



Научная статья
УДК 629.91.01
EDN: KHEWIQ
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-645-654

Расчёт силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами

М.А. Леквеишвили^{1✉}, А.Б. Люхтер², Н.Н. Давыдов³

¹⁻³Научно-образовательный центр внедрения лазерных технологий Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

Резюме. Цель – создание и апробация оперативной методики расчета силовых параметров и характеристик инструмента и процесса фрезерования конструкционных материалов концевыми фрезами. При разработке методики предварительного расчета суммарной осевой силы, действующей на режущей кромке концевых фрез, использованы структурные схемы механообработки и силовые модели процессов косоугольного резания в режимах осевой подачи инструмента и непрерывного пластического деформирования обрабатываемого материала. Опыты с вращающимся инструментом проведены на 3-осевом обрабатывающем центре UWF 1202 Н фирмы «Hermle», дополненном пьезоэлектрическим динамометром фирмы «Kistler» (модель 9272). Предложена, разработана и апробирована методика предварительного расчета силовых характеристик процесса механической обработки заготовок концевыми фрезами, учитывающая влияние величины энергетической мощности вязкого разрушения обрабатываемого материала. Обусловлено, что контактное трение, возникающее на передней и задней поверхностях режущего инструмента, не достигает предельной величины и подчиняется закону Кулона-Амонтона, то есть оценивается зависимостью прямо пропорциональной нормальному давлению. В результате выполненных вычислений предопределены материалы заготовки для фрезерной обработки – сталь 45 (AISI 1045), и концевой двузубой фрезы – сплав Т14К8 без покрытия, из которого были изготовлены опытные образцы. Установлены режимы фрезерной обработки: глубина засверливания – 4 мм; скорости резания – 50, 100 и 150 м/мин; подача режущего инструмента – 0,05 и 0,1 мм/об. Выявлено, что отклонение измеренных значений осевой силы резания от расчетных в диапазоне изменения значений скорости подачи инструмента составляет не более 11%, а в диапазоне изменения значений скорости резания не более 15%. Разработанная расчетно-аналитическая методика оценки силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами обеспечивает повышение оперативности и достоверности предварительного прогностического расчета рабочих параметров и характеристик режущих элементов концевых фрез.

Ключевые слова: фрезерная обработка, концевые фрезы, косоугольное резание, деформационное упрочнение, Кулоново трение, удельная работа разрушения

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Для цитирования: Леквеишвили М.А., Люхтер А.Б., Давыдов Н.Н. Расчёт силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 645–654. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-645-654>. EDN: KHEWIQ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Calculation of force parameters of workpiece machining process with end mill cutters

Maria A. Lekveishvili^{1✉}, Alexander B. Lyukhter², Nikolay N. Davydov³

¹⁻³Research and Educational Center for Laser Technology Implementation of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. The aim is to develop and validate an operational methodology for calculating the force parameters and characteristics of the tool and the process of milling structural materials with end milling cutters. The structural schemes of

© Леквеишвили М.А., Люхтер А.Б., Давыдов Н.Н., 2023

machining and force models of oblique cutting processes in the modes of axial tool feed and continuous plastic deformation of the processed material were used when developing the method of preliminary calculation of the total axial force working on the cutting edge of end milling cutters. The rotating tool tests were conducted on a Hermle UWF 1202 H 3-axis machining center supplemented with a Kistler piezoelectric dynamometer (model 9272). Authors suggested, developed and tested the preliminary calculation method applied to the force characteristics of the machining process of workpieces by end milling cutters, considering how the energy power of ductile fracture of the machined material affects the process. Contact friction arising on the front and rear surfaces of the cutting tool does not reach the limiting value being subject to the Coulomb – Amontons law, that is, it is estimated by the dependence directly proportional to the normal pressure. After calculations, we defined the materials of the workpiece for milling, that is 45 steel (AISI 1045), and the end two-tooth cutter, uncoated T14K8 alloy, which was used to produce samples. The following milling modes were established: 4 mm boring depth; 50, 100 and 150 m/min cutting speeds; 0.05 and 0.1 mm/rev cutting tool feed. Deviation of the measured values of axial cutting force from the calculated values in the range of changing values of tool feed rate was found to be no more than 11%, and in the range of changing values of cutting speed no more than 15%. The developed calculation and analytical methodology for estimating force parameters of the machining process by end milling cutters provides an increase in the efficiency and reliability of the preliminary prognostic calculation of operating parameters and characteristics of cutting elements of end milling cutters.

