



УДК 621.941–229.01

© В. И. Кулик, 2009

ИЗМЕНЕНИЕ (ТРАНСФОРМАЦИЯ) УГЛОВ РЕЗАНИЯ В СТАНКАХ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

лик В. И. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин», тел.: (4212) 37-52-59 (ТОГУ)

Отклонение углов резания (трансформация углов) в момент снятия стружки от углов заточки, имеющее место особенно в станках тангенциальной обработки, рассматривалось во многих работах с позиции геометрии резания, отвлекаясь от отношения частоты вращения инструмента к частоте вращения детали. В настоящей работе показано, что для одной и той же геометрической схемы станка, но при различных числах оборотов и направлении вращения инструмента и детали мы имеем различные виды и методы обработки и различную трансформацию углов резания при одном и том же припуске или глубине резания. В статье даны иллюстрации и описание двух конструктивных вариантов станка для осуществления и исследования различных схем, видов и методов обработки.

Many works have considered, in terms of geometry of cut, the deviation of cutting angles (angle transformation) in chipmaking, which occurs particularly in tangential machining machine tools. The ratio of the rotation frequency of a tool to the rotation frequency of a workpiece has not been taken into account. The present paper shows that for one at the same geometrical scheme of a machine tool but at different number of revolutions and differing rotation directions of an instrument and a workpiece there are both various machining methods and various cutting angle transformations at one at the same depth of cut. The paper shows illustrations and a description of two variants of a test bed intended for study of various schemes and methods of machining.

Ключевые слова: тангенциальная обработка, углы резания, трансформация углов, схемы, виды, методы обработки.

Общая часть. Анализ схем станков, процесс обработки на которых осуществляется в результате двух вращательных движений или любых сочетаний вращательного и поступательного [1, 2, 3, 4], рис. 1, показывает, что они обладают одним общим свойством – вектора скорости и подачи при прохождении линии центров лежат на одной прямой, перпендикулярной к этой осевой центральной линии, что позволяет применить единую методику для их исследования и дать им единое название: *схемы тангенциальной обработки*. Созданные на

их основе станки охватывают как обработку деталей резанием, так и без снятия стружки.



Рис. 1. Схемы тангенциальной обработки



На рис. 1 показаны схемы резания и траектории вершины резца в теле заготовки. Символ p с нижним индексом 1, 2 или 3 указывает место расположения мгновенного центра вращения – полюс p – (на межосевой линии). Верхний индекс Π или V при полюсе p означает вид обработки *попутный* или *встречный*. На рис. 1 A – межцентровое расстояние, R_1 и R_2 – радиусы инструмента и детали, r_1 и r_2 – радиусы центроид (показаны пунктирными линиями) инструмента и детали, ω_1 и ω_2 – угловые скорости инструмента и детали, V_1 – скорость резания на межцентральной линии.

Описание испытательного стенда

Экспериментальные исследования процесса резания в условиях встречного и попутного точения проводились на станке ХТ-260 (специальный станок-стенд спроектирован автором и изготовлен в г. Хабаровске), выполненном по принципиальной схеме резания (рис. 1, а), конструктивная схема которого показана на рис. 2.

Первый конструктивный вариант исполнения станка заключается в следующем. Станок состоит из корпуса 1 и фланца 2. К фланцу 2 крепятся два электродвигателя D_1 и D_2 . В корпусе 1 размещены два шпинделя: шпиндель детали 3 и шпиндель инструмента 4. Шпиндель 3 посредством шпоночного соединения соосно соединён с валом электродвигателя D_2 . Шпиндель 4 приводится во вращение через волновую зубчатую пару, выполненную следующим образом: на шпинделе 4 посредством шпоночного соединения жёстко закреплён гибкий венец 5, находящийся в зацеплении с податливым венцом 6, который неподвижно закреплён в корпусе 1.

