

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ИЗ ЧИСТОГО ТИТАНА ТА1, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЕЧАТИ

Ци М.¹, Чжан Ц.², Клименов В.А.³, Козлов В.Н.⁴, Чинахов Д.А.⁵,
Чернухин Р.В.⁶, Майорова Е.И.⁷

¹НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А1-21, e-mail: mensyuy1@tpu.ru;

²НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А3-21, e-mail: cinzhun1@tpu.ru;

³НИ ТПУ, ИШНПТ, профессор ОМ, e-mail: klimenov@tpu.ru;

⁴НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОМШ, e-mail: kovn@tpu.ru;

⁵Новосибирский государственный технический университет, ФЛА,
доцент, e-mail: chinakhov@corp.nstu.ru

⁶Новосибирский государственный технический университет, ПТМ,
доцент, e-mail: chernuxin@corp.nstu.ru

⁷Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, Инженер, e-mail: Elenapanucheva24@mail.ru

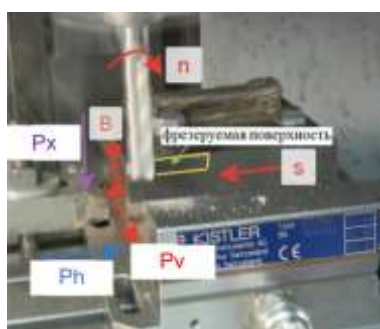


Рис. 1. Установка заготовки на динамометре Kistler 9257B

В современном производстве титановые сплавы широко используются в авиакосмической, морской технике, автомобилестроении и других областях благодаря своей высокой удельной прочности, низкой плотности и отличной коррозионной стойкости [1]. Особенно в биомедицинской области титановые сплавы пользуются популярностью из-за их превосходной биосовместимости и низкого модуля упругости. Промышленный чистый титан ТА1 демонстрирует лучшую биологическую безопасность и более широкие перспективы применения, поскольку не содержит потенциально токсичных элементов, таких как ванадий (V) и алюминий (Al) [2].

По сравнению с лазерной печатью электронно-

лучевая печать быстрее и дешевле, а поскольку она выполняется в вакууме, проблем с окислением можно избежать. Кроме того, сохраняются такие характеристики аддитивного производства, как высокая эффективность, высокий коэффициент использования материала и высокая гибкость производства. Однако поверхность отпечатанной заготовки имеет большую неровность, до 1–2 мм, и для достижения необходимой точности изделия необходимо проводить последующую механическую обработку (например, фрезерование) [3, 4].

Из-за высокой прочности и плохой теплопроводности титанового сплава, его малого сродства с вольфрамом (W) в однокомпонентном твердом сплаве (типа ВК), его обработка привлекает большое внимание.

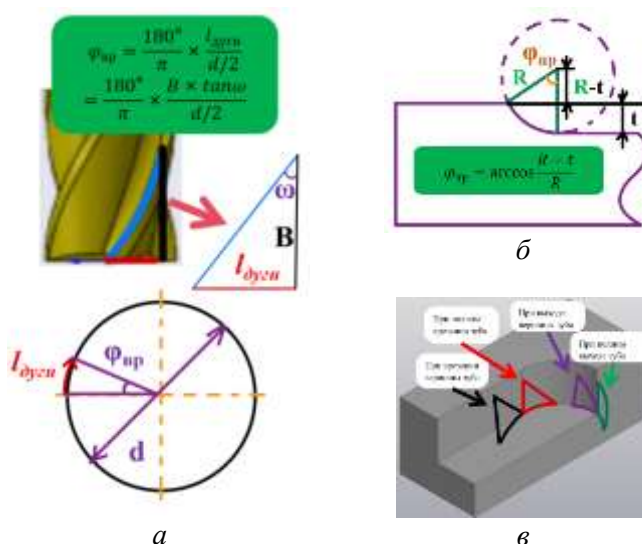


Рис. 3. Схема определения углового положения зуба $\varphi_{вр}$ при полном врезании зуба (а) $\varphi_{вр}$ при выходе вершины зуба от заготовки (б) и текущее положение режущей кромки при фрезеровании (в)

В наших исследованиях по концевому фрезерованию титана ТА1 использовался метод измерения сил вдоль направления подачи (P_h), перпендикулярно направлению подачи (P_v) и вдоль оси фрезы (P_x). Особое внимание уделялось исследованию изменений тангенциальной силы (P_z), действующей вдоль направления скорости резания, и радиальной силы (P_y), направленной к оси вращения концевой фрезы. Силы P_z и P_y меняют не только свою величину, но и направление действия при вращении фрезы, что существенно затрудняет их выделение при измерении с помощью обычного динамометра, в отличие от технологических сил P_h , P_v и P_x .

