УДК 621.97

Д. Г. Шатуров, О. В. Благодарная, М. В. Панков, Д. П. Снытков

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УГЛОВ ПРИЗМАТИЧЕСКОГО РЕЗЦА ПРИ ТОЧЕНИИ

UDC 621.97

D. G. Shaturov, O. V. Blagodarnaya, M. V. Pankov, D. P. Snytkov

RESEARCH ON WORKING ANGLES OF PRISMATIC TOOLS IN TURNING PROCESS

Аннотация

Приведена методика определения кинематических (рабочих) углов призматического резца. Получены зависимости, позволяющие определить величину кинематических углов в зависимости от режимов резания. Дана оценка их влияния и геометрических параметров инструмента на величину его рабочих углов.

Ключевые слова:

резание, углы резания, скорость резания, износ, стойкость, подача, система координат.

Abstract

Experimental studies of the mechanical characteristics of the steel EN 1.4003, applied in the design of the city bus of medium capacity were conducted. Based on the results of the tests, the identification of the main pamation and structural destruction processes was performed. The results of the full-scale and virtual versions of mechanical tests were compared. The results of the comparison showed satisfactory agreement.

Key words:

cutting, cutting angles, cutting speed, wear, durability, feed, coordinate system.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Большое влияние на износ, стойкость инструмента, температуру и величину сил при резании оказывают кинематические или рабочие углы резца, которые отличаются от статистических углов его заточки. На сегодняшний день нет достаточно простых, универсальных зависимостей для определения кинематических углов резца, хотя этому вопросу посвящено много работ [1–3 и др.]. Имеющиеся зависимости [1, 2] сложны, что сдерживает их применение в производственных условиях.

При определении рабочих углов призматического резца использованы методики, изложенные в работах академика Е. Г. Коновалова и его учеников [4–6]. При точении имеем два движения: главное движение со скоростью резания V, обусловленное частотой вращения заготовки, и продольное перемещение резца со скоростью подачи $S_м$:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}; \qquad (1)$$

$$S_м = S \cdot n, \qquad (2)$$

где D – диаметр заготовки, мм; n – частота вращения заготовки, мин$^{-1}$; S – подача, мм/об; $S_м$ – минутная подача, мм/мин.

В результате векторного сложения этих двух движений обработка происходит со скоростью $V_{рд}$:

© Шатуров Д. Г., Благодарная О. В., Панков М. В., Снытков Д. П., 2018

$$\overline{V}_{рд} = \overline{V} + \overline{S}_{м}, \qquad (3)$$

где $V_{рд}$ – скорость главного рабочего движения или истинная скорость резания.

Вследствие этого имеем несовпадения величин статических углов заточек резца с кинематическими или рабочими углами.

Для определения кинематических (рабочих) углов резца составим в произвольной точке M линии контакта лезвия резца с заготовкой две прямоугольные системы координат: XYZ и $X_0Y_0Z_0$ (рис. 1). Система XYZ связана с заготовкой, $X_0Y_0Z_0$ – с резцом. Положительное направление осей выберем таким образом, чтобы ось MZ совпадала с направлением скорости главного рабочего движения $\overline{V}_{рд}$, ось MY была направлена перпендикулярно обрабатываемой поверхности в сторону расположения резца, ось MX_0 проходила бы вдоль, а ось MY_0 перпендикулярно режущей кромке в плоскости, касательной к передней поверхности резца. Направление осей MX и MZ_0 обусловлено образованием правой системы координат.

Система координат $X_0Y_0Z_0$ получается из первоначальной XYZ путём четырёх последовательных поворотов на углы μ, ξ, φ, λ (см. рис. 1).

