of-spie/8705/1/Thermographic-in-situ-process-monitoring-of-the-electron-beam-melting/10.1117/12.2018412.short (дата обращения: 12.05.2025).
4. Aldave I.J., Venegas Bosom P., Vega González L., López de Santiago I., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Review of Thermal Imaging Systems in Composite Defect Detection // Infrared Physics & Technology. – 2013. – № 61. – P. 167–175.
5. Liu T. In Situ Infrared Thermographic Inspection in Additive Manufacturing (Doctoral Dissertation). – Missouri University of Science and Technology, 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/3345 (дата обращения: 12.05.2025).

Дин Цзэжу (Китай), Цао Сяокай (Китай), Ли Вэйхан (Китай), Ди Чэнь (Китай), Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н., доцент ОМШ ИШНПТ НИ ТПУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ НА ГЛАВНОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКЕ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ 40Х13

Аннотация: В работе представлена методика определения удельной силы резания на разных участках главной режущей кромки концевой фрезы. Представлены схемы и уравнения для расчета удельной силы резания на разных участках главной режущей кромки концевой фрезы на основе технологических составляющих силы резания, измеренных с помощью динамометра Kistler, и геометрических параметров фрезы, приведен пример расчета при фрезеровании стали 40Х13 цельной концевой твердосплавной фрезой диаметром 8 мм.

Ключевые слова: удельная сила резания, фрезерование концевой фрезой, силы на участках режущей кромки фрезы, сталь 40Х13, динамометр Kistler.

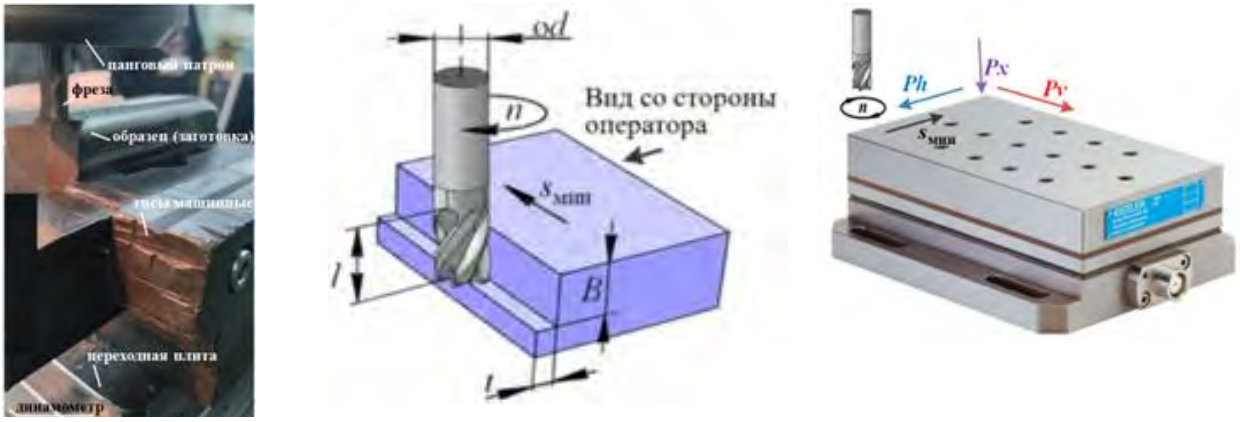
Введение

Для уменьшения вероятности поломки дорогой твердосплавной концевой фрезы при фрезеровании заготовок из стали 40Х13, полученных по аддитивной технологии и поэтому имеющих высокую твердость, необходимо использовать рациональные режимы фрезерования, которые можно определить, зная напряженно-деформированное состояние (НДС) режущей части. Для расчета НДС необходимо знать не только величину технологических сил при фрезеровании ***Ph***, ***Pv***, ***Px***, но и распределение контактных напряжений на передней и задней поверхностях зуба фрезы [1, 2]. Экспериментальное исследование их распреде-

ления на зубе фрезы является очень сложной задачей, поэтому на данный момент уровень развития измерительной техники не позволяет это сделать. Для расчета контактных напряжений по составляющим силы фрезерования, измеренным с помощью динамометра, необходимо определить долю технологических сил резания, действующих на разных участках режущей кромки концевой фрезы.