Keywords: milling, end mills, oblique cutting, strain hardening, Coulomb friction, specific work of fracture

Funding: The research was carried out under the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of Vladimir State University).

For citation: Lekveishvili M.A., Lyukhter A.B., Davydov N.N. Calculation of force parameters of workpiece machining process with end mill cutters. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):645-654. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-645-654>. EDN: KHEWIQ.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование силовых параметров фрезерования концевыми фрезами имеет важное значение для повышения точности обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Эти знания обеспечивают возможность получения более достоверной информации о предполагаемом износе инструмента и возможной его поломке. Увеличить срок службы инструмента и повысить качество обрабатываемой поверхности возможно за счет выбора оптимальных режимов резания и углов режущей кромки фрезы⁴.

Известно, что основу методологии моделирования процесса резания составляют [1]:

- эмпирический метод;
- аналитический метод;
- метод конечных элементов.

Для прогнозирования силовых параметров фрезерования концевыми фрезами ряд авторов используют эмпирический метод. В данном случае параметры фрезерования зависят от удельных коэффициентов резания, которые, по сути, учитывают влияние на результаты прогнозирования физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента и режимов резания. При этом удельные коэффициенты резания определяются, как правило, экспериментально [2–7].

Эмпирическое моделирование, построенное на результатах экспериментальных исследований, является универсальным, так

как обеспечивает возможность учета конструкторско-технологических факторов, влияющих на процесс резания. Однако увеличение числа изучаемых факторов приводит к возрастанию объема экспериментальных работ. При этом модели адекватны лишь при изучении технических, технологических и конструктивных параметров в ограниченном диапазоне их значений, в котором проводились экспериментальные исследования [8].

Применение метода конечных элементов зачастую невозможно из-за отсутствия реологических моделей обрабатываемых материалов, описывающих как деформационное и скоростное упрочнение, так и разупрочнение, обусловленное температурным фактором. Кроме того, разработчикам инструмента в ряде случаев недоступна информация об адекватных моделях контактного трения и критериях разрушения материала. При этом достоверность результатов расчета при использовании данного метода зависит как от оперативности обработки данных, так и от вычислительной мощности информационно-технологического оборудования [1, 9].

Существенному повышению достоверности расчета силовых характеристик резания способствуют теоретико-аналитические модели, основанные на применении метода физико-математического моделирования процессов пластического деформирования. Использование таких моделей обеспечивает возможность оперативного прогнозирования

⁴ Sandvik Coromant (Firm). Modern metal cutting: a practical handbook. Sandvik Coromant, 1997.

как силы, температуры и мощности резания, так и оптимальных условий и режимов обработки, в том числе геометрических параметров и характеристик режущей кромки фрезы с учетом их влияния на ход процесса резания [10, 11]. Создание подобных моделей является актуальной научно-практической задачей.

При реализации аналитического метода расчета силовых параметров фрезерования концевыми фрезами разработчиками, как правило, выделяются (идентифицируются) на режущей кромке бесконечно малые режущие элементы. Считается, что каждый подобный режущий элемент осуществляет обработку поверхности материала в условиях косоугольного резания [12]. Расчет силовых параметров резания в этом случае ведется на основе математического аппарата, созданного в результате анализа закономерностей физико-механического деформирования поверхности [13–16]. Однако в этих работах не учитывается параметр мощности вязкого разрушения материала, связанный с протеканием процесса формообразования новых поверхностей [17, 18].

В данной работе для расчета силовых параметров резания концевыми фрезами при осевой подаче за основу взята модель косоугольного резания, предложенная Л.Д. Олениным [19, 20]. Модель описывает общий случай резания с углом наклона главной режущей кромки. Процесс резания рассматривается как процесс непрерывной пластической деформации. При расчете учитывается мощность вязкого разрушения, связанная с образованием двух новых поверхностей в плоскости резания. Кроме того, учитывается трение на передней и задней поверхностях режущего инструмента. Расчет выполнен энергетическим методом [21, 22]. В работе принято, что мощность, подводимая в зону резания, расходуется на пластическое деформирование в плоскости сдвига, преодоление сил трения на передней и задней поверхностях инструмента, а также на вязкое разрушение, связанное с образованием новых поверхностей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При обработке концевой фрезой с осевой подачей инструмента основная нагрузка приходится на зубья, расположенные на торцевой части фрезы. Схема обработки двузубой фрезой с осевой подачей приведена на рис. 1.

