

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-461-472>

УДК 621.91.01/621.914.22

Кинематические и геометрические особенности скоростной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей вращающимися инструментами на станках с ЧПУ

Докт. техн. наук, проф. Н. Н. Попок¹⁾, инж. В. С. Анисимов¹⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(Новополоцк, Республика Беларусь)

Реферат. Целью работы является повышение производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей. Для достижения цели решаются задачи исследования кинематических и геометрических особенностей применения вращающихся режущих инструментов, обеспечивающих обработку цилиндрических, конических, сферических и плоских поверхностей детали на одном рабочем месте за один-два установка. Используются аналитические методы исследований, позволившие получить формулы для расчета линейной скорости обработки при врезании инструмента в заготовку, в зоне резания и на выходе инструмента из заготовки, определить изменения величин угла наклона режущей кромки инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат. Рассмотрены схемы обработки поверхностей детали на станке с ЧПУ путем интерполяции траектории резания прямолинейными перемещениями режущей кромки. Произведена оценка влияния дискретности перемещений режущей кромки на качество получаемой поверхности детали при рекомендуемых значениях режима резания. Результаты исследований могут быть использованы при разработке управляющих программ станков с ЧПУ путем выбора рациональной схемы обработки с касательным движением режущей кромки и корректировки значений линейной скорости при врезании, в процессе резания и выходе режущей кромки из заготовки, что обеспечивает повышение производительности обработки.

Ключевые слова: сложнопрофильная поверхность, зенкер, концевая фреза, кинематическая схема резания, скорость резания, угол наклона режущей кромки, станок с ЧПУ, интерполяция

Для цитирования: Попок, Н. Н. Кинематические и геометрические особенности скоростной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей вращающимися инструментами на станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. С. Анисимов // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 461–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-461-472>

Kinematic and Geometric Features of High-Speed Machining of Complex Surfaces of Parts with Rotating Tools on CNC Machines

N. N. Popok¹⁾, V. S. Anisimov¹⁾

¹⁾Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of the work is to increase the productivity of machining complex-profile surfaces of parts. To achieve this goal, the tasks of studying the kinematic and geometric features of the use of rotating cutting tools are solved, providing processing of cylindrical, conical, spherical and flat surfaces of a part at one workplace in one or two installations. Analytical research

Адрес для переписки

Попок Николай Николаевич
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь
Тел.: + 375 29 596-08-39
n.popok@psu.by

Address for correspondence

Popok Nikolay N.
Euphrosyne Polotskaya State University
of Polotsk
29, Blokhin str.,
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus
Тел.: + 375 29 596-08-39
n.popok@psu.by

methods are used, which made it possible to obtain formulas for calculating the linear processing speed when the tool is embedded in the workpiece, in the cutting zone and at the tool exit from the workpiece, to determine changes in the inclination angle of the tool cutting edge in the instrumental, static and kinematic coordinate systems. Schemes for machining the surfaces of a part on a CNC machine by interpolating the cutting trajectory by rectilinear movements of the cutting edge are considered. The influence of the discreteness of the cutting edge movements on the quality of the resulting surface of the part at the recommended values of the cutting mode is estimated. The research results can be used in the development of control programs for CNC machines by selecting a rational machining scheme with tangential movement of the cutting edge and adjusting the values of linear velocity during embedding, during the cutting process and the exit of the cutting edge from the workpiece, which ensures an increase in machining productivity.

Keywords: complex profile surface, countersink, end mill, kinematic cutting scheme, cutting speed, angle of inclination of the cutting edge, CNC machine, interpolation

For citation: Popok N. N., Anisimov V. S. (2024) Kinematic and Geometric Features of High-Speed Machining of Complex Surfaces of Parts with Rotating Tools on CNC Machines. *Science and Technique*. 23 (6), 461–472. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-461-472> (in Russian)