Гибкий венец разжимается (обеспечивая нормальное рабочее положение зубьев обоих венцов) генератором волн, состоящим из двух дисков 7, которые посредством подшипников качения установлены на соответствующих эксцентричных втулках 8, зафиксированных на валу 9. Двухдисковый генератор обладает малым моментом инерции, так как диски 7, с большим радиусом инерции имеют сравнительно малую скорость вращения, что важно при больших диаметрах гибкого венца. Эта особенность использована для увеличения чувствительности привода к изменению нагрузки и обратимости передачи. Двухдисковый генератор выполнен с диаметром дисков 7, равным $230^{+0,030}$ мм и эксцентриситетом осей втулок 8, равным $e = 2,8^{+0,007}_{-0,003}$ мм.

Вал 9 установлен на подшипниках качения, один из которых вмонтирован в крышку 10, зафиксированную в корпусе 1, а другой – вмонтирован в торцевое гнездо шпинделя 4. Вал 9 и шпиндель 4 расположены соосно. В крышке 10 имеются два отверстия, в которые вставляется стакан 11 с осью и промежуточными сменными колёсами. На шпинделе 3 имеется цанговый зажим для крепления заготовки 12, а на шпинделе 4 закреплён суппорт 13, на котором крепятся резцовые блоки 14.

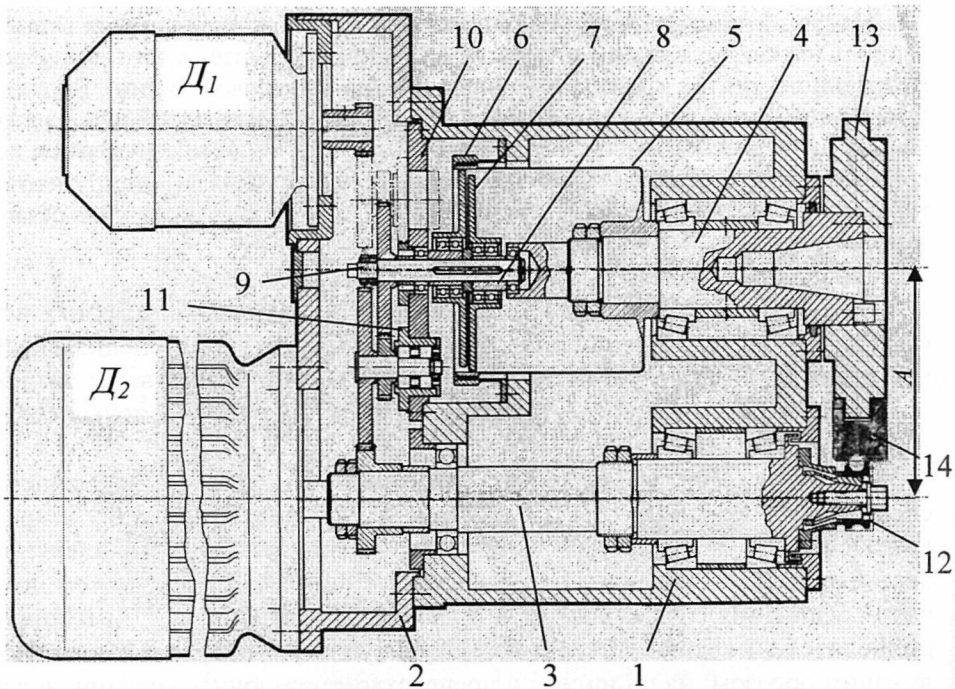


Рис. 2. Схема станка с волновой зубчатой парой в приводе вращения резцового блока для исследования встречного и попутного точения, $A = 260$ мм