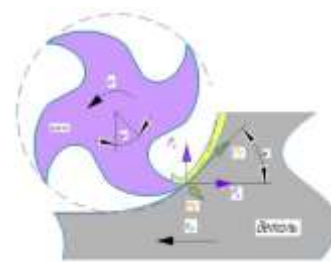


Рис. 4. Схема разложения сил P_h и P_v на силы P_z и P_y

Однако исследование изменения именно сил P_z и P_y важно для изучения процесса резания при фрезеровании, т. к. позволяет рассчитать нормальную N и касательную F физические составляющие силы, действующие на передней поверхности зуба фрезы. Без знания этих сил невозможно построить эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений. Без знаний о величине и распределении контактных напряжений невозможно рассчитать напряжённо-деформированное состояние (НДС) зуба фрезы и оценить его прочность при различных режимах резания. Получаемая при этом информация очень важна также для анализа процесса износа инструмента.

Эксперименты по встречному фрезерованию проводились при скорости вращения фрезы $n = 1000$ об/мин, ширине фрезерования $B = 2$ мм, глубине фрезерования $t = 1$ мм и минутной подаче $s_m = 125$ мм/мин, используя четырёхзубую ($z = 4$ шт.) твёрдосплавную фрезу без износа диаметром $d = 8$ мм и углом подъёма стружечной винтовой канавки $\omega = 40^\circ$ на фрезерном станке с ЧПУ (EMCO CONCEPTMill 155). Силы фрезерования измерялись с помощью динамометра Kistler 9257B (Швейцария).

Небольшая глубина фрезерования t при существенно большем диаметре фрезы и небольшая ширина фрезерования B позволяет проследить изменение сил при резании только одним зубом. По графику изменения силы в процессе резания одним зубом фрезы, полученному с помощью динамометра, видно, что время фрезерования одиночного зуба $t_3 = 0,00375$ с.

Процесс фрезерования зубом разделяется на три этапа, соответствующих трём угловым положениям зуба:

$$\varphi_{вр} = \frac{B \times \tan \omega}{\frac{d}{2}} \times \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{2 \times \tan 40^\circ}{\frac{8}{2}} \times \frac{180^\circ}{\pi} = 24,038^\circ - \text{при полном врезании зуба};$$

$$\varphi_{пр} = \arccos \frac{\frac{d}{2} - t}{\frac{d}{2}} = \arccos \frac{8/2 - 1}{8/2} = 28,955^\circ - \text{при выходе вершины зуба из заготовки, } \varphi_{вы} =$$

$$\varphi_{вр} + \varphi_{пр} = 52,993^\circ - \text{при полном выходе зуба из заготовки.}$$

Формула преобразования между угловым положением и временем:

$$\Phi(t) = \frac{t_3}{\varphi_{вы}} \times t. \quad (1)$$

Согласно рис. 4 силы вдоль направления подачи (P_h) и перпендикулярно направлению подачи (P_v) разлагаются на силы вдоль направления скорости резания (P_z) и радиально оси вращения фрезы (P_y):

$$P_z = P_h \times \cos \varphi + P_v \times \sin \varphi \quad (2)$$

$$P_y = P_h \times \sin \varphi - P_v \times \cos \varphi \quad (3)$$

Поскольку подача на зуб s_z небольшая, около 1/16 глубины фрезерования, влияние этой подачи на формулу игнорируется.

По графикам изменения технологических составляющих сил резания P_h и P_v от времени, полученных с помощью динамометра, и их последующего преобразования по формулам (1), (2) и (3) получился график углового положения-силы на рис. 5. Поскольку зубья фрезы не имели износа, в частности, не было фаски износа по задней поверхности, то влияние сил

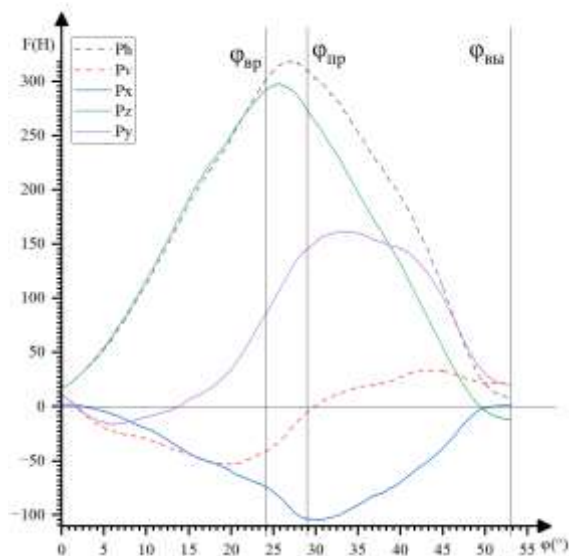


Рис. 5. График изменения сил фрезерования при повороте режущей кромки без износа. Встречное фрезерование 4-х зубой фрезой $\varnothing 8$ мм, $t = 1$ мм, $V = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 125$ мм/мин

на задней поверхности при анализе процесса фрезерования игнорируется.