Введение

В современной технике широко применяются детали, форма которых включает сочетание различных поверхностей – цилиндрических, конических, сферических, винтовых, плоских и криволинейных, например шаровые пальцы рычагов автомобилей, оси тяги ремизы, тройники запорной арматуры, корпуса с полостями, матрицы и пуансоны штампов, кулачки и эксцентрики механизмов автоматов и т. п. Механическую обработку такого сочетания поверхностей целесообразно производить за одну операцию, один-два установка заготовки в приспособлении и несколько переходов на станке с ЧПУ, что обеспечивает сокращение основного и вспомогательного времени и повышение производительности, точности и качества получения детали. При этом, как правило, реализуются сложные кинематические схемы и траектории резания, переменные величины линейных скоростей вращательных и поступательных движений режущего инструмента и заготовки. Повышение производительности обработки за счет увеличения значений скорости резания в этом случае приводит к снижению стойкости режущих инструментов и потребляемой мощности приводов станка. То есть требуется решение задачи по увеличению производительности обработки сложнопрофильных поверхностей деталей при одновременном обеспечении требуемых значений потребляемой мощности приводов станков с ЧПУ и стойкости режущих инструментов.

Одним из путей решения этой задачи является использование вращающихся инструмен-

тов – концевых фрез, ротационных резцов и т. п., обеспечивающих касательное движение крутонаклонных режущих кромок [1]. Тенденция по все более широкому применению таких типов инструментов прослеживается в ряде ведущих зарубежных фирм, таких, например, как Sandvik Coromant (Швеция), Seco (Япония), Hertel (Германия), Guhring (Германия), Iscar (Израиль), TaeguTec (Корея) и других, у которых отмечается повышение производительности и стойкости режущих инструментов в 3–6 раз [2]. При этом зачастую не обосновывается, за счет каких кинематических, физических и технологических особенностей обеспечиваются преимущества касательного движения резания и режущих инструментов с крутонаклонными кромками. Вместе с тем в ряде ранее проведенных отечественными учеными исследований явлений, характерных для сложных видов обработки резанием, например Г. И. Грановским [3], В. Ф. Бобровым [4], Е. Г. Коноваловым [5], П. И. Ящерицыным [6] и другими, эти преимущества доказаны, но в основном для традиционно используемых величин скоростей и мощностей приводов станков, возможностей реализации трех- и пятиосевой обработки на станках с ЧПУ, применения прогрессивных режущих инструментов, в том числе с износостойким покрытием и т. п. То есть в настоящее время актуальным является исследование кинематических и физических характеристик скоростных видов обработки сложнопрофильных поверхностей деталей на одном рабочем месте – станке с ЧПУ вращающимися режущими инструментами с касательным движением крутонаклонной режущей кромки.

Основная часть

Рассмотрим некоторые схемы обработки, реализующие касательные движения режущих кромок (рис. 1). При обработке цилиндрической или конической поверхностей деталей (рис. 1а) реализуется схема резания с главным вращательным движением резания D_{Γ} , сообщаемым инструменту 1, поступательным (вдоль оси главного вращательного движения) движением подачи D_{S_1} , также сообщаемым инструменту, и круговым движением подачи D_{S_2} , сообщаемым заготовке 2. По существу, реализуется схема осевой обработки (зенкерования), или плунжерного фрезерования. При этом за счет двух вращательных и поступательного движений, применения многолезвийного режущего инструмента обеспечивается касательное движе-

ние режущей кромки, увеличение его линейной скорости и, как следствие, повышение производительности и качества обработки.

При обработке неполных сферических поверхностей деталей (рис. 1б, с) реализуются схемы плунжерного фрезерования, при которых одно из движений подачи D_{S_2} направлено под углом или перпендикулярно к оси главного вращательного движения D_{Γ} . Результирующая скорость резания равна скорости касательного движения. За счет высокой скорости вращательного движения D_{Γ} (порядка 10–20 м/с) и выбора соответствующих значений углов наклона режущей кромки в плане обеспечивается режим как резания, так и выглаживания сферической поверхности с параметрами шероховатости, сопоставимыми с параметрами шлифованной поверхности.

