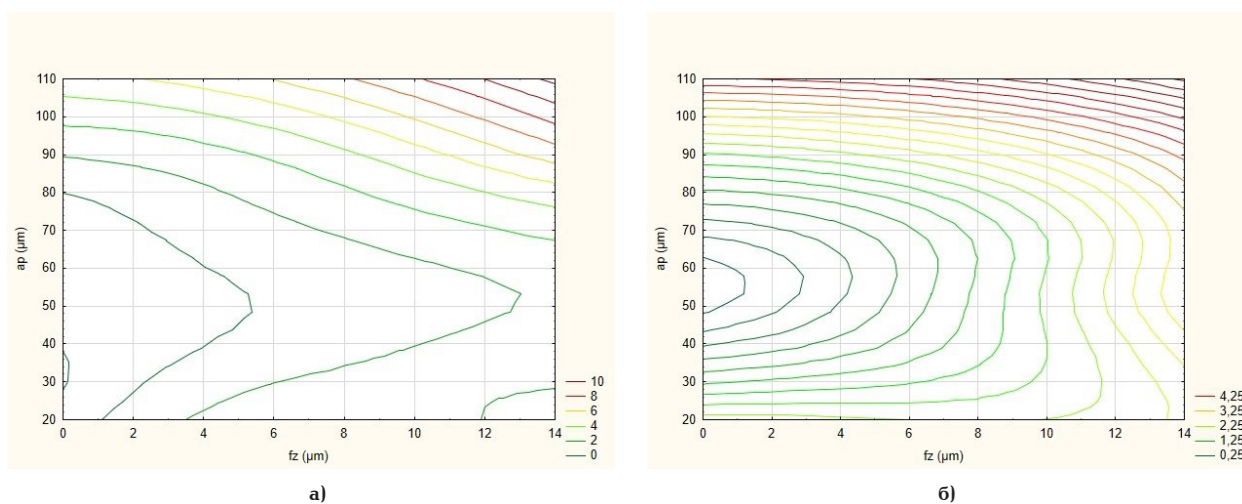


Рис. 1. Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при встречном фрезеровании

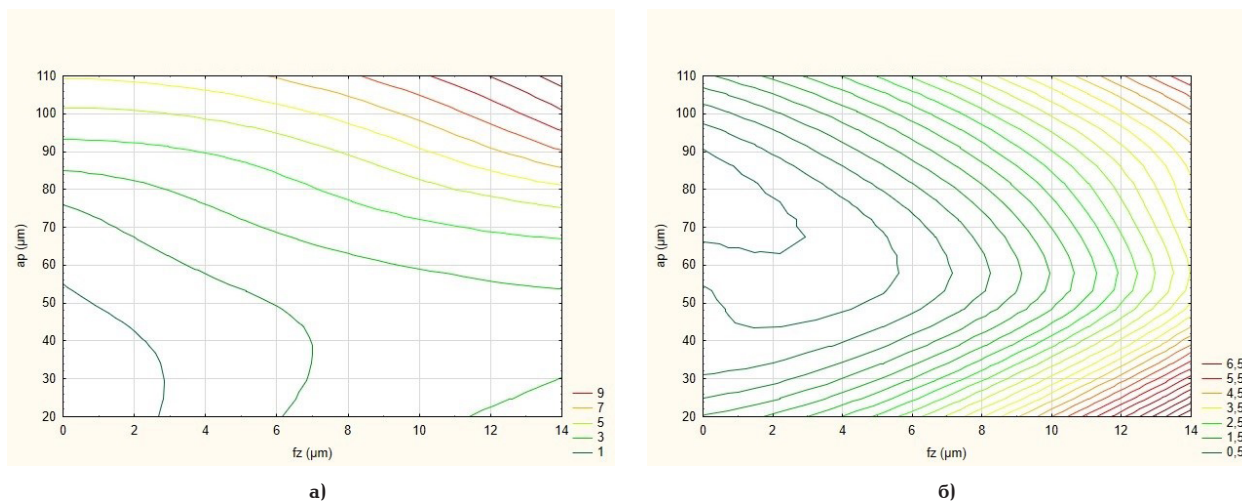


Рис. 2. Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при канавочном фрезеровании