В исходной системе XYZ действуют единичные векторы e_x, e_y и e_z. Напишем матрицу преобразования, приводящую систему XYZ к системе $X_0Y_0Z_0$.

$$E = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \qquad (4)$$

где $a_{11} = \cos\lambda(\cos\mu\cos\varphi + \sin\mu\sin\xi\sin\varphi) - \sin\mu\cos\xi\sin\lambda$;

$a_{21} = -\cos\mu\sin\varphi + \sin\mu\sin\xi\cos\varphi$;

$a_{31} = -\sin\lambda\cos\mu\cos\varphi - \sin\lambda\sin\mu\sin\xi\sin\varphi - \sin\mu\cos\xi\cos\lambda$;

$a_{12} = \cos\xi\sin\varphi\cos\lambda + \sin\xi\sin\lambda$;

$a_{22} = \cos\xi\cos\varphi$;

$a_{32} = -\cos\xi\sin\varphi\sin\lambda + \sin\xi\cos\lambda$;

$a_{13} = \sin\mu\cos\varphi\cos\lambda - \cos\mu\sin\xi\sin\varphi\cos\lambda + \cos\mu\cos\xi\sin\lambda$;

$a_{23} = -\sin\mu\sin\varphi - \cos\mu\sin\xi\cos\varphi$;

$a_{33} = -\sin\mu\cos\varphi\sin\lambda + \cos\mu\sin\xi\sin\varphi\sin\lambda + \cos\mu\cos\xi\cos\lambda$.

При $\lambda = 0$ и $\xi = 0$ имеем следующее:

$a_{11} = -\cos\mu\cos\varphi$;

$a_{21} = -\cos\mu\sin\varphi$; $a_{31} = -\sin\mu$;

$a_{12} = \sin\varphi$; $a_{22} = \cos\varphi$; $a_{32} = 0$;

$a_{13} = \sin\mu\cos\varphi$; $a_{23} = -\sin\mu\sin\varphi$.

Углы μ и ξ определяются из зависимостей

$$\mathrm{tg}\mu = \frac{S}{\pi D_i}; \qquad (5)$$

$$\sin\xi = \frac{2h}{D_i}; \qquad (6)$$

$$h = t_i\frac{\mathrm{tg}\lambda}{\mathrm{tg}\varphi}, \qquad (7)$$

где φ – главный угол в плане; λ – угол наклона режущей кромки (РК); h – превышение или занижение рассматриваемой точки РК по отношению к линии центров станка; D_i, t_i – диаметр детали и глубина резания, соответствующие рассматриваемой точке M РК (см. рис. 1).