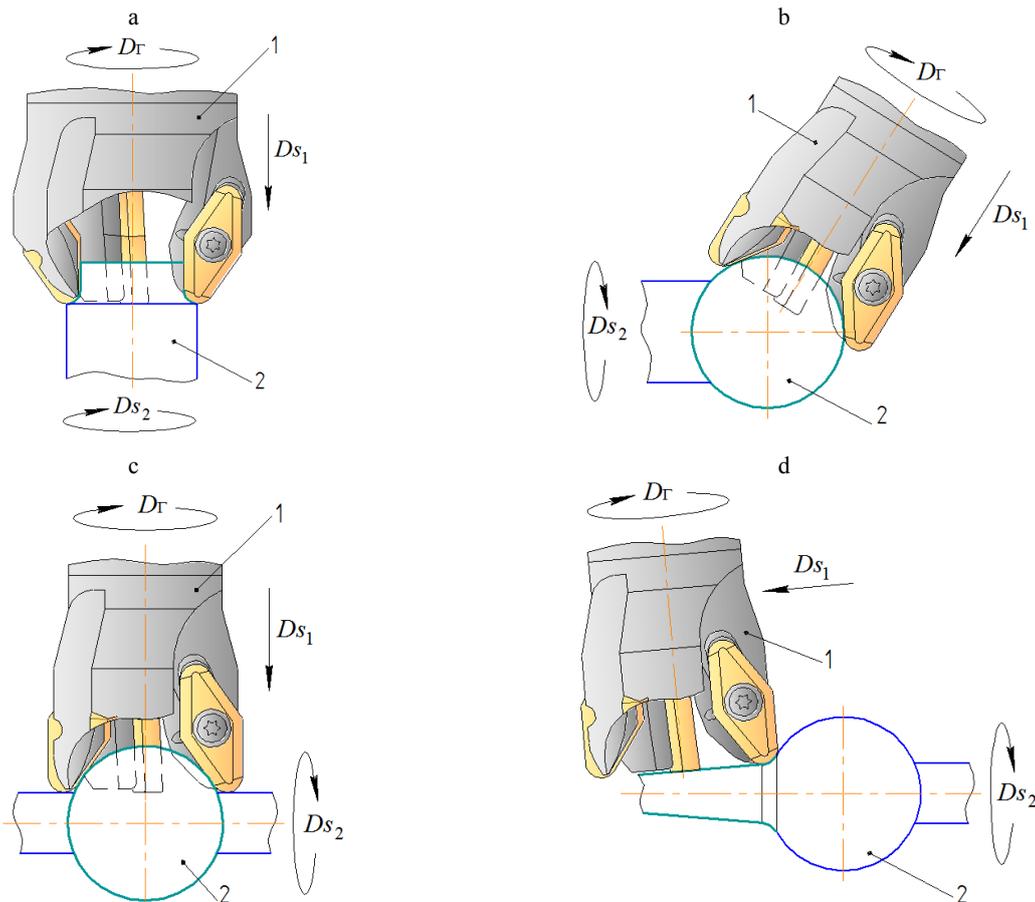


Рис. 1. Схемы обработки охватывающими фрезами (зенкерами) поверхностей:
а – цилиндрической; б, с – неполной сферической; д – конической

Fig. 1. Schemes for processing surfaces with covering cutters (countersinks):
а – cylindrical; б, с – incomplete spherical; д – conical

Выглаживание поверхности обеспечивается уменьшением значений углов в плане и заднего угла, которые могут принимать нулевые значения, и увеличением значений угла наклона режущей кромки лезвия, а также за счет существенного повышения скорости касательного движения [7]. Таким вращающимся инструментом (фрезой-зенкером) можно последовательно обрабатывать сферические, цилиндрические или конические поверхности детали по схемам, представленным на рис. 1д.

При обработке плоских поверхностей деталей, например уступов, полостей и т.п. (рис. 2а, б), реализуется схема резания с главным вращательным движением D_r и двумя поступательными движениями подачи D_{s1} и D_{s2} , обеспечивающими врезание фрезы по касательной к обрабатываемой поверхности или поверхности резания с линейной скоростью результирующего движения резания.

Реализация трехэлементных кинематических схем с движением резания по касательной к обрабатываемой поверхности представлена на рис. 3, отличающихся или двумя поступатель-

ными движениями подачи D_{s1} и D_{s2} (рис. 3а), или одним поступательным D_{s1} и одним вращательным D_{s2} (рис. 3б) движениями подачи. При этом формируются как плоская, так и цилиндрическая поверхности детали высокого качества.

Каждая из рассмотренных схем обработки может быть условно изображена трехэлементными кинематическими схемами резания, представленными на рис. 4.