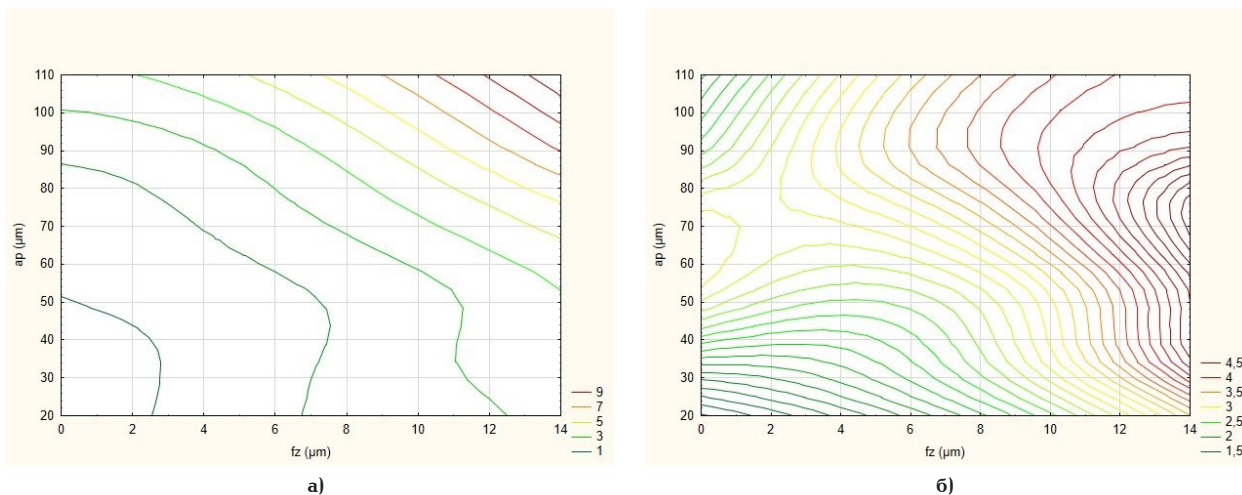


Рис. 3 Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при попутном фрезеровании

ют подобрать подачу на зуб и глубину резания для ограничения действующей силы резания и осевой силы, действующей на режущий инструмент для встречного (рис. 1), канавочного (рис. 2) и попутного фрезерования (рис. 3).

Выводы. В рамках данного исследования были разработаны и проведены эксперименты по микрофрезерованию коррозионностойкой закаленной нержавеющей стали 14X17H2 с целью анализа влияния подачи на зуб, глубины резания и стратегий фрезерования на силы резания. Для экспериментов использовался имеющийся в свободной продаже микрофрезерный инструмент с покрытием и двумя канавками.

Экспериментальные результаты показывают, что составляющие силы резания увеличиваются с увеличением анализируемых параметров процесса. Максимальные полученные значения F_c при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 23%. Максимальные полученные значения F_z при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 3%. Разработанная экспериментальная модель силы резания адекватно предсказывает значения силы резания ($R^2 > 98,93\%$).

Получены математические модели и графики зависимостей для расчета минимально необходимой подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечиваются максимальные силы резания и осевые силы, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента. Полученные математические модели описывают с 90-процентной и более точностью полученные экспериментальные данные.

Библиографический список

- Xu G., Chen J., Zhou H. [et al.]. Multi-objective feedrate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 715–731. DOI: 10.1007/s00170-018-2923-8.
- Волков Д. И., Проскуряков С. А. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 72–78.
- Расщупкин А. В., Макашин Д. С. Повышение точности формообразования поверхности твердосплавным осевым инструментом // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2011. № 1. С. 115–116.

- Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Козочкин М. П. [и др.]. *Диагностика автоматизированного производства* / под ред. С. Н. Григорьева. Москва: Машиностроение, 2011. 600 с.

- Baro P. K., Joshi S. S., Kapoor S. G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 831–839. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.008.

- Анцев А. В., Пасько Н. И. Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 9. С. 15–20. DOI: 10.30987/article_5bd17b459c1d00.72079190.

