

УДК 621.91.01

**ДЕФОРМАЦИЯ И СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ И КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ВРАЩАЮЩИМСЯ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ
НА ТОКАРНЫХ И ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Приведены схемы обработки и формулы для расчета коэффициентов утолщения, укорочения и уширения стружки, нормальной силы и силы трения, работы деформации и трения. Проведен анализ этих схем и формул и установлены зависимости характеристик процесса резания от изменения угла наклона режущей кромки инструмента.

Ключевые слова: образование стружки, деформация, коэффициент усадки стружки, сила резания, составляющие силы резания, работа и мощность резания.

Введение. 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 кругонаклонной режущей кромкой [1]. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки плоских и криволинейных поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом (фрезы) на деформационные характеристики процесса резания в настоящее время изучены недостаточно.

Основная часть. Рассмотрим процесс превращения срезаемого слоя в стружку при резании инструментом с углом $\lambda \neq 0$, при котором каждая точка режущей кромки работает с одинаковым по величине и направлению вектором истинной скорости резания, одинаковой толщиной срезаемого слоя и постоянной величиной кинематического угла наклона главной режущей кромки [1] применительно к схеме резания, представленной на рисунке 1 [2].

Если считать, что обрабатываемый материал абсолютно недеформируем, то при перемещении инструмента из положения ap в положение cd на расстояние L развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки представляет собой параллелограмм $apcd$ с основанием, равным рабочей длине режущей кромки b , и высотой, равной расстоянию по нормали L_N между положениями режущей кромки. Боковые стороны параллелограмма, определяющие направление схода стружки по передней поверхности инструмента, составляют с нормалью к режущей кромке угол, равный углу наклона главной режущей кромки λ .

При резании реального материала в результате деформирования срезаемого слоя развернутая на передней поверхности контактная поверхность срезанной стружки в первом приближении представляет параллелограмм a_2p_2cd с основанием, равным рабочей длине режущей кромки, и высотой L_{CN} , меньшей, чем расстояние по нормали L_N . Стороны этого параллелограмма образуют с перпендикуляром к режущей кромке угол η , в общем случае не равный углу λ .

Как показал А.А. Брикс [3], превращение параллелограмма $apcd$ в параллелограмм a_2p_2cd может быть объяснено следующим образом. Движение любой точки наклонной режущей кромки в направлении вектора скорости резания \vec{v}_r может быть представлено состоящим из двух движений: в направлении, нормальном к режущей кромке, определяемого вектором \vec{v}_N , и в другом – параллельном режущей кромке, определяемого вектором \vec{v}_T .

При перемещении в направлении, нормальном к режущей кромке, на расстояние L отдельные слои металла толщиной Δx , деформируясь по плоскости сдвига в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, вызовут укорочение срезаемого слоя до размера L_{CN} . При перемещении вдоль режущей кромки на расстояние L_T слои образовавшейся стружки, параллельные режущей кромке, увлекаемые передней поверхностью инструмента, сдвинутся вдоль режущей кромки так, что верхний край стружки переместится на расстояние ΔL_{CT} .

Сдвиг слоев стружки вдоль режущей кромки легко подтверждается следующим. Если на верхней плоскости срезаемого слоя нанести риску ep , перпендикулярную к режущей кромке инструмента, то на срезанной стружке эта риска займет положение ep_2 , отклонившись от перпендикуляра к режущей кромке в направлении вектора скорости \vec{v}_T на угол χ .