В отличие от кинематических схем профессора Г. И. Грановского и в развитие обобщенной кинематической схемы с пятиэлементными движениями резания [8] в представленных на рис. 4а, б, с кинематических схемах уточнен тип режущего инструмента, который является охватывающим, и соответственно траектория вращательного движения подачи изображена внутри траектории главного вращательного движения в виде окружностей (рис. 4а), а в случае расположения оси главного вращательного движения под углом (рис. 4б) или перпендикулярно (рис. 4с) направлению вращательного движения подачи – в виде эллипса.

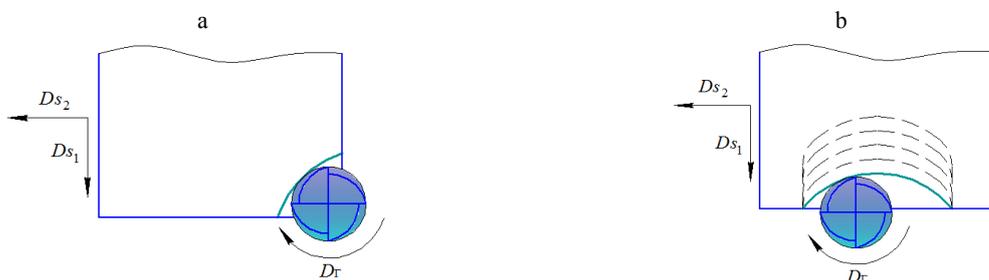


Рис. 2. Схемы обработки с врезанием фрезы по дуге: а – уступа; б – полузакрытой полости
 Fig. 2. Processing schemes with cutter insertion along an arc: а – ledge; б – semi-closed cavity

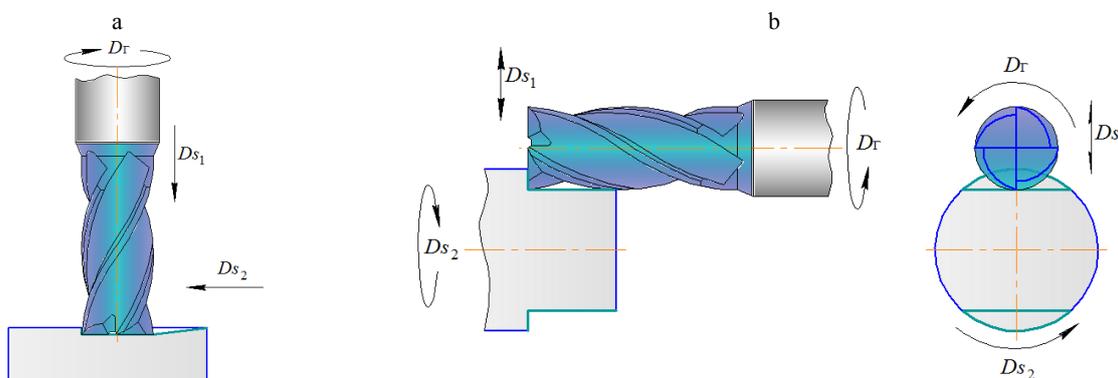


Рис. 3. Схемы обработки с врезанием фрезы по касательной: а – плоской поверхности детали; б – плоской и цилиндрической поверхностях детали

Fig. 3. Processing schemes with tangential cutter insertion: а – flat surface of the part; б – flat and cylindrical surfaces of the part