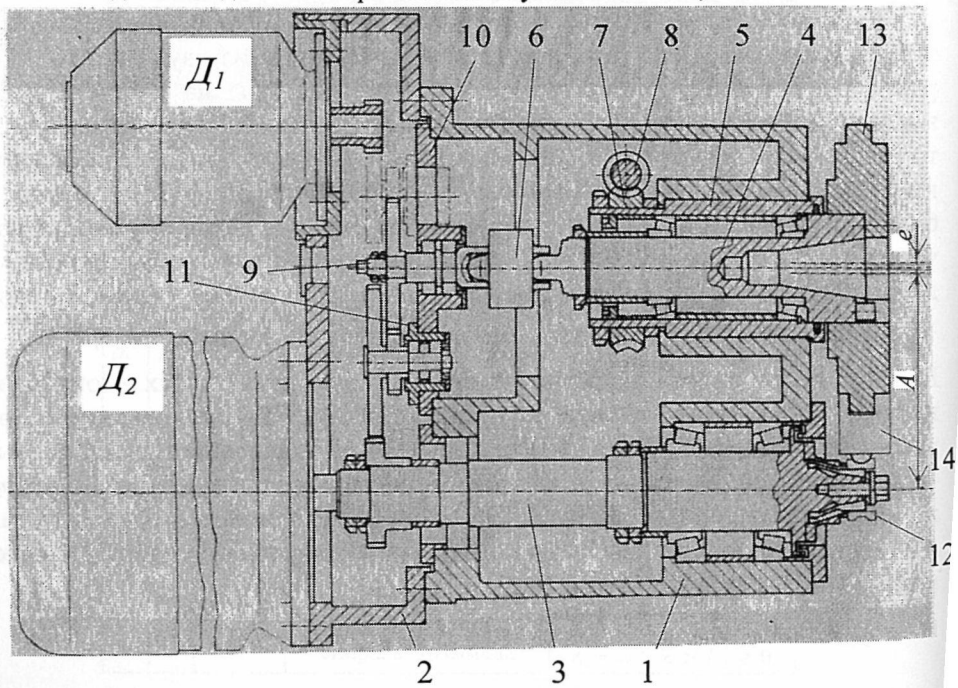


Рис. 3. Схема станка с карданной муфтой в приводе вращения резцового блока для исследования различных схем и методов обработки, $A = 260 \pm 4$ мм



Изменение чисел оборотов суппорта 13 осуществляется через сменные шестерни либо от четырёхскоростного электродвигателя D_1 (см. пунктирные линии на рис. 2), либо от электродвигателя D_2 . В последнем случае оба шпинделя получают вращение от одного электродвигателя. Станок снабжён пультом управления, который позволяет раздельное включение обоих электродвигателей и их реверс.

На рис. 3 показан этот же станок в другом конструктивном исполнении. Здесь между корпусом 1 и шпинделем 4 имеется гильза 5, во внутреннем отверстии которой закреплён на роликовых конических подшипниках качения шпиндель резцового суппорта 13. Внутреннее отверстие гильзы выполнено по отношению к наружной цилиндрической поверхности с эксцентриситетом, равным ± 4 мм. Таким образом, межосевое расстояние можно изменять в пределах 256 ... 264 мм ($A = 260 \pm 4$ мм), что позволяет снимать припуск ≤ 8 мм. Вал 9 установлен в крышке 10 на двух подшипниках качения соосно со шпинделем 4 и соединён с ним подвижной карданной муфтой 6. На гильзе 5 закреплено червячное колесо 7, находящееся в зацеплении с червяком 8. Вращением червяка 8 (вручную) можно, поворачивая гильзу 5 относительно корпуса 1, изменять межосевое расстояние и тем самым осуществлять радиальную подачу. Наличие четырех скоростного двигателя и сменных колёс позволяет в широком диапазоне изменять частоту вращения шпинделя 4 и его направление вращения.

Стенд «Станок ХТ-260» прост по конструкции, однако позволяет в широком диапазоне исследовать (точение, строгание, накатку, фрезерование, отдельные операции, например нарезание канавок, и промежуточные схемы резания, например шабрение) различные виды обработки и методы обработки как встречные, так и попутные.

Изменения углов резания в станках тангенциальной обработки

Отклонение углов резания в момент снятия стружки от углов заточки рассматривалось во многих работах [6, 7, 8 и др.]. Как известно, передний угол резца γ в момент снятия стружки определяется как угол между нормалью к траектории резания и передней гранью резца.

Задний угол резца α есть угол между направлением скорости резания, т. е. касательной к траектории и задней гранью резца.

На рис. 4 показана схема наружной обработки тела вращения резцовой головкой с наружными зубьями методом попутного точения, по которой и определим изменение углов в процессе снятия припуска t . Направление вращения инструмента и детали показаны стрелками, одновременно обозначающими частоту вращения инструмента ω_1 и ω_2 .

