

2. Guo J., Liu X., Du K., et al. An anti-stripping and self-healing micro-arc oxidation/acrylamide gel composite coating on magnesium alloy AZ31 // Materials Letters. – 2020. – Vol. 260. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126912> (дата обращения: 12.05.2025).

*Ди Чэнь (Китай), Ли Вэйхан (Китай), Дин Цзэжу (Китай),
Цао Сяокай (Китай), Козлов В.Н. (Россия)*

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич к. т. н., доцент

РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

Аннотация: В статье представлен метод расчета физических составляющих силы резания (нормальной N и касательной F) при фрезеровании концевой фрезой. На основе экспериментальных данных, полученных с использованием токарного динамометра Kistler, выполнено преобразование технологических составляющих сил подачи Ph , боковой силы Pv в физические составляющие. Рассмотрены особенности измерения сил резания с использованием динамометра Kistler модели 9257BA при фрезеровании заготовки концевой фрезой и преобразования сил из системы сил токарного динамометра, при которой показываются на мониторе силы Fz , Fy и Fx , характерные для токарной обработки, в систему сил, используемую при анализе процесса фрезерования концевой фрезой (силы Ph , Pv и Px). Показаны узловые точки при построении эпюр контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента и уравнения для расчета нормальной N и касательной F сил на передней поверхности зуба фрезы. Результаты могут быть использованы для оптимизации режимов резания и оценки прочности инструмента.

Ключевые слова: силы на передней поверхности зуба фрезы, составляющие силы резания при фрезеровании, концевая фреза.

Введение

Для оценки прочности любого инструмента необходимо знать распределение в нем следующих напряжений: 1) эквивалентных, учитывающих не только напряжение по всем осям, но и влияние температуры на изменение предельно-допустимых напряжений; 2) распределение напряжений по всем осям (OZ , OY , OX) [1].

Если требуется знать напряженно-деформированное состояние (НДС) всего инструмента, то можно прилагать сосредоточенные силы к его рабочим по-

верхностям, при этом можно использовать технологические составляющие силы резания: для токарных резцов тангенциальную P_z , радиальную (поперечную) P_y , осевую P_x ; а для фрез: силу подачи Ph , действующую вдоль направления минутной подачи $s_{мин}$; боковую силу P_v , действующую перпендикулярно направлению подачи $s_{мин}$; осевую силу P_x , действующую вдоль оси фрезы. При исследовании фрезерования концевой фрезой с использованием токарного динамометра можно измерить только эти силы.

При использовании специального фрезерного динамометра, устанавливаемого на шпиндель фрезерного или сверлильного станка и вращающегося вместе со шпинделем с закрепленной на нем фрезой, можно измерить другие технологические составляющие: тангенциальную силу P_z , действующую вдоль направления скорости резания v , радиальную силу P_y , действующую вдоль линии, соединяющую ось фрезы с точкой приложения силы резания, осевую силу P_x , действующую вдоль оси фрезы. Однако у таких динамометров есть ограничения, кроме того, существуют сложности с их приобретением.

Основная часть

При исследовании процесса фрезерования концевой фрезой задачей было измерение технологических составляющих силы резания Ph , P_v и P_x с помощью высокожесткого и высокоточного токарного динамометра Kistler модели 9257BA (рис. 1, а).

В программное обеспечение токарного динамометра Kistler заложено направление сил F_z , F_y и F_x (рис. 1, а) [2], соответствующих направлению сил для токарной обработки, поэтому если, например, осевая сила (вертикальная) P_x действует в противоположном направлении по сравнению с вертикальной силой F_z , то она указывается на мониторе динамометра с отрицательным знаком. Аналогично и для других составляющих сил, измеряемых при фрезеровании.