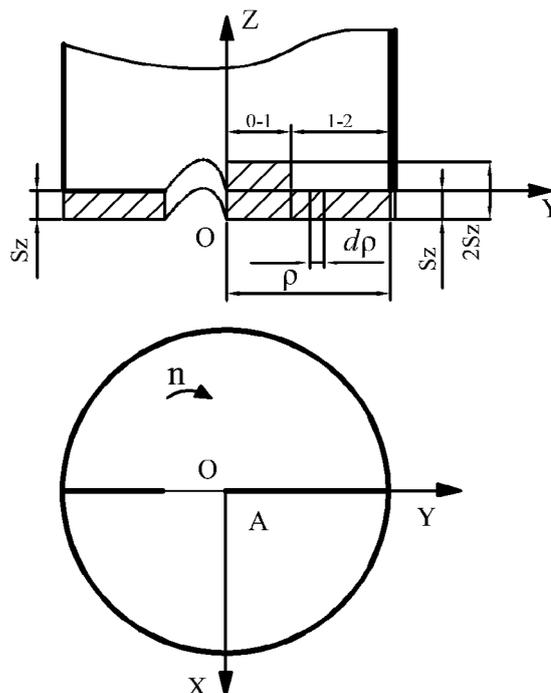


Рис. 1. Схема работы концевой фрезы с осевой подачей
Fig. 1. Operation diagram of an axial feed end mill

Для определения силовых параметров фрезерования на режущих кромках выделяются бесконечно малые режущие элементы (см. рис. 1), где dp – длина каждого режущего элемента.

Режущая кромка, доходящая до центра фрезы, на участке 0–1 удаляет срезаемый слой, который рассчитывается по зависимости (1):

$$df_{11}(p) = 2S_z \cdot dp, \quad (1)$$

где $df_{11}(p)$ – сечение срезаемого слоя на участке 0–1, мм²; S_z – подача на зуб, мм/зуб.

Сечение срезаемого слоя на участке 1–2 определяется из уравнения (2):

$$df_{12}(p) = S_z \cdot dp, \quad (2)$$

где $df_{12}(p)$ – сечение срезаемого слоя на участке 1–2, мм².

Срезаемый слой, который удаляет режущая кромка, не доходящая до центра фрезы, $df_{13}(p)$, мм², определяется в соответствии с уравнением (2).

Кинематический передний угол режущего элемента на торце фрезы в любой точке режущей кромки равен (3):

$$\gamma_T = \gamma_{T0} + \frac{S_o}{2 \cdot \pi \cdot \rho}, \quad (3)$$

где γ_T – передний торцовый угол кинематический, градусы; γ_{T0} – передний торцовый угол инструментальный, градусы; S_o – подача на оборот, мм/обр; ρ – радиус инструмента, мм.

Элементарные осевые силы, действующие на режущую кромку, доходящую до центра фрезы, на участках 0–1 и 1–2 рассчитываются из уравнений (4):

$$dP_{z1}(\rho) = q_{z1}(\rho) \cdot df_{11}(\rho) \cdot \sigma_b + q_{n3} \cdot \sigma_b \cdot df_{n3}(\rho) \cdot \mu;$$

$$dP_{z2}(\rho) = q_{z1}(\rho) \cdot df_{12}(\rho) \cdot \sigma_b + q_{n3} \cdot \sigma_b \cdot df_{n3}(\rho) \cdot \mu, (4)$$

где dP_{z1} – элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент на участке 0–1, Н; q_{z1} – давление резания, подводимое через переднюю поверхность; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала, МПа; q_{n3} – нормальное давление, действующее на заднюю поверхность инструмента; df_{n3} – площадка износа по поверхности контакта инструмента с обработанной поверхностью, мм²; μ – коэффициент трения; dP_{z2} – элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент на участке 1–2, Н.

Элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент кромки, не доходящей до центра фрезы, dP_{z3} , Н, определяется по аналогии с уравнением (4).

Зависимости для расчета давления резания, подводимого через переднюю поверхность на выделенном участке зуба, и нормального давления на задней поверхности режущего инструмента приведены в работах [19, 20, 22].

Для расчета давления резания, подводимого через переднюю поверхность, q_{z1} необходимо предварительно установить значение относительной скорости схода стружки ζ . Следует отметить, что относительная скорость схода стружки ζ обратно пропорциональна усадке стружки ξ [19] (5):

$$\zeta = \frac{1}{\xi}. \quad (5)$$

Существенно, что в данной работе относительная скорость схода стружки ζ определяется расчетным методом, исходя из условия минимума мощности резания, подводимой через переднюю поверхность.