Основная часть

Используя результаты исследования распределения контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности резца, полученные методом разрезного резца [3], можно рассчитать узловые точки эпюр касательных τ и нормальных σ контактных напряжений и построить соответствующие эпюры. Для построения эпюр необходимо определить нормальную $N_п$ и касательную $F_п$ силы на передней поверхности зуба, действующих на разных участках режущей кромки концевой фрезы. Из общих сил резания необходимо выделить нормальную N_h и касательную F_h силы, действующие на фаске износа по задней поверхности зуба при его износе.



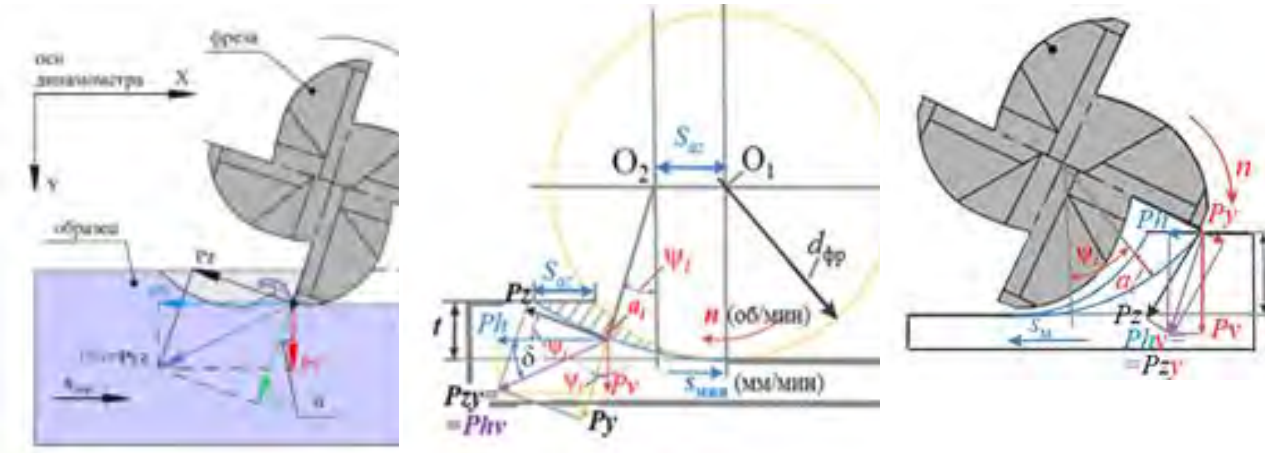
а б в

Рис. 1. Фрезирование образца на вертикально-фрезерном станке ФУ251: а – общий вид, б – схема фрезирования, в – направления сил, измеряемых динамометром Kisler, при встречном фрезировании образца

Для принятой схемы размещения динамометра и образца (см. рис. 1, *а*) ширина фрезерования ***B*** и глубина фрезерования ***t*** показана на рисунке 1, *б*, а схема действия технологических сил приведена на рисунке 1 *в*. При фрезеровании концевой фрезой сила, действующая параллельно направлению скорости минутной подачи $s_{мин}$ (мм/мин), называется силой подачи ***Ph***; сила, действующая перпендикулярно направлению подачи, называется боковой силой ***Pv***; сила, действующая вдоль оси вращения фрезы, называется осевой силой ***Px*** [4].

При вращении зуб фрезы входит в контакт с заготовкой с нулевой толщиной среза (рис. 2, *а*), при этом тангенциальная составляющая ***Pz***, являющаяся исходным компонентом образования сил резания, совпадает с технологической

составляющей силы подачи ***Ph***, а другая сила, радиальная составляющая ***Py***, являющаяся вторым исходным компонентом образования сил резания, совпадает с технологической составляющей боковой силы ***Pv***.