- Евдокимова О. П., Макашин Д. С. Оптимизация параметров обработки фрезерованием деталей с помощью САМ системы // *Техника и технологии машиностроения: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.*, 26–28 апреля 2022 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 108–111.

- Мокрицкий Б. Я., Космынин А. В., Серебренникова А. Г., Саблин П. А. Фрезерование высокотвердых материалов с обеспечением рационального состояния технологической системы резания. Часть 1 // *Металлообработка*. 2023. № 1 (133). С. 21–26. DOI: 10.25960/mo.2023.1.21.

- Antsev A. V., Zhmurin V. V., Yanov E. S. [et al.]. Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. 032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032003.

- Бреев С. В. Повышение качества обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании на основе исследования напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования: дис. канд. тех. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2011. 151 с.

- Елкин М. С., Безъязычный В. Ф. Влияние покрытия режущего инструмента на силу резания при финишном концевом фрезеровании // *XIII Королёвские чтения: Междунар. молодёж. науч. конф.: сб. тр.* Самара: Изд-во Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева. 2015. Т. 1. С. 199–200.

- Huang P. B. An intelligent neural-fuzzy model for an in-process surface roughness monitoring system in end milling operations // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. Vol. 27 (3). P. 689–700. DOI: 10.1007/s10845-014-0907-6.

- Аверченков А. В. Автоматизированный выбор металлорежущего инструмента для механической обработки заготовок деталей машин // *Научное издание в машиностроении*. 2012. № 9. С. 27–31.

- Любезный М. М. 5 стратегий обработки для фрезерования — базовые и расширенные методы фрезерования. URL: <http://engcrafts.com/item/2050-frezzerovanie> (дата обращения: 06.02.2023).

15. Жияев А. С. Исследование влияния геометрии концевой фрезы на силу и температуру в зоне резания // Развитие науки и технологий: проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. Санкт-Петербург: Изд-во: НОО Профессиональная наука. 2017. С. 206–214.

16. Nghiep T. N., Ahmed A. D. Sarhan, Hideki A. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy // *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 476–495. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.011.

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного ин-

ститута Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

Для цитирования

Макашин Д. С. Анализ силы резания при фрезеровании закаленной стали // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 45–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.

© Д. С. Макашин

UDC 621.95:669.295

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51

EDN: EYGUCN

D. S. MAKASHIN

Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

THE ANALYSIS OF CUTTING FORCES FOR HARDENED STEEL MILLING

Micro milling is a widely used manufacturing method. The main purpose of this study is to analyze the cutting forces in corrosion-resistant, heat-resistant steel 14Kh17N2. Studies of the full factorial experiment on the processing of steel 14Kh17N2 are carried out using a micro end mill with AlTiN coating. New mathematical models of cutting force and axial force have been developed that are adequately able to predict and optimize the forces acting on the cutting tool. Graphs have been obtained for calculating the minimum required feed per tooth and depth of cut, at which maximum cutting forces and axial forces are provided, which makes it possible to increase the durability of the cutting tool during microfilming. The obtained mathematical models describe the obtained experimental data with 90% or more accuracy.

Keywords: production, cutter, cutting forces, feed per tooth, milling strategy, counter milling, helical milling, groove milling.