В процессе врезания зуба сила P_z увеличивается, поскольку длина контакта режущей кромкой с заготовкой постепенно увеличивается. Толщина среза a_i также продолжает увеличиваться, т. к. увеличивается угол ψ : $a_i = s_z \cdot \sin \psi$, где ψ – центральный угол от точки врезания зуба фрезы в заготовку при встречном фрезеровании до текущего его положения. После полного врезания зуба сила P_z будет увеличиваться по-прежнему, поскольку толщина среза по-прежнему увеличивается. В дальнейшем сила P_z уменьшается за счет уменьшения толщины среза по траектории движения режущей кромки перед выходом зуба из контакта с заготовкой. Наконец, при выходе зуба длина контакта между режущей кромкой и заготовкой уменьшается, и сила P_z уменьшается до нуля.

Когда вершина зуба врезается, ею оказывается давящее воздействие на заготовку, поэтому сила P_y изначально положительна. Впо-

следствии, поскольку передний угол γ положителен, и сила, перпендикулярная передней поверхности, велика, для P_y существует диапазон отрицательных значений. В дальнейшем сила P_y быстро возрастает из-за постепенного увеличения длины контакта режущей кромкой с заготовкой и непрерывного увеличения толщины среза. После полного врезания зуба, хотя сила P_y всё еще увеличивается, скорость роста силы P_y замедляется, поскольку увеличивается только толщина среза, а длина контакта режущей кромкой с заготовкой остаётся неизменной. После выхода вершины зуба из заготовки, P_y остается неизменной из-за уменьшения длины контакта режущей кромки с заготовкой и увеличения толщины среза на оставшейся в контакте с заготовкой режущей кромки из-за наличия винтовой канавки. Затем сила P_z уменьшается по мере выхода оставшейся режущей кромки зуба из контакта с заготовкой.

Сила P_x представляет собой силу в осевом направлении фрезы и положительна, т. к. направлена вниз (вспомогательная режущая кромка на торце фрезы давит вниз, т. е. на заготовку). Когда вершина зуба врезается, длина контакта торцевой режущей кромки (вспомогательной режущей кромкой) с заготовкой является больше, чем длина контакта по главной режущей кромки, расположенной на периферии цилиндрической поверхности фрезы, и создаваемая сила (вниз вдоль оси фрезы) положительна, хотя и маленькая. В дальнейшем по мере врезания зуба в заготовку сила P_x начинает тянуть заготовку вверх из-за наличия положительной винтовой канавки на периферии фрезы (там расположена главная режущая кромка), поэтому сила P_x увеличивается в отрицательную сторону. По мере выхода зуба из контакта заготовки сила P_x уменьшается до нуля.

Итак, в процессе врезания зуба тангенциальная составляющая P_z силы фрезерования увеличивается, после полного врезания зуба она достигает максимального значения, а по мере выхода зуба сила фрезерования уменьшается. В отличие от встречного фрезерования при прямой стружечной канавки с $\omega = 0^\circ$, сила увеличивается не резко из-за постепенного входа

в контакт винтовой режущей кромки ($\omega \gg 0^\circ$). Сила P_z выполняет основную работу по удалению припуска, поэтому на острой фрезе она самая большая. После этого можно провести более сложное разложение сил фрезерования: с учётом величины переднего угла рассчитать нормальную N и касательную F физические составляющие силы, действующие на передней поверхности зуба фрезы. Их величина позволит построить эпюры контактных напряжений на передней поверхности зуба фрезы [6], что, в свою очередь, позволит задать внешние нагрузки на 3-D модель зуба фрезы и рассчитать её НДС [7].

Список литературы

1. Klimenov V., Kolubaev E., Anatoly K., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., et al. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti-4Al-3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 16 (2023) Article No. 3901. – DOI: 10.3390/ma16113901.
2. Dong Y.P., Tang J.C., Wang D.W. et al. Additive manufacturing of pure Ti with superior mechanical performance, low cost, and biocompatibility for potential replacement of Ti-6Al-4V. *Materials & Design*. 196 (2020) Article No. 109142. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109142.
3. Navneet Khanna; Kishan Zadafiya; et al. Review on machining of additively manufactured nickel and titanium alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 15 (2023) 3192–3221. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.088.
4. Hojati F., Daneshi A. et al. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*. 62 (2020) 1–9. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.11.002.
5. 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*. 16 (2023) Article No. 4529. – DOI: 10.3390/ma16134529.
6. 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 / V.N. Kozlov, A.S. Babaev, N.A. Shults [et al.] // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 12. – Article number 2009, 16 p. – URL: <https://doi.org/10.3390/met13122009>.
7. Анализ напряжённо-деформированного состояния зуба фрезы / В.Н. Козлов, Ц. Дин, Х. Чжан [и др.] ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет // Современные проблемы машиностроения : сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред кол. А.И. Сечин, М.С. Кухта, А.А. Моховиков [и др.]. – Томск, 2024. – Современные проблемы машиностроения. – С. 209–211. – URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/77435>.