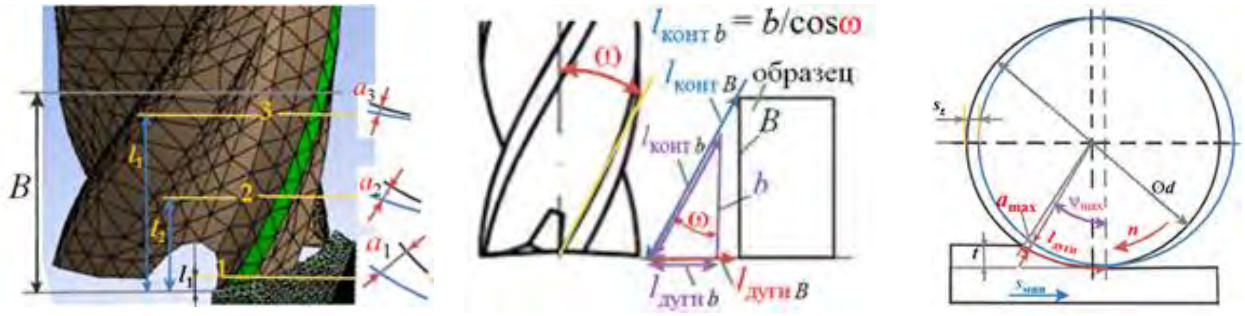


а б в

Рис. 2. Схемы действия сил: а – при врезании зуба фрезы при встречном фрезировании, б – в промежуточном положении зуба при встречном фрезировании, в – при врезании зуба фрезы при попутном фрезировании

При дальнейшем повороте рассматриваемого зуба фрезы силы ***Pz*** и ***Py*** уже не совпадают по направлению с технологическим составляющими силами ***Ph*** и ***Pv*** (рис. 2, *б*), что существенно затрудняет их выделение из общей силы резания. Так как силы ***Pz*** и ***Py*** необходимы для расчета физических составляющих силы резания (нормальной $N_п$ и касательной $F_п$ силы на передней поверхности зуба при работе неизношенным инструментом), была разработана методика по их выделению из технологических составляющих сил ***Ph*** и ***Pv***, измеряемых с помощью динамометра Kistler. Осевая сила ***Px*** не меняет своего направления, поэтому проблем с ее измерением не возникает, но она мало влияет на силы $N_п$ и $F_п$.

Вторая проблема после изменения направления сил ***Pz*** и ***Py*** в процессе фрезерования заключается в наличии угла наклона винтовой канавки **ω** (рис. 3, *б*), который позволяет зубу врезаться в заготовку не сразу по всей длине режущей кромки, а постепенно. Но это приводит к разной величине толщины среза вдоль режущей кромки (рис. 3, *а*), а значит, и разности удельных сил: чем больше угол **ω**, тем больше эта разница.



а б в

Рис. 3. Схема определения толщины среза на разных участках вдоль длины режущей кромки концевой фрезы (а), схема определения длины контакта режущей кромки $l_{конт\ b}$ с вертикальной поверхностью заготовки (б), схема для определения длины дуги контакта вершины зуба с заготовкой (в)

При вращении фрезы в некоторый момент времени нижняя часть зуба, находящаяся на наименьшем расстоянии $\boldsymbol{l_1}$ от торца фрезы, пройдет большее расстояние, поэтому она будет срезать припуск с самой большой толщиной среза $\boldsymbol{a_1}$ (рис. 3 *а*). В этот же момент времени более верхняя часть зуба, находящаяся на расстоянии $\boldsymbol{l_2}$ от торца фрезы, пройдет меньшее расстояние, так как она вошла в контакт с заготовкой немного позднее, поэтому она будет срезать припуск с немного меньшей толщиной среза $\boldsymbol{a_2}$. В этот же момент времени самая верхняя часть зуба, находящаяся на расстоянии $\boldsymbol{l_3}$ от торца фрезы, пройдет очень малое расстояние, так как она вошла в контакт с заготовкой самой последней, поэтому она будет срезать припуск с наименьшей толщиной среза $\boldsymbol{a_3}$.