Для вывода зависимостей совместим переднюю грань резца с радиусом инструмента и учтём, что в момент начала резания вершина резца находится в точке M_H , а в момент окончания резания – в точке M_K .

На рис. 4 основные обозначения следующие:

γ_H, α_H – передний и задний углы в момент начала резания;

γ_K, α_K – передний и задний углы в момент окончания резания;
 p – мгновенный центр вращения – полюс;
 $\rho = pM$ – мгновенный (текущий) радиус вращения режущей точки, перпендикулярная к которому в точке M линия – есть касательная $n-n$ к траектории резания.

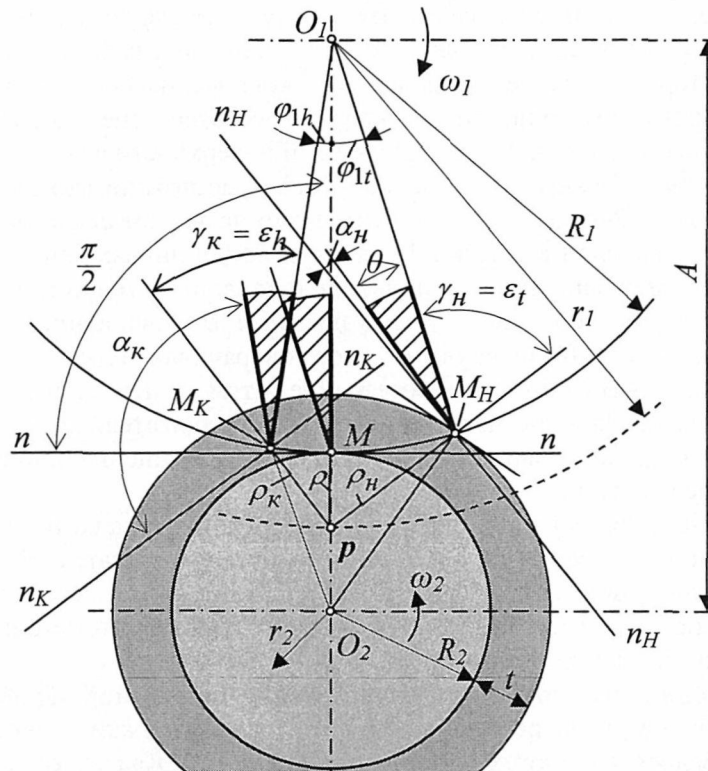


Рис. 4. Схема наружной обработки тела вращения резцовый головкой с наружными зубьями методом попутного точения

Из $\Delta O_1 p M_H$ по теореме косинусов находим:

$$\cos \angle O_1 M_H p = \frac{R_1^2 + \rho^2 + r_1^2}{2R_1 \rho}.$$

Подставляя значение $\rho = \sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2R_1 r_1 \cos \varphi_{1t}}$,

получим $\cos \angle O_1 M_H p = \frac{R_1 - r_1 \cos \varphi_{1t}}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2R_1 r_1 \cos \varphi_{1t}}}$. Тогда угол $\angle O_1 M_H p$ бу-

дет равен $\angle O_1 M_H p = \arccos \frac{R_1 - r_1 \cos \varphi_{1t}}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2R_1 r_1 \cos \varphi_{1t}}}$. (1)



При перемещении вершины резца из точки M_H в точку M угол $\angle O_1 M_H P$ изменится и станет равным π , ибо точки $P - M - O_1$ окажутся на одной прямой линии, т. е. на линии центров $O_1 O_2$. Когда вершина резца находится в точке M , линия $O_1 O_2$ – есть нормаль к траектории резания, а перпендикулярная ей прямая $n - n$, проходящая через точку M , есть касательная к траектории резания, и в то же самое время она – касательная к окружностям радиусов R_1 и R_2 .