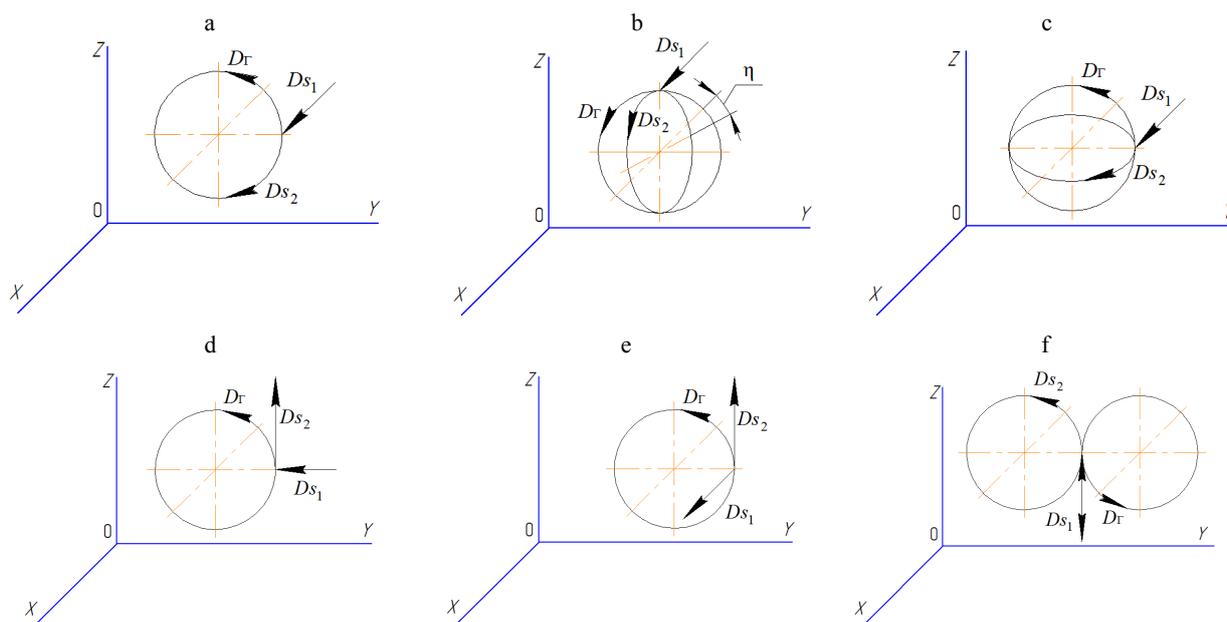


Рис. 4. Кинематические схемы резания: а – обработка охватывающими фрезами (зенкерами) цилиндрической или конической поверхности; б, с – то же неполной сферической поверхности;

д – обработка с врезанием фрезы по дуге уступа или полузакрытой полости; е – то же по касательной к плоской поверхности детали; ф – то же по касательной к плоской и цилиндрической поверхностям детали

Fig. 4. Kinematic cutting schemes: а – machining with covering cutters (countersinks) of cylindrical or conical surface; б, с – machining of an incomplete spherical surface with covering cutters (countersinks); д – machining with cutter insertion along the arc of a ledge or semi-closed cavity; е – machining with cutting the cutter tangentially to the flat surface of the part; ф – machining with cutting the cutter tangentially to the flat and cylindrical surfaces of the part

Данные схемы позволяют определить направление векторов скоростей составляющих движений и результирующего движения резания, при необходимости производить расчет их значений, а также представить траекторию перемещений инструмента и заготовки, что важно при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость ре-

зания, подача) и характеристики (сила резания, усадка стружки) процесса резания рассмотрим некоторые схемы обработки конструктивных элементов и поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом.

На рис. 5 представлена схема обработки плоской поверхности детали на токарно-фрезерном станке с ЧПУ. Обработка плоской поверхности может осуществляться как при попутном (рисунок 5а), так и при встречном фрезеровании (рис. 5б).

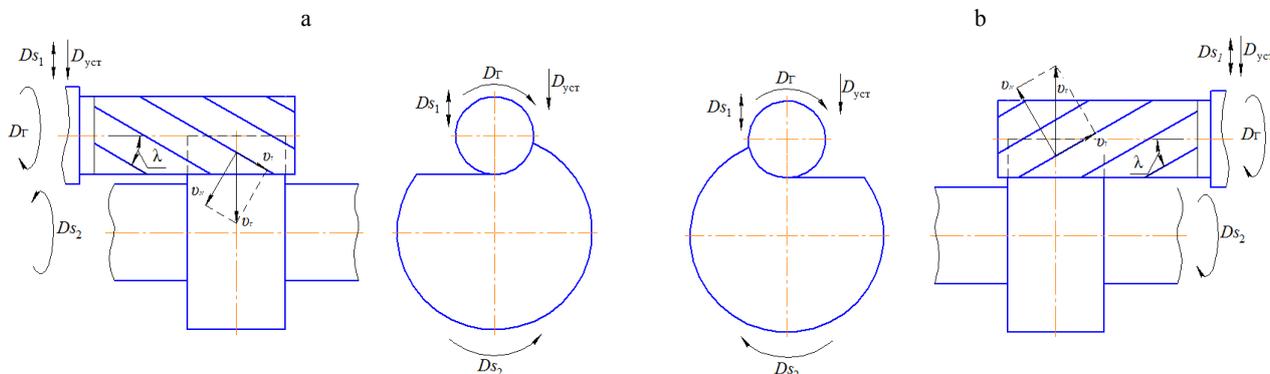


Рис. 5. Схемы обработки плоской поверхности детали при попутном (а) и встречном (б) фрезеровании