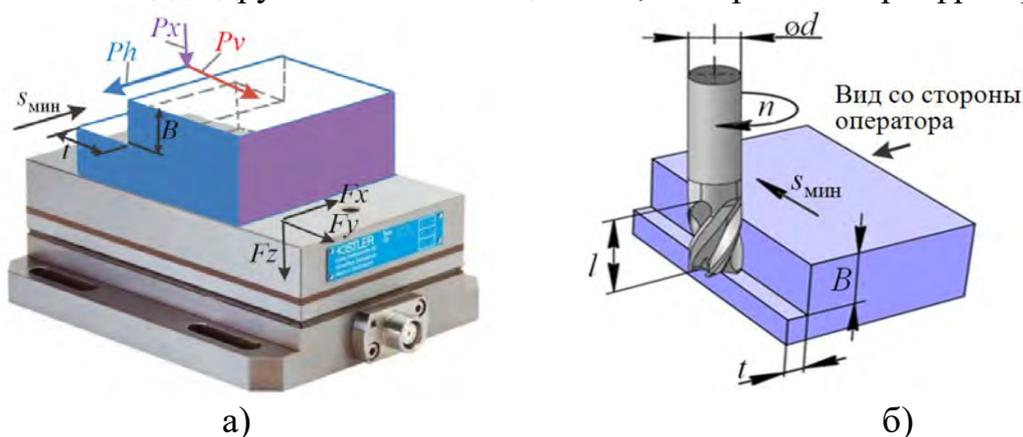


Рис. 1. Направление составляющих силы резания при встречном фрезеровании концевой фрезой (а) и схема фрезерования (б)

В настройках динамометра (в программе DynoWare) можно установить, что сила F_x есть сила подачи Ph , сила F_y есть боковая сила P_v , а сила F_z есть осевая сила P_x , но направление сил F_z , F_y и F_x (Ph , P_v и P_x) изменить нельзя,

поэтому при отрицательном знаке силы Ph (соответствующей направлению силы F_x) можно указывать, что она положительна при схеме встречного фрезерования, указанного на рисунках 1, а и б, и направлена против направления продольной минутной подачи $s_{\text{мин}}$ фрезерного стола. Аналогично операцию можно произвести и для других составляющих сил, измеряемых при фрезеровании.

При вращении фрезы силы P_z и P_y , необходимые для расчета физических составляющих нормальной N и касательной F сил, действующих на поверхности зуба фрезы (см. рис. 2, а и б), изменяют свое направление, поэтому важно выделить их из измеряемых сил Ph и Pv . Для промежуточного положения зуба фрезы необходимо определить силы P_z и P_y , по которым можно рассчитать силы N и F . По этим силам на передней поверхности инструмента можно построить эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) с учетом полученных закономерностей их распределения и графиков величины узловых точек эпюр [3].

При вращении фрезы будет увеличиваться толщина среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi_i$ (мм), где s_z – подача на зуб (мм/зуб); ψ_i – центральный угол положения режущей кромки фрезы относительно точки входа в контакт с заготовкой (рис. 2, б).

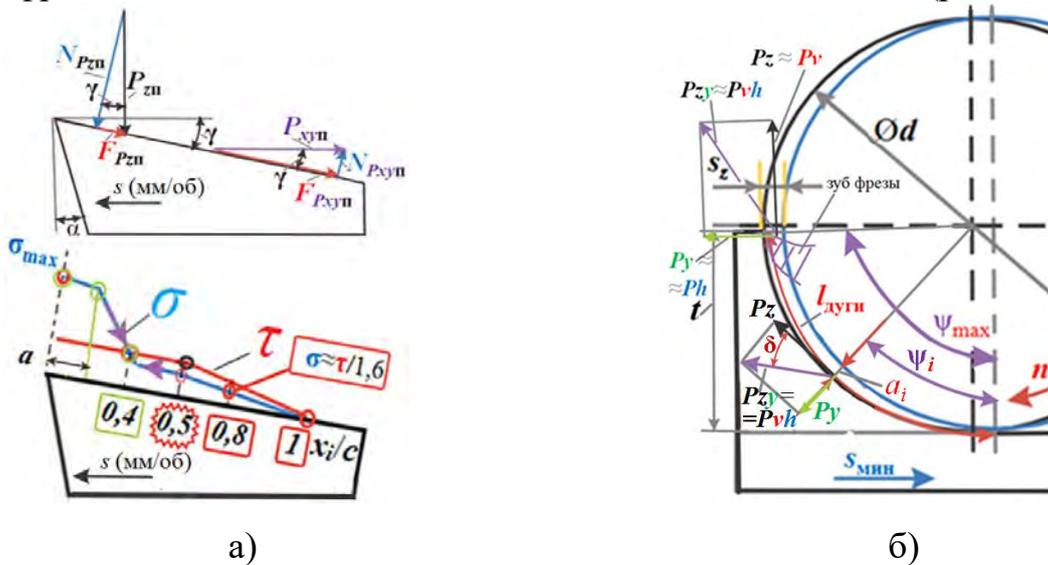


Рис. 2. Схема действия сил на передней поверхности режущего клина и распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений на его передней поверхности при радиальной подаче s (мм/об) (а) и схема действия сил при промежуточном и окончательном положении зуба фрезы (б)