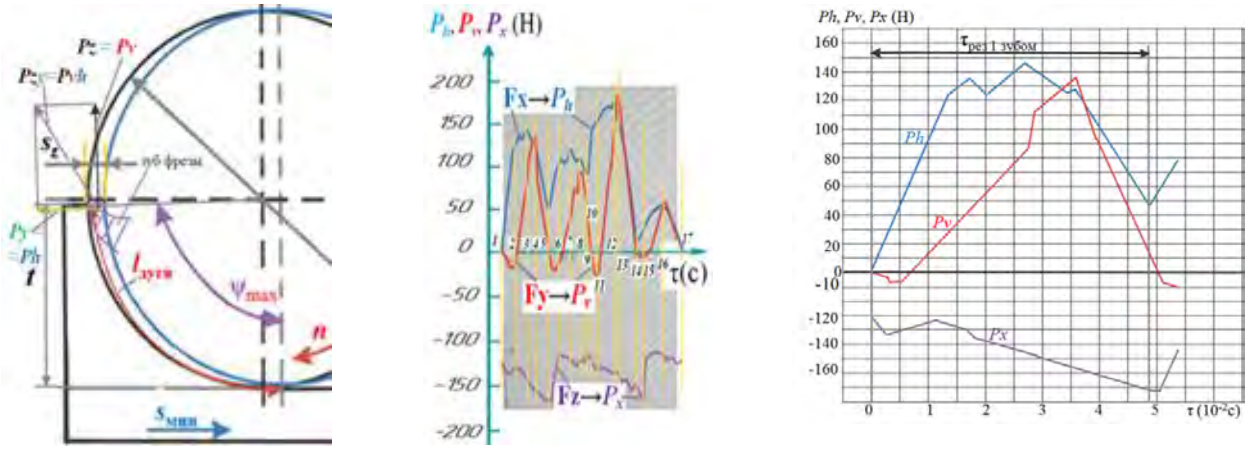
Проблема измерения величины сил ***Ph*** и ***Pv*** вдоль режущей кромки, то есть, в зависимости от длины $\boldsymbol{x_i}$ ($\boldsymbol{x_i} = 0 \ldots \boldsymbol{l}$) от торца фрезы, может быть решена измерением силы подачи ***Ph*** и боковой силы ***Pv*** по графикам изменения этих сил в разные периоды времени, но на одинаковых участках, соответствующих контакту режущей кромки с вертикальной поверхностью заготовки при небольшой величине ширины фрезерования $B \leq 2$ мм.

Поэтому сначала необходимо определить длину дуги $\boldsymbol{l_{дуги}}$ (рис. 3, *в*), по которой проходит вершина зуба при контакте с заготовкой, то есть при срезании припуска. При фрезеровании четырехзубой фрезой Ø8 мм была назначена глубина фрезерования $t = 3{,}8$ мм, то есть немного меньше, чем половина диаметра фрезы $d = 8$ мм, чтобы одновременно с заготовкой контактировал только один зуб и не было наложения сил от действия следующего зуба.

При фрезеровании четырехзубой фрезой Ø8 мм с небольшой минутной подачей $s_{мин} = 28$ мм/мин, которая несущественно влияет на длину дуги контакта, и глубине фрезерования $t = 3{,}8$ мм из геометрических построений определяем длину дуги как четверть длины окружности диаметра фрезы $d_{фр} = 8$ мм: $\boldsymbol{l_{дуги}} = \pi \cdot \boldsymbol{d_{фр}}/4 = 6{,}28$ мм (рис. 4, *а*). При угле наклона винтовой канавки $\boldsymbol{\omega} = 35^{\circ}$

длина контакта режущей кромки с заготовкой $l_{конт} = \boldsymbol{l_{дуги}} / \sin\omega = 6{,}28 / \sin 35 = 10{,}95$ мм (рис. 3, *б*).

Для уменьшения влияния угла наклона винтовой канавки было выполнено фрезерование с шириной фрезерования $\boldsymbol{B} = 2$ мм, в течение которого непрерывно измерялось изменение составляющих сил фрезерования (рис. 4, *б*).