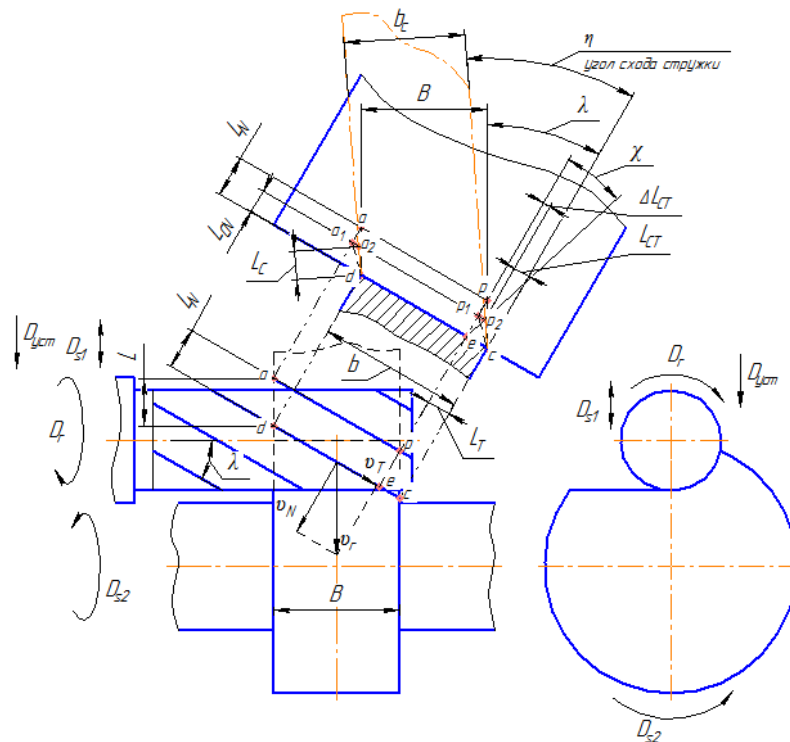


Рисунок 1. – Схема образования стружки при резании инструментом с углом $\lambda \neq 0$

В результате одновременного суммарного воздействия на срезаемый слой двух перемещений срезаемая стружка будет характеризоваться следующими размерами: нормальной длиной L_{CN} , толщиной a_c , шириной b_c и углом схода стружки η по передней поверхности. Степень конечного формоизменения срезаемого слоя, превратившегося в стружку, можно оценить соответствующими коэффициентами деформаций: степень деформации стружки в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, – коэффициентом нормального укорочения K_{IN} ; степень деформации в направлении, перпендикулярном к контактной поверхности стружки, – коэффициентом утолщения K_a ; степень деформации в направлении, перпендикулярном к боковой стороне стружки, – коэффициентом уширения K_b .

Согласно рисунку 1 коэффициент нормального укорочения стружки равен

$$K_{IN} = \frac{L_N}{L_{cN}}. \tag{1}$$

Из рисунка 1 также следует, что

$$L = \frac{L_N}{\cos \lambda}, \quad L_c = \frac{L_{cN}}{\cos \eta}.$$

Тогда

$$K_l = \frac{L}{L_c} = \frac{L_N}{L_{cN}} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda} \text{ или } K_l = K_{IN} \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}. \tag{2}$$

Коэффициент утолщения стружки

$$K_a = \frac{a_c}{a}. \tag{3}$$

Коэффициент уширения стружки

$$K_b = \frac{b_c}{B}, \tag{4}$$

где B – расстояние по нормали между боковыми сторонами идеальной недеформированной стружки, равное ширине срезаемого слоя.

Коэффициент уширения стружки может быть выражен через угол наклона режущей кромки и угол схода стружки:

$$b_c = K \cdot b \cdot \cos \eta,$$

где K – коэффициент уширения стружки вдоль режущей кромки, $K > 1$.

Т.к. $b = \frac{B}{\cos \lambda}$, то $b_c = K \cdot B \cdot \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}$. Отсюда

$$K_b = K \frac{\cos \eta}{\cos \lambda}. \quad (5)$$

Если в уравнении (5) принять $K = 1$, то получим известную формулу М.Е. Мерченга [4].

Согласно методике определения нормальной силы N , силы трения F и ее составляющих F_N и F_T [1], рассмотрим схему обработки (рисунок 2), где N – нормальная сила; F_N – нормальная сила трения (проекция полной силы трения на нормальную плоскость); F_T – касательная сила трения; P_Z' – часть главной составляющей силы резания P_Z ; F_{1Z} – сила трения, действующая на поверхности резания вдоль оси Z в сторону, обратную рабочему движению инструмента.