References

- Xu G., Chen J., Zhou H. [et al.]. Multi-objective feedrate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 715–731. DOI: 10.1007/s00170-018-2923-8. (In Engl.).
- Volkov D. I., Proskuryakov S. L. Razrabotka modeli protsessa rezaniya s uchetom tsiklichnosti formirovaniya struzhki [Development of process models including cutting cycle formation chip] // *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik USATU*. 2011. Vol. 15, no. 3 (43). P. 72–78. (In Russ.).
- Rasshchupkin A. V., Makashin D. S. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya poverkhnosti tverdosplavnym oseвым instrumentom [Improving the accuracy of surface shaping with a hard-alloy axial tool] // *Rossiya molodaya: peredovyie tekhnologii — v promyshlennost'. Russia is Young: Advanced Technologies for Industry*. 2011. No. 1. P. 115–116. (In Russ.).
- Grigor'yev S. N., Gurin V. D., Kozochkin M. P. [et al.]. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva [Diagnostics of automated production] / ed. by S. N. Grigor'yeva. Moscow, 2011. 600 p. (In Russ.).
- Baro P. K., Joshi S. S., Kapoor S. G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 831–839. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.008. (In Engl.).
- Antsev A. V., Pas'ko N. I. Osobennosti optimizatsii rezhimov rezaniya s uchetom faktora sluchaynosti [Peculiarities of cutting mode optimization taking into account random factor] // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2018. No. 9. P. 15–20. DOI: 10.30987/article_5bd17b459c1d00.72079190. (In Russ.).
- Evdokimova O. P., Makashin D. S. Optimizatsiya parametrov obrabotki frezerovaniyem detaley s pomoshch'yu CAM sistemy [Optimization of machining parameters by milling parts using the CAM system] // *Tekhnika i tekhnologii mashinostroyeniya. Technique and Technologies of Engineering*. Omsk. P. 108–111. (In Russ.).
- Mokritskiy B. Ya., Kosmynin A. V., Serebrennikova A. G., Sablin P. A. Frezerovaniye vysokotverdykh materialov s

- obespecheniyem ratsional'nogo sostoyaniya tekhnologicheskoy sistemy rezaniya. Chast' 1 [Milling of highly hard materials with ensuring the rational state of the technological cutting system. Part 1] // *Metalloobrabotka. Metalworking*. 2023. No. 1 (133). P. 21–26. DOI: 10.25960/mo.2023.1.21. (In Russ.).
9. Antsev A. V., Zhmurin V. V., Yanov E. S. [et al.]. Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. 032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032003. (In Russ.).
10. Breyev S. V. Povysheniye kachestva obrabotannoy poverkhnosti pri tsilindricheskom frezerovanii na osnove issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zony struzhkoobrazovaniya [Improving the quality of the machined surface during cylindrical milling based on the study of the stress-strain state of the chip formation zone]. *Komsomolsk-on-Amur*, 2011. 151 p. (In Russ.).
11. Elkin M. S., Bez'yazychnyy V. F. Vliyaniye pokrytiya rezhushchego instrumenta na silu rezaniya pri finishnom kontsevom frezerovanii [Influence of the coating of the cutting tool on the cutting force during finishing end milling] // XIII Korolevskie chteniya. *XIII Korolev Readings*. 2015. P. 199–200. (In Russ.).
12. Huang P. B. An intelligent neural-fuzzy model for an in-process surface roughness monitoring system in end milling operations // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. Vol. 27 (3). P. 689–700. DOI: 10.1007/s10845-014-0907-6. (In Engl.).
13. Averchenkov A. V. Avtomatizirovannyi vybor metallovezhushchego instrumenta dlya mekhanicheskoy obrabotki zagotovok detaley mashin [Automated selection of metal-cutting tools for machining blanks of machine parts] // *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2012. No. 9. P. 27–31. (In Russ.).
14. Lyubeznyy M. M. 5 strategiy obrabotki dlya frezerovaniya — bazovyye i rasshirennyye metody frezerovaniya [5 machining strategies for milling — basic and advanced milling methods]. URL: <http://engcrafts.com/item/2050-frezerovanie> (accessed: 02.06.2023). (In Russ.).
15. Zhilyayev A. S. Issledovaniye vliyaniya geometrii kontsevoy frezy na silu i temperaturu v zone rezaniya [Research influence geometry of end mill on force and temperature in cutting zone] // *Razvitiye nauki i tekhnologii: problemy i perspektivy razvitiya. Development of Science and Technology: Problems and Development Prospects*. SaintPetersburg. 2017. P. 206–214. (In Russ.).
16. Nghiep T. N., Ahmed A. D. Sarhan, Hideki A. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy // *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 476–495. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.011. (In Engl.).

MAKASHIN Dmitriy Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University, Omsk.

For citations

Makashin D. S. The analysis of cutting forces for hardened steel milling // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 45–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51.

Received March 07, 2023.

© D. S. Makashin