а б в

*Рис. 4. Направление технологических составляющих силы резания (**Pz**$_{max}$ ≈ **Pv**$_{max}$;**Py**$_{max}$ ≈ **Ph**$_{max}$) перед выходом зуба из контакта с заготовкой (а); графики изменения сил при повороте острой фрезы на один оборот при встречном фрезеровании четырехзубной **неизношенной** фрезой Ø**d** = 8 мм, **t** = 3,8 мм, **B** = 2 мм, **n** = 500 об/мин, **s**$_м$ = 28 мм/мин, 40Х13 (образец № 1 **АТ**) – твердый сплав ВК8 (б); графики изменения составляющих силы фрезерования при резании одним зубом (в)*

Так как ширина фрезерования $\boldsymbol{B} = 2$ мм небольшая, то полная длина контакта будет ограничена ее величиной:

$$l_{конт\ \boldsymbol{B}=2\ мм} = \boldsymbol{B} / \cos\omega = = 2 / \cos 35^{o} = 2{,}44 \text{ мм (см. рис. 3, } б).$$

Тогда дополнительная длина дуги, которую пройдет наиболее верхняя часть режущей кромки над вершиной зуба фрезы во время ее врезания при указанной ширине фрезерования, рассчитывается по формуле:

$$l_{дуги\ в.\ т.\ при\ врезании} = \boldsymbol{l_{дуги\ B=2\ мм}} = \boldsymbol{B} / \operatorname{ctg}\omega = 2 / \operatorname{ctg} 35^{o} = 2 \cdot \operatorname{tg} 35^{o} = 1{,}4 \text{ мм}.$$

Рассчитывается дополнительная длина дуги наиболее верхней части режущей кромки над вершиной зуба фрезы, которую та пройдет после выхода вершины зуба из контакта с заготовкой, по формуле:

$$l_{дуги\ в.\ т.\ при\ выходе} = \boldsymbol{l_{дуги\ в.\ т.\ при\ B=2\ мм}} = \boldsymbol{B} / \operatorname{ctg}\omega = 2 / \operatorname{ctg} 35^{o} = 2 \cdot \operatorname{tg} 35^{o} = 1{,}4 \text{ мм}.$$

Рассчитывается длина дуги всех точек режущей кромки при B=2 мм:

$$l_{дуги\ всех\ т.} = l_{дуги\ верш} + l_{дуги\ в.\ т.\ при\ врезании} + l_{дуги\ в.\ т.\ при\ выходе} = 6{,}28+1{,}4+1{,}4 = 9{,}08 \text{ мм}.$$

Скорость резания определяется скоростью вершины и периферии главной режущей кромки $n = 500$ об/мин: $v = \pi \cdot d \cdot n/1000 = \pi \cdot 8 \cdot 500/1000 = 12{,}56$ м/мин = = 12560 мм/мин.

Время контакта всех точек режущей кромки одного зуба: $\tau_{рез} = \boldsymbol{l}_{\textbf{дуги всех т.}} / v = 9{,}08 / 12560 = 7{,}229 \cdot 10^{-4}$ мин = 0,043 с. На рис. 4, *б* выделяем период работы одного зуба, который будет занимать $\tau_{рез} = 0{,}043$ с. Период времени контакта всей режущей кромкой, то есть $\Delta\tau_{кр}$, будет определять примерно одинаковую толщину среза $\boldsymbol{a_i}$, так как ширина фрезерования небольшая $B = 2$ мм, и будет соответствовать длине дуги контакта $\boldsymbol{l}_{\textbf{дуги } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} = 1{,}4$ мм (рис. 3, *б*), а время прохождения этой длины дуги: $\tau_{р.кр.} = \boldsymbol{l}_{\textbf{дуги } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} / v = 1{,}4 / 12560 = 1{,}11 \cdot 10^{-4}$ мин = 0,007 с.