Fig. 5. Schemes for processing the flat surface of the part during passing (а) and counter (б) milling

Вращательное движение инструмента D_T совпадает по направлению с движением подачи заготовки D_{S_2} (при попутном фрезеровании) или разнонаправлены (при встречном фрезеровании), которые в сочетании с движением подачи инструмента D_{S_1} позволяют получать плоскую поверхность детали. На данных схемах видно, что нормальная линейная скорость резания v_N , направленная перпендикулярно к режущей кромке инструмента, в сочетании с линейной касательной скоростью резания v_T образуют линейную скорость главного движения резания инструмента v_T . Независимо от угла наклона режущей кромки λ скорость v_T будет перпендикулярна в любой точке режущей кромки к оси вращения инструмента. Но, учитывая значения скорости движения подачи инструмента v_{S_1} и заготовки v_{S_2} , значения результирующей скорости резания при попутном и встречном фрезеровании в различных точках соприкосновения режущего лезвия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки будут разными.

Как при попутном, так и при встречном фрезеровании скорость движения подачи инструмента v_{S_1} от точки начала врезания в заготовку до точки пересечения с осью детали имеет одно направление, а затем оно меняется на

противоположное, например, как при попутном фрезеровании на рис. 6. Данное изменение направлений скорости движения подачи инструмента v_{S_1} влияет на общее направление результирующей скорости резания. Направление результирующей линейной скорости обработки v_T и v_{\downarrow} , будет зависеть от направления суммарной скорости подачи v_{S_1} и v_{S_2} , которая включает скорости движения подачи инструмента v_{S_1} и заготовки v_{S_2} в рассматриваемой точке.

При попутном и встречном фрезеровании наблюдается угловое расхождение между результирующими скоростями обработки v_T и v_{\downarrow} . Величина расхождения между результирующими векторами будет зависеть не только от скорости движения подачи инструмента v_{S_1} , но и от разнонаправленности скорости резания инструмента v_T со скоростью подачи заготовки v_{S_2} в рассматриваемой точке (при попутном фрезеровании скорость v_T и скорость заготовки v_{S_2} в рассматриваемой точке направлены в одну сторону: при встречном – разнонаправлены).

Для определения величины результирующего вектора \bar{v}_T или \bar{v}_{\downarrow} воспользуемся теоремами косинусов и синусов. Расчетная схема нахождения результирующих скоростей представлена на рис. 7.