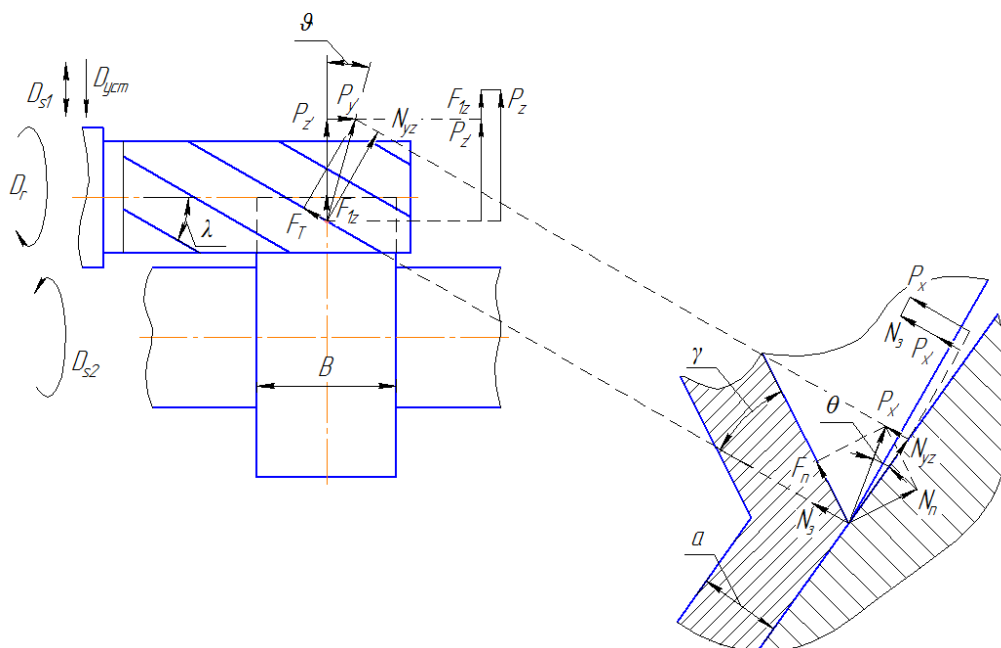


Рисунок 2. – Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом $\lambda \neq 0$

Часть главной составляющей силы резания P_Z

$$P_Z' = P_Z - F_{1Z}. \quad (6)$$

Часть силы подачи P_X

$$P_X' = P_X - N_1. \quad (7)$$

Вспомогательный угол ϑ

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P_Y}{P_Z}. \quad (8)$$

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

$$N_{YZ} = P_Z' \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (9)$$

Вспомогательный угол θ

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_X'}{N_{YZ}}. \quad (10)$$

Нормальная к передней поверхности силы N

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \cos(\theta + \gamma). \quad (11)$$

Нормальная сила трения F_N

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos \theta} \sin(\theta + \gamma). \quad (12)$$

Касательная сила трения F_T

$$F_T = P_z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (13)$$

Угол между нормальной и полной силой трения η

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_T}{F_N}. \quad (14)$$

Полная сила трения F

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}. \quad (15)$$

Средний коэффициент трения μ

$$\mu = \frac{F}{N}. \quad (16)$$

Минутная работа резания достаточно точно определяется уравнением

$$E = E_\theta + E_{T,n} + E_{T,z}, \quad (17)$$

где E_θ – минутная работа деформации;
 $E_{T,n}$ – минутная работа трения на передней поверхности;
 $E_{T,z}$ – минутная работа трения на задней поверхности.

Удельная работа резания

$$e = e_\theta + e_{T,n} + e_{T,z}.$$

Удельная работа резания и каждая ее составляющая находятся делением минутной работы на минутный объем срезаемого слоя, равный произведению aBv (рисунок 3).