Выделяя на графиках рис. 4 *в* участки продолжительностью $\tau_{р.кр.} = 0{,}007$ с, можно определить составляющие силы, действующие на длине режущей кромки длиной $l_{\text{р.кр. конт } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} = 2{,}44$ мм. Если силу резания поделить на эту длину, то рассчитывается удельная сила резания, приходящаяся на 1 мм длины режущей кромки. Наибольшие удельные силы: $q_{Ph} = Ph / l_{\text{р.кр. конт } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} = 142/2{,}44 = 58{,}2$ Н/мм; $q_{Pv} = Pv / l_{\text{р.кр. конт } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} = = 83/2{,}44 = 34$ Н/мм; $q_{Px} = Px / l_{\text{р.кр. конт } \boldsymbol{B}=2 \text{ мм}} = 148/2{,}44 = 60{,}6$ Н/мм.

При концевом фрезеровании с шириной фрезерования B более двух миллиметров необходимо разделить режущую кромку на участки, длина которых не должна превышать 2 мм для повышения точности расчета удельной силы резания на разных участках режущей кромки.

Заключение

Используя полученные в работе уравнения и схемы контакта режущей кромки концевой фрезы с заготовкой, можно рассчитать удельные силы, действующие на разных участках режущей кромки, если разделить режущую кромку на участки, длина которых не должна превышать 2 мм, но в области вершины зуба длина участка должна быть не более 0,5 мм, чтобы более правильно определить нагрузку на самом опасном участке зуба фрезы.

Список литературы

1. Козлов В.Н., Чжан Ц., Шэ Л. Напряженно-деформированное состояние режущей пластины при ее износе // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XV Международной научно- технической конференции. – Томск: Томский политехнический университет, 2022. – С. 123–125.
2. Козлов В. Н., Дин Ц., Чжан Х. и др. Анализ напряженно-деформированного состояния зуба фрезы // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября–1 декабря 2023 г. – Томск, 2024. – С. 209–211.
3. Kozlov V.N., Babaev A. S., Shults N. A. et al. Study of a Methodology for Calculating Contact Stressesduring Blade Processing of Structural Steel //

Metals. – 2023. – Vol. 13, iss. 12. – Article № 2009. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.3390/met13122009 (дата обращения: 12.05.2025).
4. Martyushev, N.V., Kozlov, V.N., Qi, M., et al. Production of Workpieces from Martensitic Stainless Steel Using Electron-Beam Surfacing and Investigation of Cutting Forces When Milling Workpieces. Materials. – 2023. – 16. – Article № 4529. – Режим доступа: https://www.mdpi.com/1996-1944/16/13/4529 (дата обращения: 12.05.2025).

[1]Исса Хайдер Абдулсахиб Исса (Ирак)
[1]Уральский федеральный университет, Г. Екатеринбург
[2]Абдали Лаит Мохаммед Абдали (Ирак)
[2]Университет Куфы, г. Наджаф
[3]Кувшинов В.В. (Россия)
[3]Севастопольский государственный университет, Севастополь,
[1]Велькин В.И. (Россия)
Научный руководитель: Велькин Владимир Иванович, д.т.н., профессор

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОГО ВОДОРОДА И ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация: Представлен метод определения параметров автономной гибридной системы с фотоэлектрическими (PV) солнечными панелями, водородной подсистемой и аккумулятором. Аккумулятор и водородная подсистема, состоящая из топливного элемента, электролизера и резервуара для хранения водорода, действуют как система хранения и резервирования энергии. Для определения необходимой мощности для каждого компонента системы с целью эффективного соответствия нагрузке, необходимой для получения наилучших технических и экономических результатов для гибридной системы, использовалась компьютерная программа в коде MATLAB. Гибридная система была смоделирована, а результаты представлены с использованием среды Matlab/Simulink.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, PEM-топливный элемент, электролизер, система управления питанием, водородный бак.

Введение

Моделирование гибридных систем на основе возобновляемой энергии, включающих солнечные батареи, топливные элементы и аккумуляторные батареи (PV/ТЭ/Системы хранения энергии) является важнейшим аспектом пони-