

УДК 621.91.01/621.914.22

Н. Н. ПОПОК, д-р техн. наук, проф.

В. С. АНИСИМОВ

К. В. КОРБА

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(Новополоцк, Беларусь)

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ФРЕЗАМИ С КРУТОНАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ

Аннотация

Рассмотрены преимущества фрезерования поверхностей деталей инструментом с касательным движением крутонаклонной режущей кромки. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики процесса фрезерования плоских поверхностей деталей.

Ключевые слова:

фрезерование, фреза, динамика, касательное движение, угол наклона режущей кромки.

Введение. В связи с развитием металлорежущих станков с ЧПУ, позволяющих реализовывать трех-, четырех- и пятиосевую обработку с обеспечением требуемых значений мощности и скорости резания, увеличивается количество применяемых на практике кинематических схем резания, предложенных проф. Г. И. Грановским [1]. Реализованы такие виды обработки, как винтовая интерполяция, трепанация, трохойдальное и плунжерное резание, в которых реализуются сложные движения и траектории резания, например винтовая, циклоида, трохоида и т. п. [2]. Зачастую в этих видах обработки рекомендуется использовать касательное движение (врезание по касательной) режущих лезвий, а также вращающийся режущий инструмент с крутоспиральными режущими кромками как обеспечивающие плавное (безударное) резание. Эти предложения присутствуют в каталогах и рекламных материалах ведущих в области металлообработки зарубежных фирм, таких как SandvikCoromant (Швеция), Seco (Япония), Hertel (Германия), Iscar (Израиль), TaeguTec (Корея) и др. При этом не объясняется, за счет каких физических и технологических аспектов обработки обеспечиваются преимущества применения касательного движения и инструментов с крутоспиральными режущими кромками. Вместе с тем физические явления, сопровождающие сложные виды обработки резанием, ранее исследовались и описывались ведущими отечественными учеными Г. И. Грановским, Ю. А. Новоселовым, В. В. Шварцем и др.

Согласно ГОСТ 25762 [3] касательное движение D_K – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменить контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. В. Ф. Бобров [4] трактует понятие касательного движения шире и рассматривает наружное

продольное точение резцом с углом наклона режущей кромки, равным 90° , когда режущая кромка касательна к обработанной поверхности, и продольное точение широким резцом с углом наклона режущей кромки, не равным 0° , и углом в плане, равным 0° , когда режущая кромка перемещается вдоль самой себя. Он доказал, что увеличение угла λ при свободном резании уменьшает степень деформации стружки по длине, толщине и ширине.

При механической обработке поверхностей деталей большое значение имеют величины деформации срезаемого слоя, совершаемой при этом работы и потребляемой мощности приводом станка. Особенно актуален учет этих величин при обработке на станках с ЧПУ, для которых характерен нестационарный процесс резания с изменяющимися во времени кинематическими и динамическими показателями. Как правило, современные станки с ЧПУ позволяют фиксировать мощность в процессе резания и корректировать элементы режима резания. Дополнительные возможности по управлению процессом резания обеспечивает применение режущих инструментов с крутонаклонной режущей кромкой. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки плоских и криволинейных поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом (фрезой) на динамические характеристики процесса резания в настоящее время изучены недостаточно. Результаты ниже рассмотренных исследований были положены в основу совершенствования и развития обработки поверхностей деталей в виде тел вращения вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Основная часть. Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость резания, подача) и характеристики (сила резания) процесса резания рассмотрим схему обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рис. 1).

Согласно методике, изложенной в [4], определим нормальную силу N , силу трения F и ее составляющие F_N и F_T .