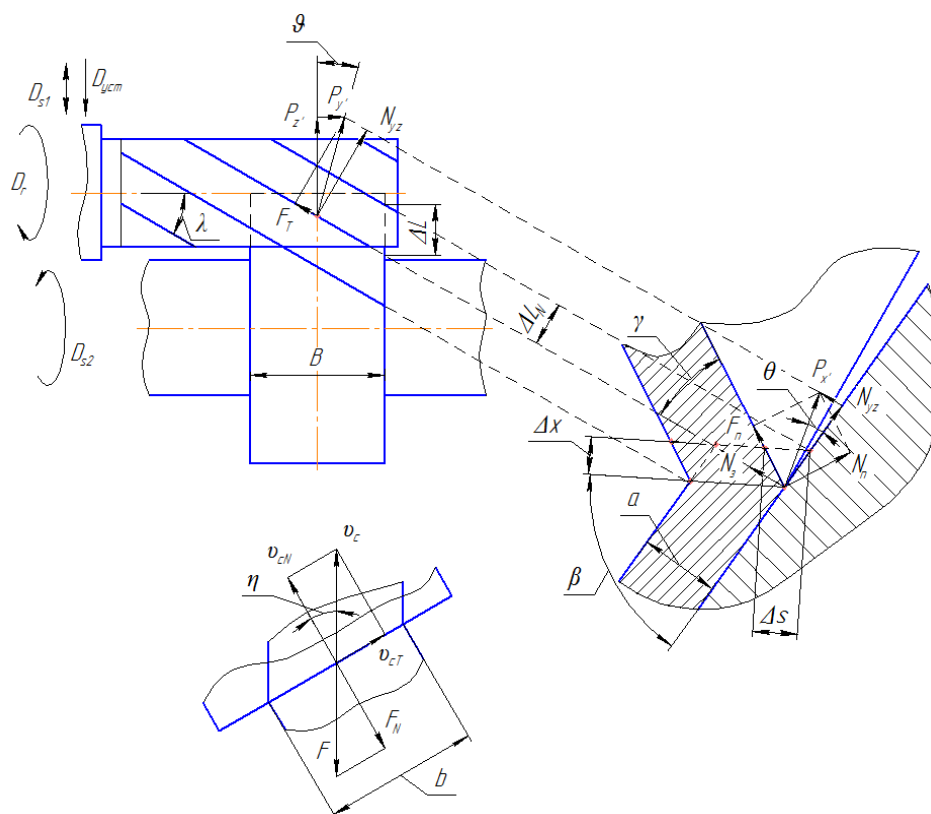


Рисунок 3. – Схема для определения составляющих работы резания инструментом с углом $\lambda \neq 0$

Работа деформации состоит из двух частей:

$E_{\theta N}$ – работы, соответствующей перемещению инструмента в направлении, перпендикулярном к режущей кромке;

$E_{\theta T}$ – работы, соответствующей перемещению инструмента вдоль режущей кромки.

Работа простого сдвига под углом β в направлении, перпендикулярном к режущей кромке,

$$E'_{\partial N} = P_{\tau} \cdot \Delta s, \quad (18)$$

где P_{τ} – сила сдвига;

Δs – величина сдвига на плоскости сдвига, соответствующая перемещению режущей кромки инструмента на расстояние ΔL_N .

Величина сдвига

$$\Delta s = \Delta L_N \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}.$$

Тогда

$$E'_{\partial N} = P_{\tau} \cdot \Delta L \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (19)$$

Минутная работа деформации

$$E_{\partial N} = P_{\tau} \cdot v \frac{\cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}, \quad (20)$$

где $P_{\tau} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta}$;

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P'_Y}{P'_Z},$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P'_X}{P'_Z} \cdot \frac{\cos \vartheta}{\cos(\lambda - \vartheta)}.$$

Окончательно получаем:

$$E_{\partial N} = P'_Z \cdot v \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta}. \quad (21)$$

Работа простого сдвига вдоль режущей кромки

$$E'_{\partial T} = P_T \cdot \Delta T_c, \quad (22)$$

где ΔT_c – сдвиг стружки вдоль режущей кромки, соответствующий перемещению инструмента на расстояние ΔL_N ,

$$\Delta T_c = \Delta L_N \cdot \operatorname{tg} \lambda - \Delta L_{CN} \cdot \operatorname{tg} \eta,$$