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

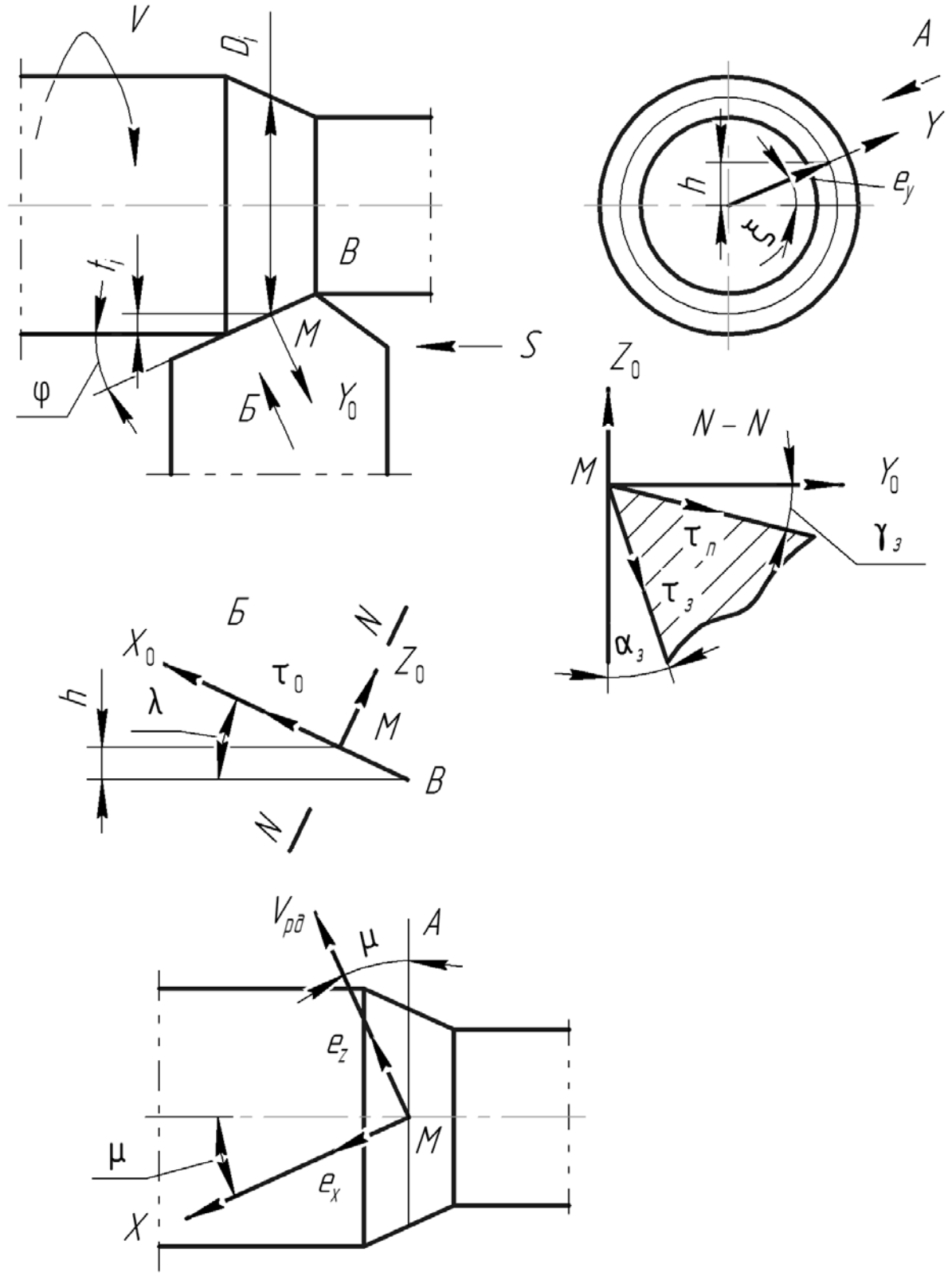

Рис. 1. Схема определения рабочих углов токарного проходного резца

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Направление схода стружки связано с кинематическим углом наклона режущей кромки $\lambda_к$. Определим его величину.

Угол наклона $\lambda_к$ режущей кромки определяется как угол между касательной τ_0 (1, 0, 0) к режущей кромке и плоскостью P (x, y, z), перпендикулярной к вектору $\overline{V}_{рд}$ (ось MZ, см. рис. 1) и проходящей через начало координат.

$$P(x, y, z) = a_{13}x + a_{23}y + a_{33}z = 0. \quad (8)$$

Тогда

$$\sin\lambda_к = a_{13} = \cos\lambda(\sin\mu\cos\varphi - \\ - \cos\mu\sin\xi\sin\varphi) + \cos\mu\cos\xi\sin\lambda. \quad (9)$$

При $\lambda = 0$ и $\xi = 0$ имеем

$$\sin\lambda_к = \sin\mu\cos\varphi. \quad (10)$$

В табл. 1 представлены расчётные значения угла μ и угла $\lambda_к$ от подачи S и угла φ, а на рис. 2 – графики изменения угла $\lambda_к$ от углов φ и μ. Как видно из (10), при $\lambda = 0$ всегда имеем положительный угол $\lambda_к \geq 0$, т. е. стружка всегда сходит в сторону обработанной поверхности. При $\varphi = 0$ угол $\lambda_к = \mu$, а при $\varphi = 90^o$ угол $\lambda_к = 0$. Увеличение подачи S всегда приводит к увеличению углов μ и $\lambda_к$, а увеличение угла φ влечет за собой уменьшение величины кинематического угла наклона режущей кромки $\lambda_к$.

Табл. 1. Значения угла $\lambda_к$ в зависимости от подачи S и главного угла в плане φ (D = 50 мм)

S, мм/об		0,2	0,5	1,0	2,0	4,0	
μ^0		0,073	0,1825	0,365	0,73	1,46	90
		$\lambda_к^0$					
φ^0	0	0,073	0,1825	0,365	0,73	1,46	90
	10	0,0718	0,1797	0,359	0,719	1,437	80
	20	0,068	0,171	0,343	0,686	1,37	70
	45	0,051	0,129	0,258	0,516	1,03	45
	60	0,0365	0,091	0,182	0,365	0,73	30
	90	0	0	0	0	0	0