Часть главной составляющей силы резания

$$P'_Z = P_Z - F_{1Z}. \quad (1)$$

Часть силы подачи

$$P'_X = P_X - N_1. \quad (2)$$

Вспомогательный угол

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P_y}{P_Z}. \quad (3)$$

Нормальная к режущей кромки сила N_{YZ} , действующая вдоль поверхности резания,

$$N_{YZ} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} . \quad (4)$$

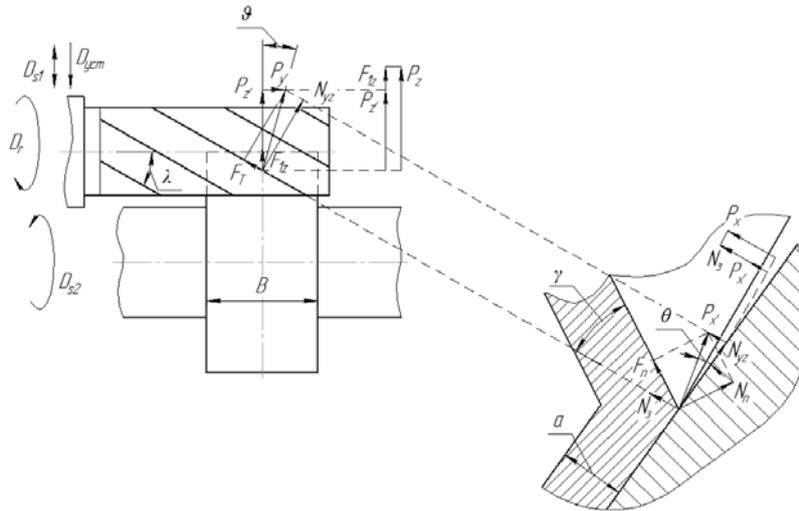


Рис. 1. Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом $\lambda \neq 0$

Вспомогательный угол

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P'_X}{N_{YZ}} . \quad (5)$$

Нормальная к передней поверхности силы

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \cos(\theta + \gamma) . \quad (6)$$

Нормальная сила трения

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \sin(\theta + \gamma) . \quad (7)$$

Касательная сила трения

$$F_T = P'_Z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} . \quad (8)$$

Угол между нормальной и полной силой трения

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_T}{F_N} . \quad (9)$$

Полная сила трения

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}. \quad (10)$$

Средний коэффициент трения

$$\mu = \frac{F}{N}. \quad (11)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (1)–(11), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Ширина обрабатываемой поверхности составляет 7 мм, глубина резания – 1 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материал заготовки – сплав алюминия Д16Т с $\sigma_B = 440$ МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 10 мм, скорость резания принимается равной 250 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, рассчитывается главная составляющая силы резания P_z по общепринятой формуле $P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot s^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}} \cdot K_{pz}$ [5]. При определении влияния угла наклона режущей кромки λ на процесс резания принимается следующее соотношение составляющих силы резания: $P_x = 0$ и $P_y = 0$.

Результаты расчетов представлены в виде фрагментов графиков на рис. 2.

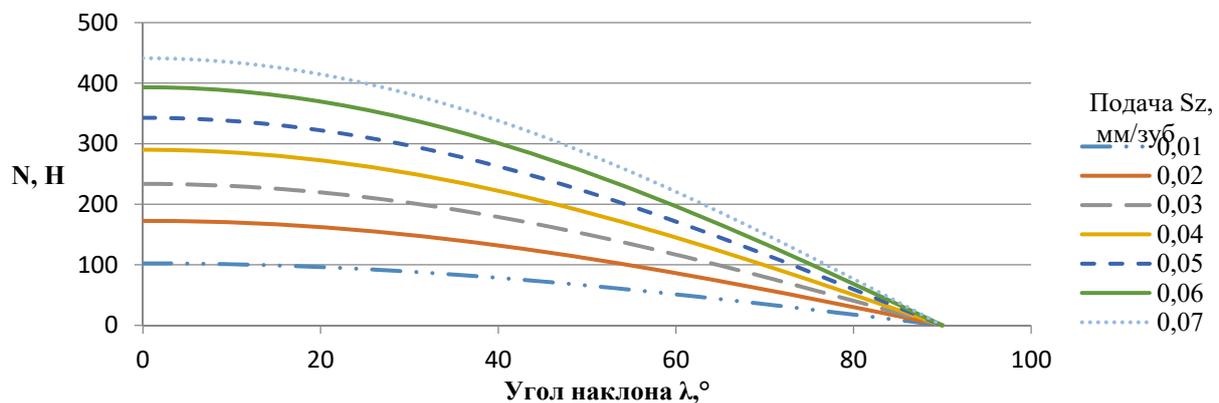


Рис. 2. Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x = 0$ и $P_y = 0$

Если учитываются все три составляющие силы резания P_x , P_y и P_z , то, согласно формуле (3), изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла ϑ . В свою очередь угол ϑ , входящий в формулу (4), влияет на значение угла λ , уменьшая или увеличивая его значения. Это изменение λ ,

в зависимости от заданных условий резания (в данном случае $\lambda = 0^\circ \dots 27^\circ$), приводит к некоторому снижению нормальной силы N (см. рис. 2). Если учитывается только тангенциальная составляющая силы резания P_z , которая имеет наибольшее значение, по сравнению со значениями P_x и P_y , то при $\lambda = 0^\circ$ нормальная сила N имеет максимальное значение и по мере увеличения значения λ (от 0° до 90°) значения N уменьшаются до 0 (см. рис. 2).