Таким образом, изменение (трансформация) угла $\angle O_1 M_H P$ при движении вершины резца от точки M_H до точки M будет равна разности величин угла в рассматриваемых точках, а именно:

$$\varepsilon_t = \pi - \angle O_1 M_H P.$$

Учитывая, что $\pi - \arccos(x) = \arccos(-x)$ запишем угол трансформации в общем виде: $\varepsilon_t = \arccos \left| \frac{r_1 \cos \varphi_{1t} - R_1}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2 R_1 r_1 \cos \varphi_{1t}}} \right|$. (2)

Угол ε_t изменяет передний и задний углы резания, что необходимо учитывать при установке или заточке резцов. При принятом направлении передней грани резца полученная формула (2) определяет также и величину переднего угла в момент начала резания: $\gamma_H = \varepsilon_t$. (2)'

Итак, формула (2) справедлива для всех режимов схемы рис. 1, а, характерные случаи которых показаны на рис. 5, и позволяет определить: 1) трансформацию углов при движении вершины резца от точки M_H до точки M , 2) передний угол в момент начала резания.

Теоретический угол при вершине резца тогда можно определить следующим образом: $\theta_T = 90^\circ - \varepsilon_t$. (3)

Фактический же угол θ должен быть меньше угла θ_T , чтобы осуществлялись нормальные условия резания и не происходило трение задней грани резца по обработанной поверхности, особенно в начале резания (см. дальше).

Вместо $\cos \varphi_{1t}$ подставим его значение, вытекающее из рис. 4. Выражения (4) для определения углов контакта инструмента и детали для всех схем (рис. 1) сведены в табл. 1.

Подставив вместо $\cos \varphi_{1t}$ его значение (4, 2 из табл. 1), получим угол трансформации, выраженный через радиусы центроид и геометрические па-

$$\text{раметры станка: } \varepsilon_t = \arccos \frac{(r_1 - R_1) - \frac{D_2 + t}{D_1} \cdot \frac{r_1 t}{A}}{\sqrt{(r_1 - R_1)^2 + (D_2 + t) \cdot \frac{r_1 t}{A}}}. \quad (5)$$

Если в формуле (5) пренебречь вращением инструмента, т. е. круговой подачей (при этом, $r_1 = A$; $r_2 = 0$), то угол трансформации выразится следующим



образом: $\angle O_1 M_H O_2 = \varepsilon'_t = \arccos \frac{D_1 R_2 - (D_2 - t) \cdot t}{D_1 (R_2 + t)}$. (6)

Таблица 1

Общий вид формул для определения углов контакта для схем по рис.1.

Рис. 1					Общий вид формул для определения углов контакта
a	b	c	z	д	
+		+			$\varphi_{1t} = \arccos \left(1 - \frac{t}{R_1} \cdot \frac{R_2}{A} - \frac{t^2}{D_1} \cdot \frac{1}{A} \right) =$ (4, 1)
					$= \arccos \left[1 - \frac{t}{R_1} \cdot \left(\frac{D_2 + t}{2A} \right) \right] =$ (4, 2)
					$= \arccos \left[1 - \frac{t}{R_1} \cdot \left(\frac{D_3 - t}{2A} \right) \right]$ (4, 3)
	+				$\varphi_{1t} = \arccos \left(1 - \frac{t}{R_1} \cdot \frac{R_2}{A} + \frac{t^2}{D_1} \cdot \frac{1}{A} \right) =$ (4, 4)
					$= \arccos \left[1 - \frac{t}{R_1} \cdot \left(\frac{D_2 - t}{2A} \right) \right] =$ (4, 5)
					$= \arccos \left[1 - \frac{t}{R_1} \cdot \left(\frac{D_3 + t}{2A} \right) \right]$ (4, 6)
				+	$\varphi_{1t} = \arccos \left(1 - \frac{t}{R_1} \right) =$ (4, 7)
			+		$\varphi_{1t} = \arccos \left(1 - \frac{t}{R_1} \right) = \arccos \frac{R_2}{R_3}$ (4, 8)

Итак, выражение (6) показанное ранее в работах [9, 10, 11, 12] является приближённым, так как оно: 1) не учитывает вращения инструмента и детали; 2) отражает трансформацию углов только от изменения геометрии резания на участке движения вершины резца от точки M_H до точки M (рис. 4).