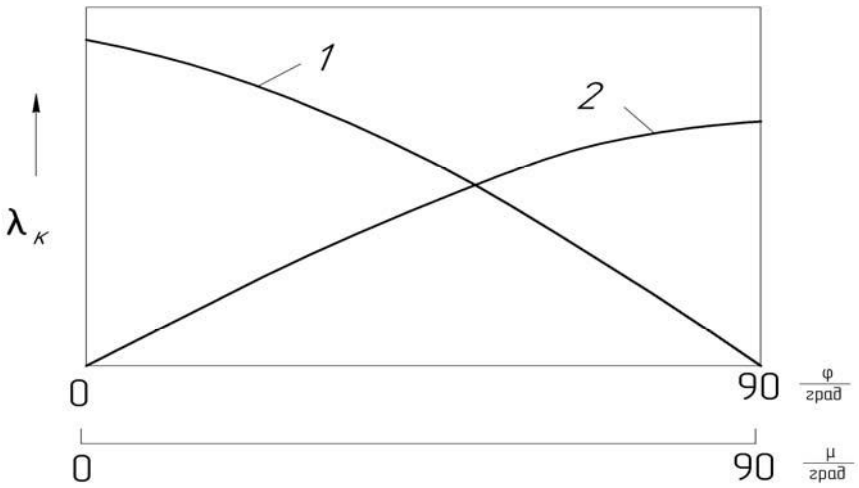

Рис. 2. Закономерности изменения кинематического угла наклона режущей кромки $\lambda_к$ от главного угла в плане φ (*1*) и угла наклона μ (*2*) скорости главного рабочего движения $V_{рд}$ в направлении подачи

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Наличие взаимного перемещения резца и заготовки влияет на такие параметры процесса, как износ инструмента, температура в зоне резания и величина сил при резании. Всё это предопределяет необходимость изучения кинематических или рабочих углов инструмента.

Передний кинематический угол $\gamma_к$ определяется как угол между плоскостью, перпендикулярной вектору скорости результирующего рабочего движения резания $-\overline{V}_{рд}$, и касательной $\tau_п(0, \cos\gamma_з, -\sin\gamma_з)$ (см. рис. 1) к передней поверхности резца, проведённой в точке режущей кромки в направлении, нормальном к главному лезвию (см. рис. 1).

Напишем уравнение плоскости, перпендикулярной вектору $-\overline{V}_{рд}$ и проходящей через начало координат:

$$Q(x,y,z) = -a_{13}x - a_{23}y - a_{33}z = 0. \quad (11)$$

Теперь находим угол $\gamma_к$:

$$\sin\gamma_к = -a_{23}\cos\gamma_з + a_{33}\sin\gamma_з, \quad (12)$$

или, с учётом (4), в развёрнутом виде как

$$\begin{aligned}\sin\gamma_к = {} & \cos\gamma_з(\sin\mu\cos\varphi + \\ & \cos\mu\sin\xi\sin\varphi) + \sin\gamma_з \times \\ & \times(-\sin\lambda\sin\mu\cos\varphi + \\ & + \sin\lambda\cos\mu\sin\xi\sin\varphi + \\ & + \cos\mu\cos\xi\cos\lambda), \end{aligned} \quad (13)$$

где $\gamma_з$ – передний угол заточки резца – это угол между плоскостью, проходящей через главное лезвие резца перпендикулярно плоскости резания, и касательной $\tau_п$ к передней поверхности резца, лежащей в нормальной к режущей кромке плоскости.

Плоскость резания – это плоскость, проходящая через главное лезвие резца перпендикулярно опорной плоскости.

При $\lambda = 0$ и $\xi = 0$ имеем

$$\sin\gamma_к = \cos\gamma_з\sin\mu\sin\varphi + \sin\gamma_з\cos\mu. \quad (14)$$

Отметим особые случаи при обработке резцом вала.

При $\varphi = 0$ осуществляется точение радиальной канавки.

$$\sin\gamma_к = \sin\gamma_з\cos\mu. \quad (15)$$

При $\varphi = 0$ и $\mu = 0$ имеем $\gamma_к = \gamma_з$ (кинематический угол $\gamma_к$ равен статическому $\gamma_з$).