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу N по формуле (6), на нормальную и касательную силы трения по формулам (7) и (8), с учетом углов θ (см. формулу (5)) и η (см. формулу (9)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

Для проверки результатов теоретического анализа динамических характеристик фрезерования были проведены эксперименты по измерению сил резания. Методика экспериментальных исследований включает последовательное измерение сил резания при обработке заготовок концевыми фрезами с различными углами наклона главной режущей кромки. Значения угла наклона варьировались в диапазоне $30^\circ \dots 48^\circ$, диаметр фрез – 10 мм, число зубьев – 4. Одна из фрез имела прерывистую главную режущую кромку. Режим резания изменялся как по классическому методу, так и по методу планирования эксперимента. Схема обработки предусматривала фрезерование лыски при последовательном повороте заготовки на очередной ход фрезы. Рассматривалось как встречное, так и попутное фрезерование. Проводились отдельные опыты по фрезерованию вращающейся заготовки. При измерении сил резания принята система координат станка. Обработка проводилась на вертикальном обрабатывающем центре FANUC Robodrill серии a-D21LiB. Материал заготовки – сплав алюминия Д16т. Для измерения сил резания был спроектирован и изготовлен программно-измерительный комплекс (рис. 3), который позволил фиксировать изменение силы в коротком промежутке времени (50 мс).

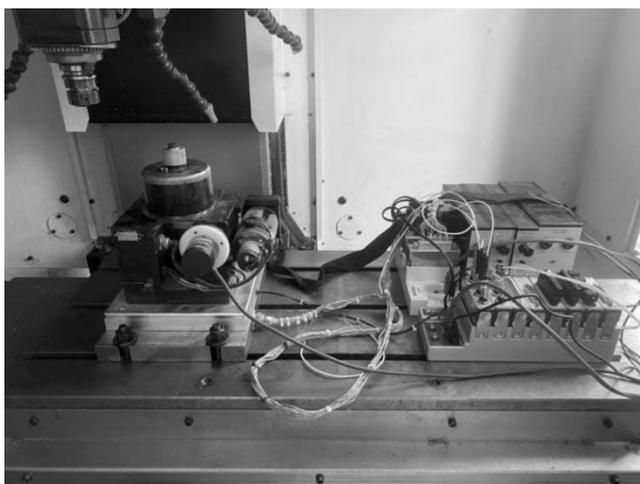


Рис. 3. Программно-измерительный комплекс

В результате измерений получены зависимости изменения сил по координатам станка от времени обработки, отдельный фрагмент которых

представлен на рис. 4. На рис. 5 показаны изменения сил P_{xy} и $P_{танг}$, полученные пересчетом суммарных значений P_x , P_y , P_z .

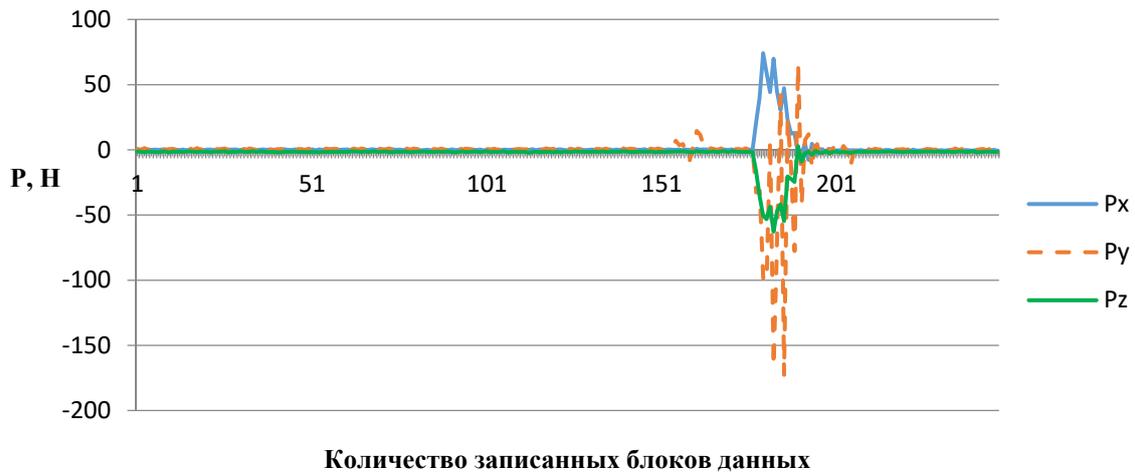


Рис. 4. Зависимости составляющих сил резания при $\lambda = 48^\circ$ от времени обработки