Разница между формулами (2) и (6) есть угол $\angle p M_H O_2$, который для попутного точения (рис. 4) можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \angle p M_H O_2 &= \angle O_1 M_H O_2 - \angle O_1 M_H p = \\ &= \psi_3 = \arccos \frac{R_1 - A \cos \varphi_{1t}}{\sqrt{R_1^2 + A^2 - 2 R_1 A \cos \varphi_{1t}}} - \arccos \frac{R_1 - r_1 \cos \varphi_{1t}}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2 R_1 r_1 \cos \varphi_{1t}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как снятие стружки заканчивается не в точке M , а в точке M_K , то углы резания при движении вершины резца от точки M до точки M_K продолжают изменяться.

Выражение для угла трансформации при повороте инструмента на угол



φ_{1h} аналогично выражению (2), найденному при повороте инструмента на угол φ_{1t} .

Тогда полный угол трансформации выразится формулой:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_t + \varepsilon_h = \\ &= \arccos \left| \frac{r_1 \cos \varphi_{1t} - R_1}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2R_1r_1 \cos \varphi_{1t}}} \right| + \arccos \left| \frac{r_1 \cos \varphi_{1h} - R_1}{\sqrt{R_1^2 + r_1^2 - 2R_1r_1 \cos \varphi_{1h}}} \right|, \end{aligned} \quad (8)$$

или $\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_h =$

$$\begin{aligned} &= \arccos \frac{(r_1 - R_1) - \frac{D_2 + t}{A} r_1 t}{\sqrt{(r_1 - R_1)^2 + (D_2 + t) \frac{r_1 t}{A}}} + \arccos \frac{(r_1 - R_1) - \frac{D_2 + h}{A} r_1 h}{\sqrt{(r_1 - R_1)^2 + (D_2 + h) \frac{r_1 h}{A}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где h – высота гребешка (погрешность обработки [3, 5]),

φ_{1t} – угол контакта инструмента, соответствующий высоте h .

На рис. 5 для рассматриваемой схемы станка с параметрами $A, R_1, R_2, t, -\infty < r_1 < +\infty$ построен график изменения переднего и заднего углов инструмента (трансформация ε_t) при постоянной глубине обработки t и переменном отношении $\frac{n_1}{n_2}$ и участок графика изменения переднего и заднего углов (трансформация ε_h), при условии, когда $h \leq t$, что справедливо для попутного течения.

На графике имитирована схема резания с межцентровым расстоянием A , с центром инструмента в точке O_1 и с центром детали в точке O_2 . Любая точка, взятая на межцентральной линии $O_1 O_2$ есть точка касания центроид или мгновенный центр вращения инструмента и детали. При этом расстояние от выбранной точки до центра инструмента O_1 равно r_1 , а расстояние от той же точки до центра O_2 равно r_2 . По расстояниям от выбранной точки на оси r до соответствующей кривой графиков ε_t и ε_h и судят о величине трансформации углов инструмента.

Ниже под соответствующими полюсами p_1, p_2, p_3, p_4 показаны соответствующие режимы работы данной схемы станка и передний угол γ . График построен при соблюдении равенства $\varepsilon_t = \gamma_H$.

Из рисунков и графика видно, что для одной и той же геометрической схемы станка, но при различных числах оборотов и направлении вращения инструмента и детали (т. е. различном местоположении полюса p на межцентральной линии $O_1 O_2$) имеем различные виды и методы обработки и различную трансформацию углов обработки при одном и том же припуске (или глубине обработки) t . Кроме того, необходимо обращать внимание на то, какой частью кри-

вых, показанных в таблице на рис. 1, мы производим обработку, например, используя циклоиду, с одной стороны, имеем встречное фрезерование, а с другой – накатку (или различные виды профильного проката и т. д.).

Определим углы установки резцов инструмента для попутного точения:

а) Из рис. 4 видно, что при попутном точении важно обеспечить задний угол α_{HP} в момент начала резания в точке M_H . В дальнейшем при снятии припуска t этот угол увеличивается в соответствии с формулами (2, 5) и (8, 9).