Вследствие чего будут увеличиваться и силы P_z и P_y (рис. 2, б), которые для промежуточного положения зуба фрезы можно выделить из сил Ph и Pv из условий (рис. 2, б):

$$P_{zy_i} = P_{vh_i} \quad (1)$$

$$P_{vh_i} = (P_{v_i}^2 + P_{v_i}^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$P_{z_i} = P_{vh_i} \cdot \cos \delta_i \quad (3)$$

$$P_{y_i} = P_{v h_i} \cdot \sin \delta_i \quad (4)$$

$$a_i = s_z \cdot \sin \psi_i \quad (5)$$

Расчет физических составляющих силы резания \mathbf{N} и \mathbf{F} по технологическим составляющим \mathbf{P}_z и \mathbf{P}_y при переднем угле $\gamma \neq 0^\circ$ выполняется по уравнениям, которые получаем из суммы векторов (см. рис. 2, а):

$$\vec{P}_{z n} = \vec{N}_{Pz n} + \vec{F}_{Pz n}; \quad \vec{P}_{xy n} = \vec{F}_{Pxy n} + \vec{N}_{Pxy n}. \quad (6)$$

Из этих формул при переднем угле $\gamma > 0^\circ$ (см. рис. 2, а и б) получаем два уравнения для расчета физических сил резания \mathbf{N} и \mathbf{F} :

$$N_{\Pi} = N_{Pz \Pi} - N_{Py \Pi} = P_{z \Pi} \times \cos \gamma - P_{xy \Pi} \times \sin \gamma; \quad (7)$$

$$F_{\Pi} = F_{Pxy \Pi} + F_{Pz \Pi} = P_{xy \Pi} \times \cos \gamma + P_{z \Pi} \times \sin \gamma. \quad (8)$$

При фрезеровании неизношенной фрезой $P_{z \Pi} = P_z = P_{z i}$, $P_{xy \Pi} = P_y = P_{y i}$ [4].

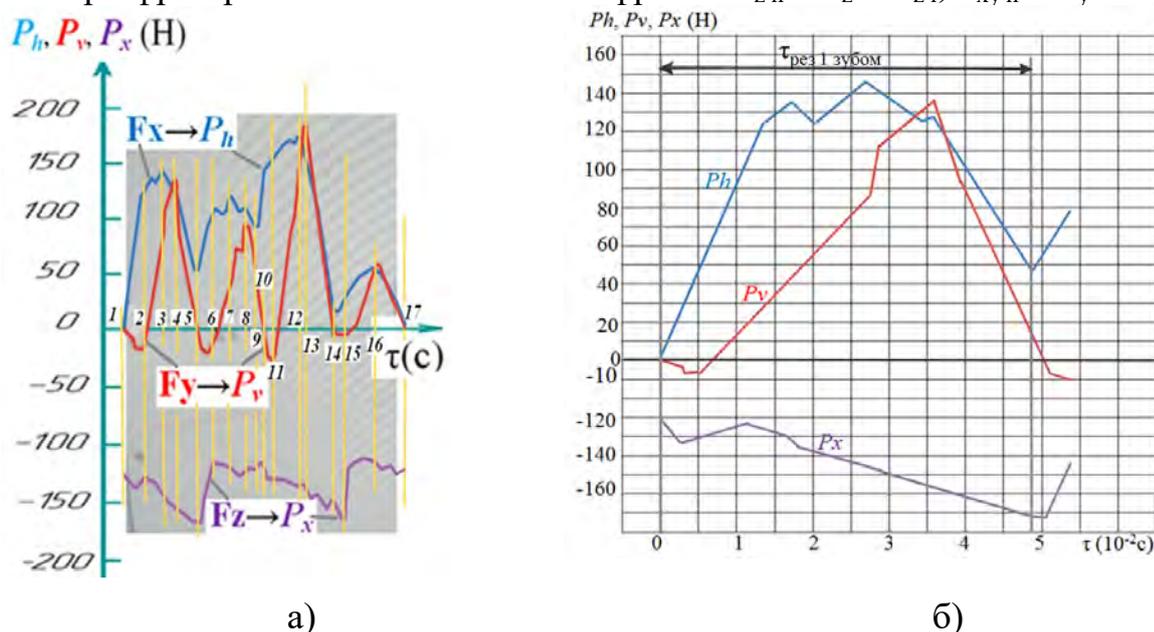


Рис. 3. Графики изменения сил при вращении острой фрезы на один оборот при встречном фрезеровании 4-зубой неизношенной фрезой $\varnothing d = 8$ мм, $t = 3,8$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_{мин} = 28$ мм/мин, 40X13 – твердый сплав BK8 (а); графики изменения технологических сил фрезерования за четверть оборота фрезы при резании одним зубом, т. е. за время $\tau_{рез}$ в период резания первым зубом из рис. 3 а (б)

При фрезеровании цельной твердосплавной фрезой диаметром 8 мм образца из стали 40X13, выполненного по аддитивной технологии, были получены графики изменения технологических составляющих силы фрезерования (см. рис. 3, а и б), по которым для любого положения зуба фрезы можно определить сначала величину сил P_h и P_v , затем P_z и P_y по уравнениям (2), (3) и (4) с учетом уравнения (1) и затем нормальную N и касательную F силы на передней поверхности зуба фрезы по уравнениям (7) и (8) с учетом уравнений (6).