При $\varphi = 90°$

$$\sin\gamma_к = \cos\gamma_з\sin\mu + \sin\gamma_з\cos\mu. \quad (16)$$

На рис. 3 представлены графики изменения угла $\gamma_к$ от подачи S и от главного угла в плане φ. С увеличением подачи S и угла φ в рассмотренном диапазоне их изменения величина угла $\gamma_к$ возрастает до двух градусов.

Кинематический задний угол $\alpha_к$ находится как угол между плоскостью, касательной к поверхности резания в данной точке лезвия, и касательной $\tau_з(0, \sin\alpha_з, -\cos\alpha_з)$ к затылочной поверхности резца в той же точке лезвия в нормальной к режущей кромке плоскости (см. рис. 1).

Плоскость $Q(x,y,z)$, касательную к поверхности резания, получим из компланарности векторов $\tau_0(1, 0, 0)$ и скорости результирующего рабочего движения $\overline{V}_{рд}(a_{13}, a_{23}, a_{33})$.

$$Q(x,y,z) = \begin{vmatrix} x & y & z \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0, \quad (17)$$

или

$$Q(x,y,z) = a_{33}y - a_{23}z = 0. \quad (18)$$

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

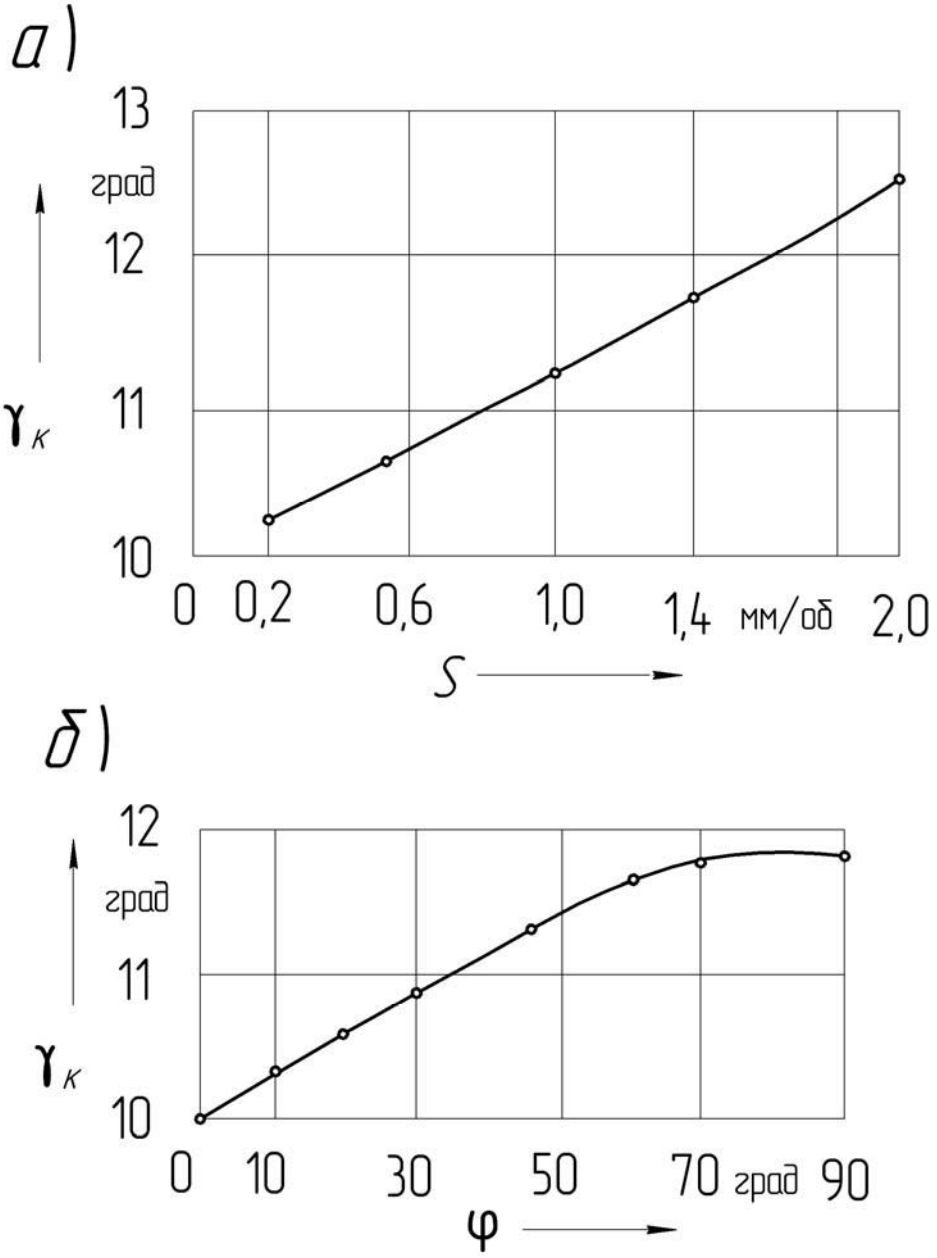

Рис. 3. Зависимость кинематического угла $\gamma_к$ от подачи S (*а*) и главного угла в плане φ (*б*): $\gamma_з = 10^o$, $D = 10$ мм; *а* – $\varphi = 45^o$; *б* – $S = 1{,}0$ мм/об

После преобразования уравнения (18) в нормальное уравнение имеем

$$Q(x, y, z) = \frac{a_{33}}{\cos\lambda_к} y - \frac{a_{23}}{\cos\lambda_к} z = 0. \quad (19)$$

Тогда задний рабочий угол $\alpha_к$ между касательной $\tau_з(0, \sin\alpha_з, -\cos\alpha_з)$ и плоскостью $Q(x, y, z)$