Задний угол резца при установке необходимо определять по следующей формуле: $\alpha_y = \varepsilon_t + \alpha_{HP}$, (10)

где α_y – угол заточки резца в статическом состоянии, определяемый как угол между касательной к окружности радиуса R_l инструмента в вершине резца и задней поверхностью резца;

ε_t – угол трансформации, определяемый по формуле (2) или (5);

$\alpha_H = \alpha_{HP}$ – фактический задний угол резания в момент врезания зуба инструмента в заготовку в точке M_H (т. е. допустимый задний угол резания). Этот угол выбирается по известным рекомендациям теории резания, например $0^\circ < \alpha_{HP} \cong 3^\circ \dots 4^\circ$ и больше;

б) Для переднего угла опасность представляет момент окончания снятия стружки в точке M_K . В этот момент необходимо обеспечить допустимый передний угол резания γ_{KP} . Если в момент нахождения резца в точке M (см. рис. 4), передний угол резания равен нулю, то в точке M_K он уже станет отрицательным.

Передний угол резца при установке необходимо определять по следующей формуле: $\gamma_y = \gamma_{KP} + \varepsilon_t$, (11)

где γ_y – угол заточки резца в статическом состоянии, определяемый как угол между передней гранью резца и радиусом инструмента, проведённым в вершину резца,

ε_h – угол трансформации, который определяется по тем же формулам (2) и (5), где вместо t и φ_{1t} необходимо подставлять значения h и φ_{1h} ,

$\gamma_K = \gamma_{KP}$ – действительный передний угол резания в момент окончания снятия стружки в точке M_K . Угол γ_{KP} выбирается по известным рекомендациям теории резания и может быть как положительным, так и отрицательным.

в) **Угол при вершине резца**, определяющий его прочность будет равен:

$$\theta = 90^\circ - \alpha_y - \gamma_y, \quad (12)$$

где $\alpha_y > 0^\circ$; $\gamma_y >$ или $< 0^\circ$.