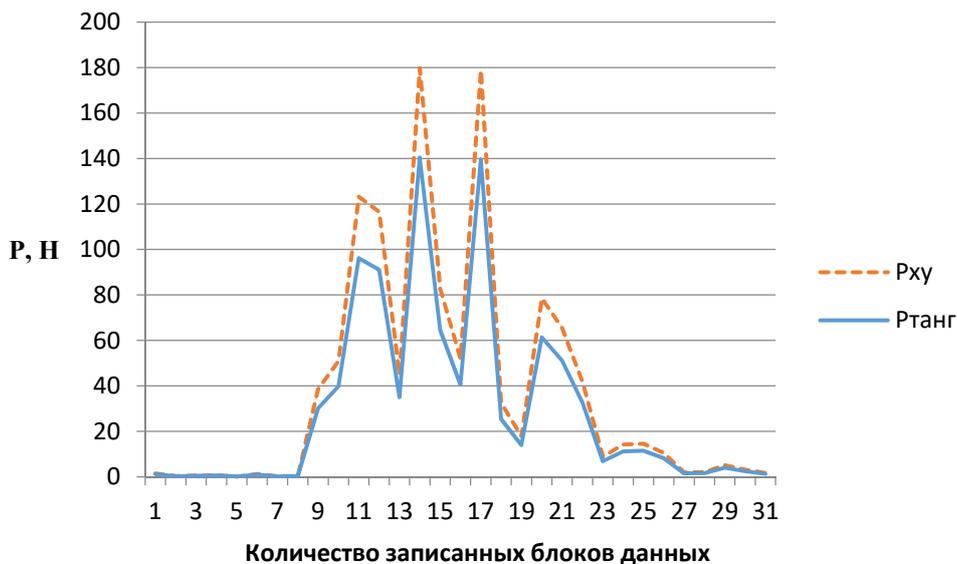


Рис. 5. Зависимости составляющих сил резания при $\lambda = 48^\circ$, полученные пересчетом

Установлено, что с увеличением угла наклона режущей кромки составляющие силы резания уменьшаются. К уменьшению сил резания также приводит уменьшение длины режущей кромки за счет выполнения ее прерывистой, что подтверждает результаты теоретических исследований. Уменьшению силы также способствует врезание фрезы в заготовку по касательной. Установлено, что большие значения угла наклона режущей кромки увеличивают осевую составляющую силы резания и в этом случае целесообразно переходить к схеме плунжерного фрезерования.

При обработке вращающейся заготовки по схеме встречного фрезерования наблюдается рост силы резания, а при попутном фрезеровании – уменьшение.

Заключение. Рассмотрена схема фрезерования плоской поверхности вращающейся заготовки и получены формулы для нормальной силы и силы трения. Анализ формул позволил установить уменьшение нормальной силы при увеличении угла наклона режущей кромки, что позволяет за счет изменения последнего управлять силой и мощностью резания.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают полученные теоретические зависимости при фрезеровании заготовок концевой фрезой. С увеличением угла наклона режущих кромок в пределах $30^\circ \dots 48^\circ$ установлено уменьшение силы резания до 18 %...23 %. Уменьшению силы резания также способствует врезание фрезы в заготовку по касательной, попутное фрезерование вращающейся заготовки и прерывистой (уменьшение длины) режущей кромки. Полученные зависимости позволяют оптимизировать режим резания, повысить производительность обработки и эффективность использования мощности привода станка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. – Москва: Машгиз, 1948. – 199 с.
2. Попок, Н. Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, М. В. Черневич // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: Бизнесофсет, 2014. – С. 93–95.
3. ГОСТ 25762. Обработка резанием. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.
4. Бобров, В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машгиз, 1962. – 152 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.: ил.

Контакты:

n.porok@psu.by (Попок Николай Николаевич);
v.anisimov@psu.by (Анисимов Виталий Сергеевич);
korba79@mail.ru (Корба Кирилл Васильевич).

N. N. POROK, V. S. ANISIMOV, K. V. KORBA

DYNAMICS OF THE CUTTING PROCESS WITH CUTTERS WITH STEEPLY INCLINED CUTTING EDGES

Abstract

The advantages of milling the surfaces of parts with a tool with a tangential movement of a steeply inclined cutting edge are considered, the results of theoretical and experimental studies of the dynamics of the milling process of flat surfaces of parts are presented.

Keywords:

milling, milling cutter, dynamics, tangential motion, angle of inclination of the cutting edge.