Суммарные осевые силы P_{z1} , Н и P_{z2} , Н, действующие на участках 0–1 и 1–2 режущей кромки, доходящей до центра фрезы, рассчитываются из уравнений (6):

$$P_{z1} = - \int_{R_0}^{R1} P_{z1}(\rho) \cdot d\rho ;$$

$$P_{z2} = - \int_{R1}^{R2} P_{z2}(\rho) \cdot d\rho \cdot \quad (6)$$

Суммарная осевая сила, действующая на режущей кромке, не доходящей до центра фрезы, P_{z3} , Н, определяется по аналогии с уравнением (6).



Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования процесса резания вращающимся инструментом
Fig. 2. Experimental setup to study the cutting process with a rotating tool

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Силовые параметры фрезерования, рассчитанные по предложенной методике, сравнивались с данными эксперимента. При этом проведены экспериментальные исследования процесса резания вращающимся инструментом. В качестве оборудования использовался 3-осевой обрабатывающий центр фирмы «Heimle» модели UWF 1202 H. Обработка велась без применения смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). Измерительная установка показана на рис. 2. Для измерения сил применялся пьезоэлектрический динамометр фирмы «Kistler» модели 9272. На динамометр устанавливалась заготовка в патроне, а режущий инструмент закреплялся в патроне станка. При вращении концевой фрезы и перемещении ее относительно заготовки с осевой подачей выполнялся процесс засверливания с заданной глубиной, который сопровождался регистрацией силы резания.

В процессе информационно-технологической регистрации измеряемых параметров сигнал с выхода динамометра поступал на вход высокочастотного усилителя «Kistler» модели 5070A, затем преобразовывался в аналого-числовой в устройстве BNC-210. Далее сигнал поступал на измерительную карту сбора данных National Instrument модели NI USB-6259 BNC. При обработке числовых значений из базы экспериментальных данных использовались средства программного обеспечения LabView.

Осевая глубина резания t во всех экспериментальных исследованиях была постоянной – 4 мм. Скорость резания V изменялась, и ее значения составили 50, 100 и 150 м/мин. Величины подачи инструмента S_o были равны 0,05 и 0,1 мм/об.

В качестве материала заготовки выбрана известная конструкционная сталь марки 45. Физико-механические характеристики стали 45 приведены в табл. 1.

Для экспериментальных исследований изготовлена специальная двузубая фреза из

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 45
Table 1. Stress-strain properties of steel 45

Твердость HВ	Удельная работа распространения трещины a_p , кДж/м ²	Предел прочности обрабатываемого материала σ_b , МПа
162–169	109,4	540

⁶Кожевников Д.В., Гречишников А.В., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебник. М.: Машиностроение, 2007. 538 с.

твердого сплава марки Т14К8 без покрытия в количестве 5 штук. Наличие двух канавок позволило увеличить пространство для отвода стружки, что предотвратило инструмент от поломки. Зубья на винтовой и торцевой режущих частях выполнены остроконечными с усиленной формой зуба. Такая форма характеризуется ломаной спинкой. Зубья с усиленной формой имеют увеличенную прочность по отношению, например, к зубьям с параболической формой⁶. На рис. 3 приведен пример формы зуба на винтовой режущей части со значениями соответствующих углов. Характеристики фрезы представлены в табл. 2.

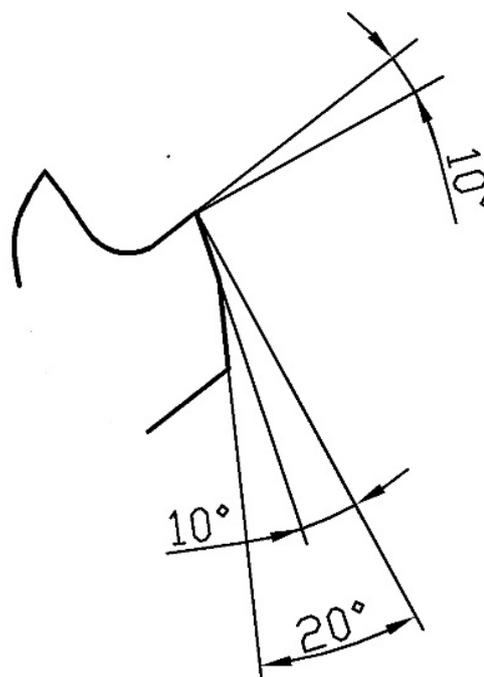


Рис. 3. Форма зуба на винтовой режущей части фрезы, применяемой в экспериментальных исследованиях
Fig. 3. Tooth shape on the helical cutting part of the milling cutter used in experimental studies