Если установить глубину фрезерования $t = d_{фр}/2$, то при выходе зуба фрезы из контакта с заготовкой $P_{z_{max}} \approx P_{v_{max}}$, а $P_{y_{max}} \approx P_{h_{max}}$ (см. рис. 2, б), поэтому

в момент выхода зуба фрезы из контакта с заготовкой, т. е. при $\tau = 0,036$ с (см. рис. 3, б), наибольшие силы $P_{z_{\max}} = P_{v_{\max} \tau = 0,036 \text{ с}} = 136$ Н,

$P_{y_{\max}} \approx Ph_{\max \tau = 0,036 \text{ с}} = 128$ Н. При переднем угле $\gamma = 8^\circ$ по уравнениям (7) и (8) рассчитываются силы на передней поверхности с учетом того, что при фрезеровании на передней поверхности у главной режущей кромки зуба фрезы $P_{xy \text{ п}} = P_{y \text{ п}}$:

$$N_{\text{п max } \tau = 0,036 \text{ с}} = P_{z_{\max}} \cdot \cos \gamma - P_{y_{\max}} \cdot \sin \gamma = 136 \cdot \cos 8^\circ - 128 \cdot \sin 8^\circ = 116,85 \text{ Н};$$

$$F_{\text{п max } \tau = 0,036 \text{ с}} = P_{y_{\max}} \cdot \cos \gamma + P_{z_{\max}} \cdot \sin \gamma = 128 \cdot \cos 8^\circ + 136 \cdot \sin 8^\circ = 145,6 \text{ Н}.$$

Средний коэффициент трения на передней поверхности зуба фрезы в момент выхода зуба фрезы из контакта $\mu_{\text{ср}} = F_{\text{п max}} / N_{\text{п max}} = 1,25$, что соответствует представлениям о среднем коэффициенте трения на передней поверхности режущего инструмента при обработке стали.

Заключение

Приведенные в статье уравнения могут быть использованы для расчета физических составляющих силы резания при фрезеровании концевой фрезой на основе экспериментально измеренных технологических сил Ph и Pv с использованием токарного динамометра. Средний коэффициент трения на передней поверхности зуба фрезы, рассчитанный по полученным физическим составляющим силы резания, соответствует представлениям о среднем коэффициенте трения на передней поверхности режущего инструмента при обработке стали, что косвенно подтверждает правильность полученных уравнений для расчета физических составляющих силы резания.

Список литературы

1. 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.
2. 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. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: DOI:10.3390/ma16134529 (дата обращения: 12.05.2025).
3. Kozlov V.N., Babaev A. S., Shults N. A. et al. Study of a Methodology for Calculating Contact Stresses during 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. 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.

Дин Цзэжу (Китай), Жуй Минхань (Китай), Козлов В.Н. (Россия), Федоров В.В. (Россия), Донцов Ю.В. (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Клименов Василий Александрович, д.т.н., профессор

МОНИТОРИНГ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Аннотация: Проведен сравнительный анализ электронно-оптической и термографической визуализации для *in situ* мониторинга процессов PBF-EB и LPBF. Оцениваются их разрешающая способность, чувствительность к дефектам и интеграционный потенциал в системы замкнутого управления при аддитивном производстве металлов.

Ключевые слова: аддитивное производство, *in situ* мониторинг, электронно-оптическая визуализация, термография, замкнутый контур управления.

Введение

Аддитивное производство металлов (AM) предоставляет неоспоримую свободу дизайна и возможности быстрого прототипирования, однако изменчивость процессов и формирование дефектов серьезно влияют на качество и надежность. В данной работе проводится критический анализ двух основных методов мониторинга процесса в реальном времени (*in situ*) – электронно-оптической визуализации (ELO) и термографической (инфракрасной и спектральной) визуализации, разработанных для обеспечения обратной связи во время процессов, таких как электронно-лучевое спекание порошкового слоя (PBF-EB) и лазерное спекание порошкового слоя (LPBF) (рис. 1).