где ΔL_{CN} – длина стружки, соответствующая перемещению инструмента на расстояние ΔL_N ,

$$\Delta L_{CN} = \Delta L_N \cdot \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} = \Delta L \cdot \frac{\cos \lambda}{K_{IN}},$$

$$\Delta L_{CN} = \frac{\Delta L}{K_I} \cdot \cos \eta.$$

Окончательно:

$$\Delta T_c = \Delta L \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right). \quad (23)$$

Минутная работа деформации

$$E_{\partial T} = P'_Z \cdot v \cdot \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right). \quad (24)$$

Суммарная минутная работа деформации

$$E_{\partial} = P'_Z \cdot v \cdot \left[\frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) \right], \frac{\text{кГм}}{\text{мин}}. \quad (25)$$

Удельная работа деформации

$$e_{\partial} = \frac{P'_Z}{aB} \cdot \left[\frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta} + \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \cdot \left(\sin \lambda - \frac{\sin \eta}{K_I} \right) \right] \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}}. \quad (26)$$

Работа трения на передней поверхности

$$E_{T,n} = F \cdot v_c. \quad (27)$$

Сила трения

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}, \quad (28)$$

где $F_N = P_Z \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\cos \vartheta \cdot \cos \theta}.$ (29)

Скорость движения стружки

$$v_c = \frac{v}{K_l}. \quad (30)$$

Минутная работа на передней поверхности

$$E_{T.n} = P_Z \cdot v \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta}, \frac{\text{кГм}}{\text{мин}}. \quad (31)$$

Удельная работа трения на передней поверхности

$$e_{T.n} = \frac{P_Z}{aB} \cdot \frac{\cos(\lambda - \vartheta) \cdot \sin(\theta + \gamma)}{K_l \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta \cdot \cos \eta} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кГм}}{\text{мм} \cdot \text{мин}}. \quad (32)$$

Минутная работа на задней поверхности

$$E_{T.z} = E - (E_o + E_{T.n}). \quad (33)$$

Удельная работа трения на задней поверхности

$$e_{T.z} = e - (e_o + e_{T.n}) \cdot 10^{-3}, \text{кГм/мм}^3. \quad (34)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (6)–(34), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) вращающейся детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Ширина обрабатываемой поверхности составляет 20 мм, глубина резания – 3 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материалом заготовки служит конструкционная сталь с $\sigma_B = 600$ МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 16 мм, скорость резания принимается равной 100 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, можно рассчитать главную составляющую 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: $P_x = 0,3P_z$ и $P_y = 0,5P_z$; $P_x = 0$ и $P_y = 0$.

Результаты расчетов представлены в виде фрагментов графиков на рисунках 4 и 5.

Если учитываются все три составляющие силы резания P_x , P_y и P_z , то согласно выражению (8) изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла ϑ . В свою очередь, угол ϑ , входящий в выражение (9), влияет на значение угла λ , уменьшая или увеличивая его значения. Это изменение λ в зависимости от заданных условий резания (в нашем случае $\lambda = 0 \dots 27^\circ$) приводит к некоторому снижению нормальной силы N (рисунок 4). 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 (рисунок 5).