Кратность выполнения экспериментальных исследований при каждом сочетании значений скорости резания и подачи инструмента составила 3. Экспериментальная осевая сила, с которой сравнивалось расчетное значение, определена как усредненное значение по трем проходам. Для обработки экспериментальных значений из всего массива данных выбира-

Таблица 2. Геометрические параметры фрезы
Table 2. Cutter geometric parameters

Наименование	Параметры
Диаметр D , мм	14
Угол наклона винтовой канавки ω °	30
Передний угол на винтовой режущей части γ_B °	10
Передний угол на торцовой режущей части γ_T °	5
Задние углы на винтовой режущей части α_{B1} °, α_{B2} °	10, 20
Задние углы на торцовой режущей части α_{T1} °, α_{T2} °	8, 16

лась область с установившимся сигналом. Значения сил, полученные по каждому из трех проходов, приведены в табл. 3.

Для контроля износа инструмента использовалась лупа с восьмикратным увеличением фирмы «Sandvik» (Art. – Nr. 4233). Эксперименты и последующая обработка полученных данных выполнены на аттестованном и лицензионном контрольно-измерительном и вычислительном оборудовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эпюра изменения измерительного сигнала приведена на рис. 4.

Характер экспериментальной эпюры осевой силы при фрезеровании совпадает с эпюрой, полученной авторами работы [23].

На рис. 5 представлены зависимости значений осевых сил от подачи на оборот, полученных экспериментально и расчетным путем.

В результате экспериментальных исследований установлено, что с увеличением подачи инструмента величина осевой силы возрастает прямо пропорционально изменению параметра подачи. Подобным же образом изменяется осевая сила, вычисленная расчетным методом. Это объясняется тем, что по мере роста величины подачи

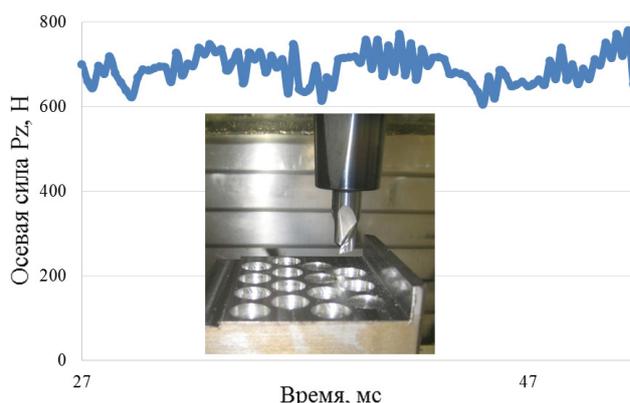


Рис. 4. Осциллограмма осевой силы при засверливании: материал сталь 45, скорость резания 100 м/мин, подача 0,05 мм/об, глубина резания 4 мм

Fig. 4. Axial force waveform under spotting: material – steel 45, cutting speed – 100 m/min, feed – 0.05 mm/rev, cutting depth – 4 mm

инструмента возрастает объем удаляемого материала в единицу времени.

Это приводит к повышению производительности резания, однако предопределяет рост сил. Результаты выполненных исследований подтверждаются закономерностями, изложенными Н.Н. Зоревым в работе [24]. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями осевых сил резания не превышает 11%.

На рис. 6 приведена зависимость экспериментальных и расчетных осевых сил от скорости резания. Значение осевой силы, полученной экспериментально, уменьшается с увеличением скорости резания от

Таблица 3. Значения экспериментальных сил
Table 3. Values of experimental forces

Скорость резания V , м/мин	Глубина резания t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Значения осевой силы по проходам P_z , Н			
			Проход 1	Проход 2	Проход 3	Среднее значение
100	4	0,025	748	739	752	746
		0,05	898	912	922	911
150		0,025	652	649	632	644