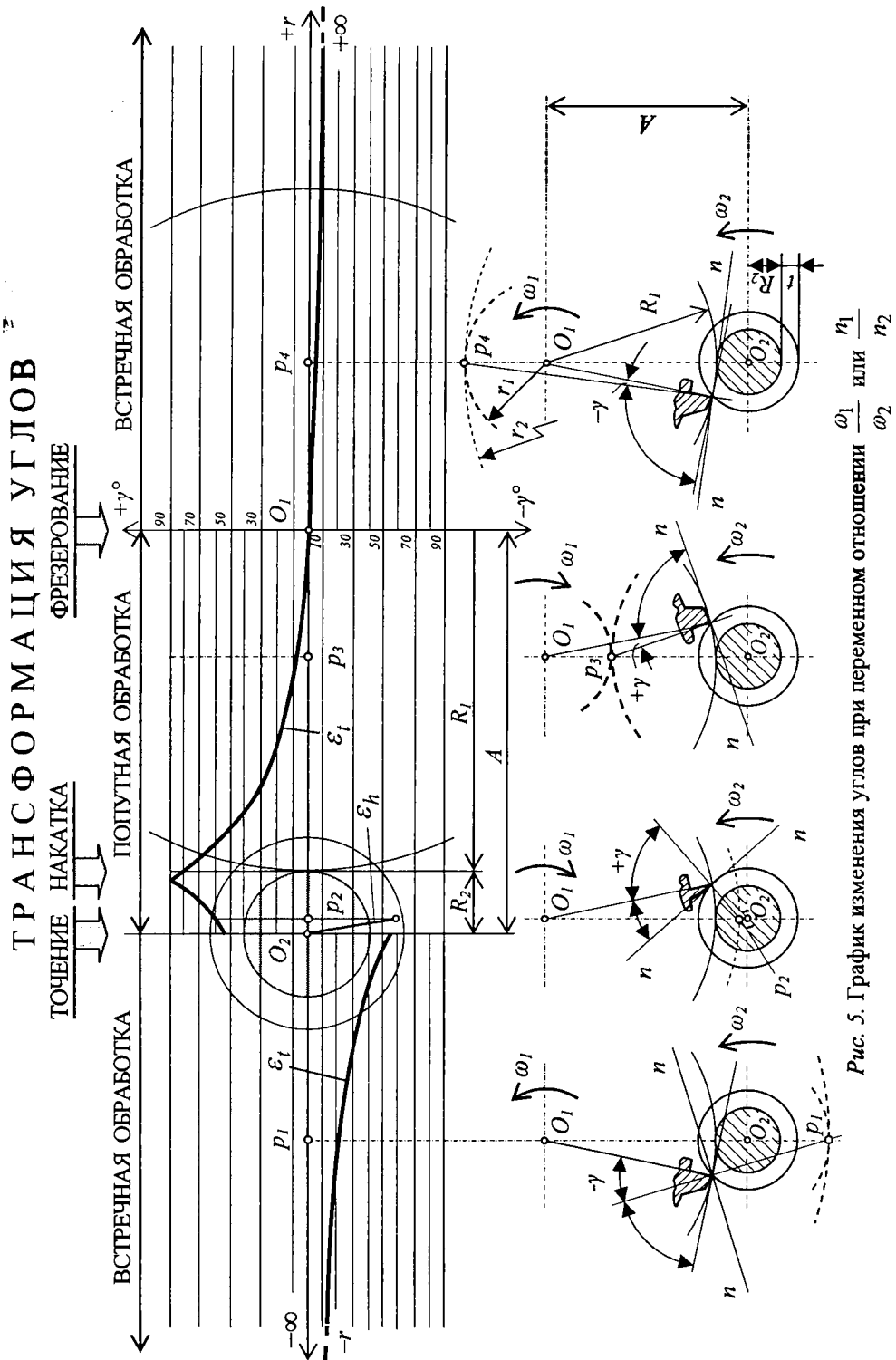


Рис. 5. График изменения углов при переменном отношении $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ или $\frac{n_1}{n_2}$



Итак, при попутном точении, рис. 4, важно обеспечить необходимый задний угол α_H в момент начала резания. В этом случае угол установки резца α_y будет зависеть от трансформации на участке движения резца от начала резания до межцентровой линии $O_1 - O_2$ и, таким образом, от глубины обработки t , чисел оборотов инструмента n_1 и детали n_2 .

Необходимый передний угол γ_K важно обеспечить в конце резания, когда есть опасность появления больших отрицательных передних углов резания. В этом случае передний угол установки γ_y будет зависеть от трансформации на участке движения резца от линии центров $O_1 - O_2$ до конца резания, т. е. от величины гребешка h (т. е. «кинематической погрешности обработки» [3]) и от чисел оборотов инструмента n_1 и детали n_2 , но так как сама величина $h = f \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$,

то передний угол γ_y при попутном точении, когда $h \ll t$, зависит только от чисел оборотов инструмента n_1 и детали n_2 .

Библиографические ссылки

1. Кулик В. И. О смещении максимума силы резания при тангенциальной обработке // Вестник ТОГУ. 2007. № 1 (4).
2. Кулик В. И. Особенности попутного и встречного метода резания в станках тангенциальной обработки // Вестник ТОГУ. 2008. № 1 (8).
3. Кулик В. И., Чернянский П. М. Погрешности обработки, зависящие от кинематики резания // Известия вузов. Машиностроение. 1972. № 7.
4. Этин А. О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием, М., 1964.
5. Кулик В. И. Углы контакта инструмента и детали при обработке с тангенциальной подачей // Гидростатическая смазка и её использование для повышения надёжности машин и станков. Хабаровск, 1979.
6. Грановский Г. И. Кинематика резания. М., 1948.
7. Розенберг А. М. Динамика фрезерования. М., 1945.
8. Шевченко Н. А. Геометрические параметры режущей кромки инструментов и сечение среза. М., 1957.
9. Ермаков Ю. М. Исследование технологического процесса обработки внутренних фасонных поверхностей вращения попутным точением. М., 1970.
10. Загородников А. Я. Пути повышения экономической эффективности обработки тел вращения резанием. // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1962. № 9.
11. Комаров В. Н. Некоторые вопросы кинематики попутного точения // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1969. № 1.
12. Разработка нового метода и станда для токарной обработки методом попутного протягивания // Технический отчёт по научно-исследовательской теме ЛАВ-11, каф. АМ-1, МВТУ им. Баумана. Разработка гаммы металлорежущих станков, работающих методом попутного точения // Технический отчёт по научно-исследовательской теме № АМ-181, МВТУ им. Баумана, 1970.