$$\sin\alpha_к = \frac{1}{\cos\lambda_к} \times$$
$$\times (a_{33}\sin\alpha_з + a_{23}\cos\alpha_з). \quad (20)$$

Поскольку $\lambda_к$ имеет незначительную величину (для проходных резцов $\lambda_к \le 5^o$), зависимость (20) можно представить в упрощённом виде:

$$\sin\alpha_к = a_{33}\sin\alpha_з + a_{23}\cos\alpha_з. \quad (21)$$

В развёрнутом виде, с учётом (4), она будет выглядеть следующим образом:

$$\sin\alpha_к = \sin\alpha_з(-\sin\lambda\sin\mu\cos\varphi + \\ + \sin\lambda\cos\mu\sin\xi\sin\varphi + \cos\mu \times \\ \times \cos\xi\cos\lambda) + \cos\alpha_з(-\sin\mu\sin\varphi - \\ - \cos\mu\sin\xi\cos\varphi), \quad (22)$$

где $\alpha_з$ – задний угол заточки резца – это угол между плоскостью резания и касательной $\tau_з$ к задней поверхности резца, лежащей в нормальной к режущей кромке плоскости.

В случае $\lambda = 0$ и $\xi = 0$ выражение (22) значительно упрощается.

$$\sin\alpha_к = \sin\alpha_з\cos\mu - \cos\alpha_з\sin\mu\sin\varphi. \quad (23)$$

При $\mu = 0$ имеем $\alpha_к = \alpha_з$ (кинематический угол равен статическому). Из условия $\alpha_к > 0$ получаем зависимость

$$\mathrm{tg}\alpha_з > \mathrm{tg}\mu\sin\varphi \quad (24)$$

по определению величины заднего угла заточки $\alpha_з$, обеспечивающего положительный кинематический угол $\alpha_к$.

На рис. 4 представлены графики изменения кинематического (рабочего) угла $\alpha_к$ от подачи S и главного угла в плане φ.