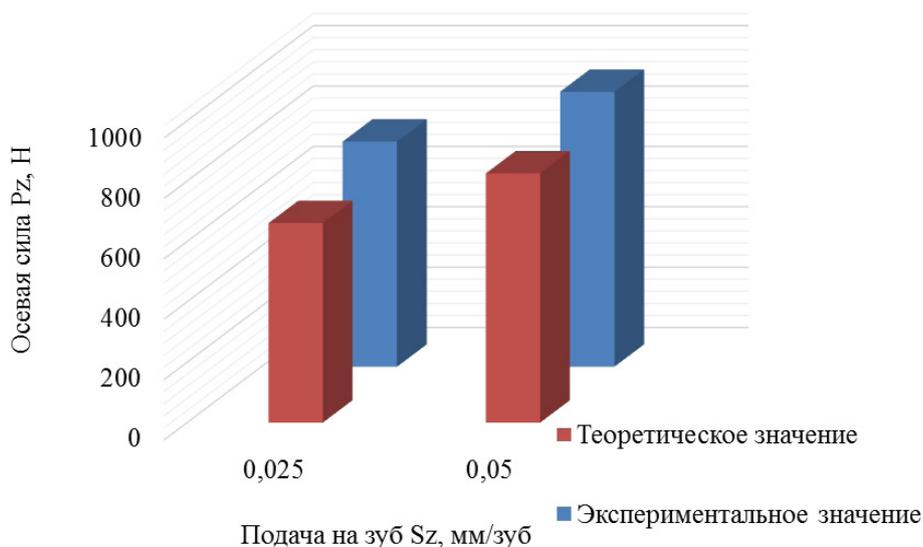


Рис. 5. Зависимость экспериментальных и расчетных значений осевых сил от подачи на зуб при засверливании: материал – сталь 45, скорость резания – 100 м/мин и глубина резания – 4 мм

Fig. 5. Dependence of experimental and theoretical values of axial forces on feed per tooth at drilling: material – steel 45 (AISI 1045), cutting speed – 100 m/min, cutting depth – 4 mm

100 м/мин до 150 м/мин. Объяснить такое явление возможно тем, что с увеличением скорости резания, как правило, повышается температура на передней и задней поверхностях режущего инструмента. Данный процесс оказывает разупрочняющее влияние на обра-

батываемый и инструментальный материалы⁶.

Из рис. 6 следует, что расчетное значение осевой силы остается постоянным при повышении скорости резания, так как методика расчета силовых параметров фрезерования

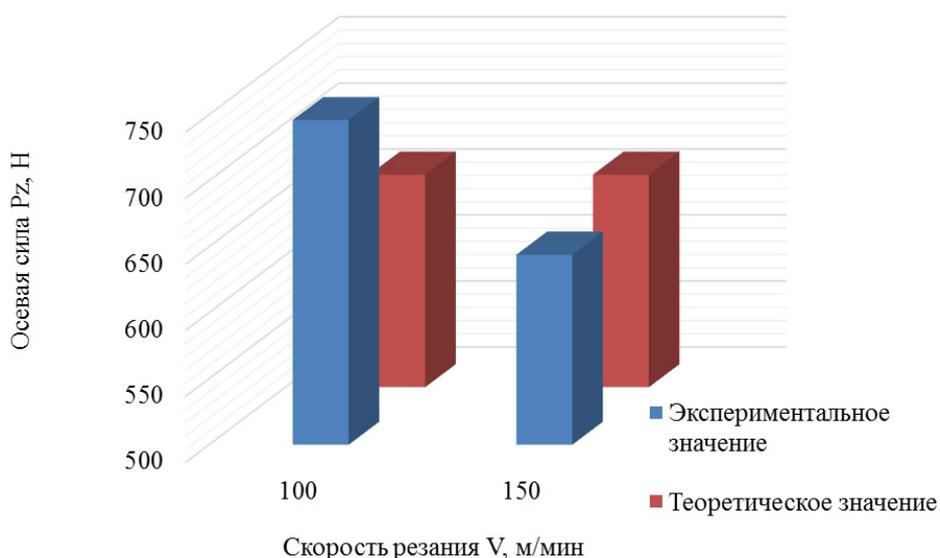


Рис. 6. Зависимость экспериментальных и теоретических осевых сил от скорости резания при засверливании концевой фрезой: сталь – 45, подача – 0,025 мм/зуб и глубина резания – 4 мм

Fig. 6. Dependence of experimental and theoretical axial forces on cutting speed at end mill drilling: material – steel 45, feed – 0.025 mm/tooth, cutting depth – 4 mm

⁶Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.

концевыми фрезами не предполагает исследование влияния скорости резания на процесс стружкообразования. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями при изменении скорости резания не превышает 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена методика расчета силовых параметров фрезерования, предназначенная для прогнозирования сил, возникающих в зоне обработки концевыми фрезами с осевой подачей. Методика базируется на модели косоугольного резания, предложенной Л.Д. Олениным. Анализ выполнен энергетическим методом в терминах мощности с учетом экстремальных положений механики сплошной среды.