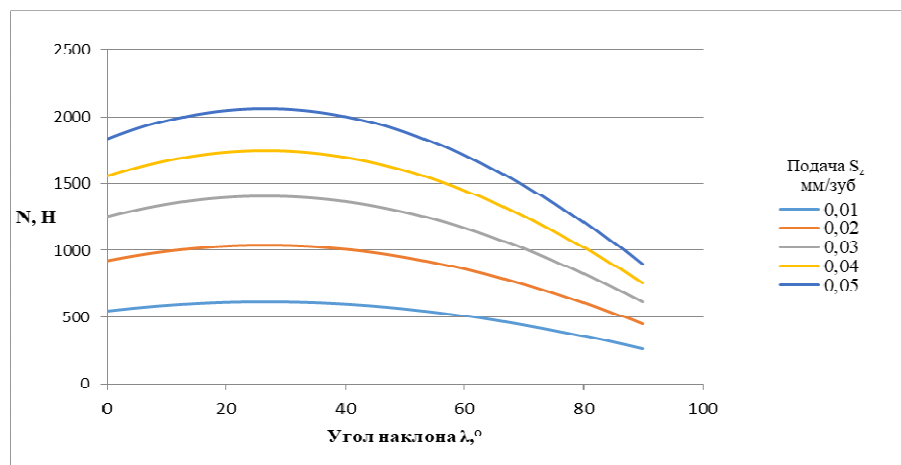


Рисунок 4. – Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x = 0,3P_z$ и $P_y = 0,5P_z$

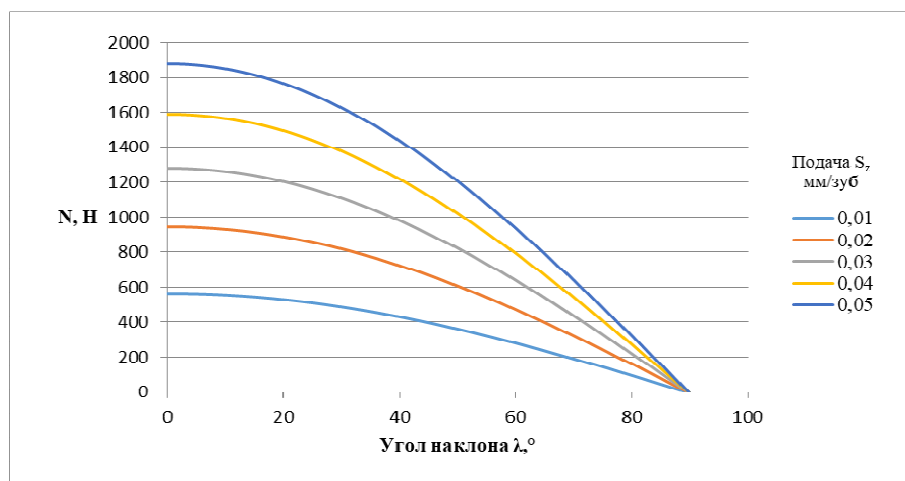


Рисунок 5. – Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x = 0$ и $P_y = 0$

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу N по выражению (11), на нормальную и касательную силы трения по (12), (13) с учетом углов θ (выражение (10)) и η (выражение (14)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

Заключение. Выведенные формулы для расчета механических характеристик процесса резания позволяют учитывать зависимость силы резания от угла наклона режущей кромки для различных условий обработки – с увеличением угла наклона режущей кромки инструмента сила резания уменьшается. С учетом радиальной и осевой составляющих силы резания значения нормальной силы резания при малых значениях угла наклона режущей кромки ($\lambda < 30^\circ$) несколько снижается. При больших значениях λ рекомендуется реализовывать кинематические схемы плунжерного фрезерования, ротационного резания и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
2. Попок, Н.Н. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки / Н.Н. Попок, В.С. Анисимов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 31–38.
3. Брикс, А.А. Резание металлов (строгание) / А.А. Брикс. – СПб. : Тип. М.М. Стасюлевича, 1896. – 163 с.
4. Merchant, M.E. Basic Mechanics of the Metal Cutting Process / M.E. Merchant // Transactions of the ASME. – 1944. – Vol. 66.
5. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.

Поступила 10.01.2020

DEFORMATION AND CHIP FORMATION WHEN PROCESSING FLAT AND CURVED SURFACES OF PARTS WITH A ROTATING CUTTING TOOL ON CNC LATHES AND MILLING MACHINES

N. POPOK, V. ANISIMOV

Diagrams of processing and formulas for calculation of factors of thickening, shortening and widening of the chip, normal forces and friction, work of deformation and friction, the analysis of these diagrams and formulas and the dependence of the characteristics of the cutting process of changing the angle of inclination of the tool cutting edge.

Keywords: *chip formation, deformation, chip shrinkage coefficient, cutting force, components of the cutting force, work and cutting power.*