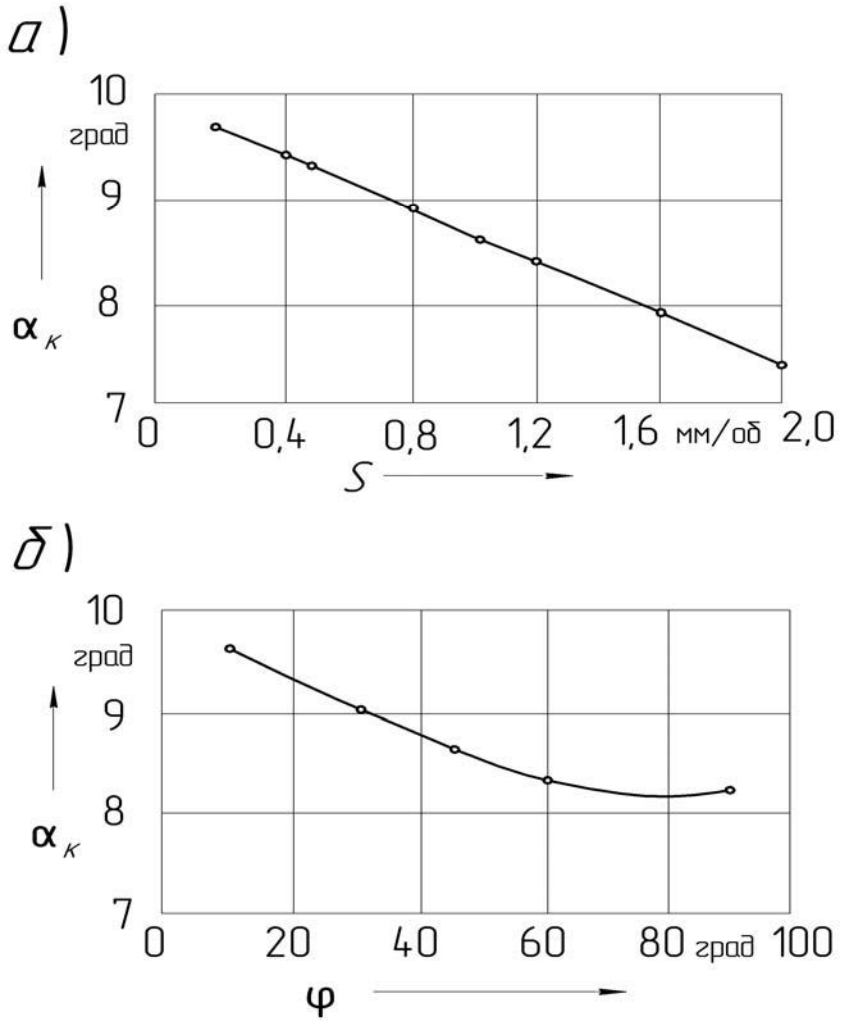

Рис. 4. Зависимость кинематического угла $\alpha_к$ от подачи S (*а*) и главного угла в плане φ (*б*): $\alpha_з = 10°$, $D = 10$ мм; *а* – $\varphi = 45°$; *б* – $S = 1{,}0$ мм/об

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/

Расчёты показывают, что как увеличение подачи S, так и увеличение угла φ приводит к уменьшению рабочего угла $\alpha_к$. Расчёт угла $\alpha_з$ заточки резца необходимо устанавливать исходя из выражения (24). Особенно это касается резцов, предназначенных для точения резьбы с большим шагом.

Выводы

Разработана методика и получены зависимости для определения кинематических углов: наклона режущей кромки $\lambda_к$, переднего угла $\gamma_к$ и заднего угла $\alpha_к$. Установлено, что увеличение подачи S приводит к увеличению переднего угла $\gamma_к$ и уменьшению заднего угла $\alpha_к$. Увеличение главного угла в плане φ способствует увеличению угла $\gamma_к$ и уменьшению угла $\lambda_к$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с.

2. **Грановский, Г. И.** Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 304 с.

3. **Ящерицын, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Ерёменко, Е. Э. Фельдшейн. – Минск : Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.

4. Некоторые вопросы кинематики ротационного резания / Е. Г. Коновалов [и др.] // Изд. АН БССР. Сер.физ.-техн. наук. – 1970. – № 3. – С. 37–46.

5. **Шатуров, Г. Ф.** Кинематика резания ротационными круглыми резцами / Г. Ф. Шатуров // Весці АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1977. – № 2. – С. 64–70.

6. **Шатуров, Г. Ф.** Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.

Статья сдана в редакцию 28 февраля 2018 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-32-67-75.
Ольга Владимировна Благодарная, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-44-704-48-09.
Максим Владимирович Панков, инженер, ОАО «Стандарт». Тел. : +375-222-32-67-75.
Денис Петрович Снытков, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-42-49-45.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-32-67-75.
Olga Vladimirovna Blagodarnaya, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-44-704-48-09.
Maksim Vladimirovich Pankov, engineer, OAO Standard. Phone: +375-222-32-67-75.
Denis Petrovich Snytkov, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-42-49-45.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
http://e.biblio.bru.by/