При расчете учитываются изменение кинематических углов в любой точке режущей

кромки и изменение величины деформации при стружкообразовании, в том числе изменение силовых параметров в любой точке режущей кромки. Кроме того, берется во внимание мощность вязкого разрушения, связанная с образованием двух новых поверхностей в плоскости резания.

При сопоставлении расчетных значений осевой силы с экспериментальными данными для стали 45 получены адекватные результаты. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями при изменении подачи не превысило 11%, а при изменении скорости резания – 15%.

Условием дальнейшего совершенствования предлагаемой методики расчета силовых характеристик фрезерования концевыми фрезами является учет влияния температурно-скоростного фактора на процесс стружкообразования.

Список источников

1. Jawahir I.S., Schoop J., Kaynak Y., Balaji A.K., Ghosh R., Lu T. Progress toward modeling and optimization of sustainable machining processes // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 11. P. 110811. <https://doi.org/10.1115/1.4047926>.
2. Aslantas K., Ülker S., Şahan Ö., Pimenov D.Y., Giasin K. Mechanistic modeling of cutting forces in high-speed microturning of titanium alloy with consideration of nose radius // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 2393–2408. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08437-w>.
3. Sim Choongun, Yang Minyang. The prediction of cutting force in ball end milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993. Vol. 33. Iss. 2. P. 267–284. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90079-a](https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90079-a).
4. Budak E., Altıntaş Y., Armarego E.J.A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996. Vol. 118. Iss. 2. P. 216–224. <https://doi.org/10.1115/1.2831014>.
5. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Vol. 41. Iss. 15. P. 2195–2212. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00045-1).
6. Lee P., Altıntaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996. Vol. 36. Iss. 9. P. 1059–1072. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00081-x](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00081-x).
7. Sahoo P., Patra K., Singh V.K., Gupta M.K., Song Qinghua, Mia M., et al. Influences of TiAlN coating and limiting angles of flutes on prediction of cutting forces and dynamic stability in micro milling of die steel (P-20) // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 278. P. 116500. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116500>.
8. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes // *CIRP Annals*. 2013. Vol. 62. Iss. 2. P. 695–718. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>.
9. Ozlu E., Molinari A., Budak E. Two-zone analytical contact model applied to orthogonal cutting // *Machining Science and Technology: An International Journal*. 2010. Vol. 14. Iss. 3. P. 323–343. <https://doi.org/10.1080/10910344.2010.512794>.
10. Sonawane H.A., Joshi S.S. Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718 // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 3. Iss. 3. P. 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.11.003>.
11. Wang S., Zhang T., Deng W., Sun Z., Sandy T. Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review // *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2022. Vol. 119. P. 1407–1434. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08114-y>.
12. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 152 с.
13. Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. Vol. 43. Iss. 8. P. 1711–1730. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00020-0).
14. Moufki A., Dudzinski D., Coz G. Le. An analytical thermomechanical modelling of peripheral milling process using a predictive machining theory // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 223. P. 93–100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.93>.
15. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball-end milling and experimental validation

- with a wavelike form machining test // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46. Iss. 3-4. P. 367–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011>.
16. Fu Zhongtao, Yang Wenyu, Wang Xuelin, Leopold J. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.013>.
17. Atkins A.G. Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanation for some longstanding problems // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. Vol. 45. Iss. 2. P. 373–396. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(03)00040-7).
18. Dargnat F., Darnis Ph., Cahuc O. On the adaptability of cutting model to drilling // 12th CIRP conference on modelling of machining operations. 2009. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/296705241_On_the_adaptability_of_cutting_model_to_drilling (дата обращения: 11.06.2023).
19. Оленин Л.Д. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2008. № 1. С. 183–190.
20. Оленин Л.Д., Сторчак М.Г., Леквешвили М.А. К разработке аналитической модели косоугольного резания // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014. Т. 8. № 1-2. С. 123–128. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67804>.
21. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting // *Journal of Applied Physics*. 1945. Vol. 16. Iss. 6. P. 318–324. <https://doi.org/10.1063/1.1707596>.
22. Оленин Л.Д. К анализу механики процесса резания. Резание инструментом с притупленной режущей кромкой // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009. № 2. С. 143–151.
23. Tsai Chung-Liang, Liao Yunn-Shiuan. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 205. Iss. 1-3. P. 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.083>.
24. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Mashgiz, 1956. 368 с.

References

1. Jawahir I.S., Schoop J., Kaynak Y., Balaji A.K., Ghosh R., Lu T. Progress toward modeling and optimization of sustainable machining processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):110811. <https://doi.org/10.1115/1.4047926>.
2. Aslantas K., Ülker S., Şahan Ö., Pimenov D.Y., Giasin K. Mechanistic modeling of cutting forces in high-speed microturning of titanium alloy with consideration of nose radius. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119:2393-2408. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08437-w>.
3. Sim Choonggun, Yang Minyang. The prediction of cutting force in ball end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993;33(2):267-284. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90079-a](https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90079-a).
4. Budak E., Altıntaş Y., Armarego E.J.A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996;118(2):216-224. <https://doi.org/10.1115/1.2831014>.
5. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(15):2195-2212. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00045-1).
6. Lee P., Altıntaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996;36(9):1059-1072. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00081-x](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00081-x).
7. Sahoo P., Patra K., Singh V.K., Gupta M.K., Song Qinghua, Mia M., et al. Influences of TiAlN coating and limiting angles of flutes on prediction of cutting forces and dynamic stability in micro milling of die steel (P-20). *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;278:116500. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116500>.
8. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*. 2013;62(2):695-718. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>.
9. Ozlu E., Molinari A., Budak E. Two-zone analytical contact model applied to orthogonal cutting. *Machining Science and Technology: An International Journal*. 2010;14(3):323-343. <https://doi.org/10.1080/10910344.2010.512794>.
10. Sonawane H.A., Joshi S.S. Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010;3(3):204-217. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.11.003>.
11. Wang S., Zhang T., Deng W., Sun Z., Sandy T. Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2022;119:1407-1434. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08114-y>.
12. Bobrov V.F. Influence of tool major cutting edge inclination angle on metal cutting. Moscow: Mashgiz; 1956, 152 p. (In Russ.).
13. Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(8):1711-1730. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00020-0).
14. Moufki A., Dudzinski D., Coz G. Le. An analytical thermomechanical modelling of peripheral milling process using a predictive machining theory. *Advanced Materials Research*. 2011;223:93-100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.93>.
15. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(3-4):367-380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011>.
16. Fu Zhongtao, Yang Wenyu, Wang Xuelin, Leopold J. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory. *Procedia CIRP*. 2015;31:258-263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.013>.
17. Atkins A.G. Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanation for some longstanding problems. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003;45(2):373-396. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(03)00040-7).

18. Dargnat F., Darnis Ph., Cahuc O. On the adaptability of cutting model to drilling. In: *12th CIRP conference on modelling of machining operations*. 2009. Available from: https://www.researchgate.net/publication/296705241_On_the_adaptability_of_cutting_model_to_drilling [Accessed 11th June 2023].
19. Olenin L.D. Analysis of mechanics of the process of cutting hardened material. Chip formation. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2008;1:183-190. (In Russ.).
20. Olenin L.D., Storchak M.G., Lekveishvili M.A. Developing of analytical model for bevel cutting. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;8(1-2):123-128. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67804>. (In Russ.).
21. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. *Journal of Applied Physics*. 1945;16(6):318-324. <https://doi.org/10.1063/1.1707596>.
22. Olenin L.D. On the analysis of cutting process mechanics. Cutting with a flattened edge tool. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2009;2:143-151. (In Russ.).
23. Tsai Chung-Liang, Liao Yunn-Shiuan. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205(1-3):24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.083>.
24. Zorev N.N. *Mechanical issues of the metal cutting process*. Moscow: Mashgiz; 1956, 368 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леквешвили Мария Анатольевна,
младший научный сотрудник,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
✉ m.shaparovskaya@mail.ru

Люхтер Александр Борисович,
к.т.н.,
директор Научно-образовательного центра
внедрения лазерных технологий,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
3699137@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

Давыдов Николай Николаевич,
д.т.н., доцент,
ведущий научный сотрудник,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
n.n.davydov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0003-3392-818X>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.10.2023 г.;
принята к публикации 30.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maria A. Lekveishvili,
Junior Researcher,
Research and Educational Center for Laser Technology
Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
✉ m.shaparovskaya@mail.ru

Alexander B. Lyukhter,
Cand. Sci. (Eng.),
Director of the Research and Educational Center for Laser
Technology Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
3699137@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

Nikolay N. Davydov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Research and Educational
Center for Laser Technology Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
n.n.davydov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0003-3392-818X>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 04.10.2023;
approved after reviewing 16.10.2023;
accepted for publication 30.10.2023.