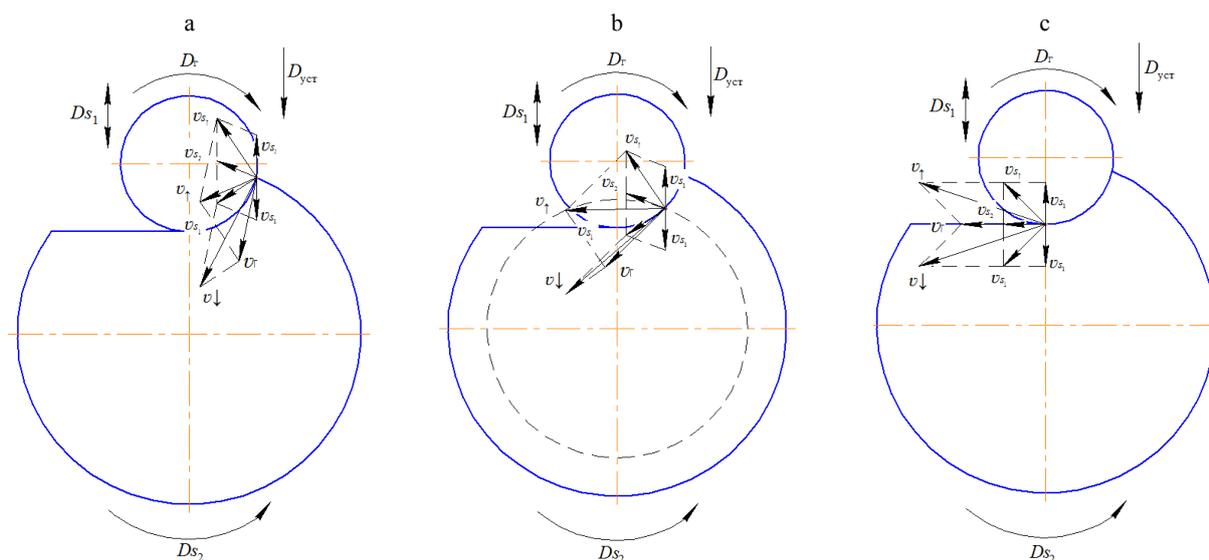


Рис. 6. Направления линейных скоростей резания при попутном фрезеровании плоской поверхности: а – в точке врезания инструмента в заготовку; б – в середине участка обработки; в – в точке выхода инструмента из заготовки

Fig. 6. Directions of linear cutting speeds during passing milling of a flat surface: а – at the point of embedding the tool into the workpiece; б – in the middle of the processing area; в – at the point of tool exit from the workpiece

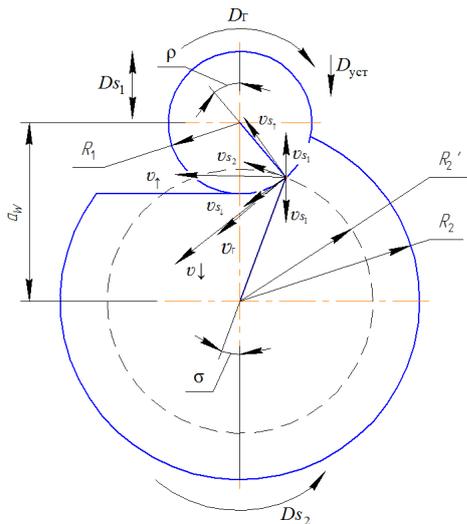


Рис. 7. Схема для определения результирующих линейных скоростей

Fig. 7. Scheme for determining the resulting linear velocities

При обработке плоскости вращающимся инструментом с радиусом R_1 цилиндрической заготовки с радиусом R_2 векторы линейных скоростей в любой точке обрабатываемого участка, которая расположена под некоторым углом ρ относительно центра инструмента, определяются путем нахождения контактного радиуса заготовки R'_2 . Этот радиус находится по формуле

$$R'_2 = \sqrt{a_w^2 + R_1^2 - 2a_w R_1 \cos \rho}. \quad (1)$$

Зная этот радиус, можно найти угол, под которым наклонен искомый радиус. Он находится по формуле

$$\frac{R'_2}{\sin \rho} = \frac{R_1}{\sin \sigma}. \quad (2)$$

Отсюда определяется угол наклона радиуса

$$\sigma = \arcsin \frac{R_1 \sin \rho}{R'_2}. \quad (3)$$

Зная этот угол и направление подачи, можно определить направление вектора линейной подачи в рассматриваемой точке относительно центра заготовки, который расположен перпендикулярно к радиусу контактной окружности заготовки R'_2 в рассматриваемой точке. Согласно правилу нахождения скалярного произведения, находим результирующий век-

тор подачи $u_{s\uparrow}$ или $u_{s\downarrow}$, направление которого зависит от направления подачи инструмента u_{s1} в рассматриваемой точке, по формуле

$$u_{s\uparrow}(u_{s\downarrow}) = u_{s1} \cdot u_{s2} \cdot \cos u_{s1} u_{s2} \quad (4)$$

Отсюда, зная направление скорости резания инструмента u_r , линейный вектор которой расположен перпендикулярно к радиусу окружности инструмента R_1 в рассматриваемой точке, можно найти результирующие векторы линейных скоростей обработки \bar{v}_\uparrow и \bar{v}_\downarrow

$$v_\uparrow(v_\downarrow) = u_r \cdot u_{s\uparrow}(u_{s\downarrow}) \cdot \cos u_r u_{s\uparrow}(u_{s\downarrow}) \quad (5)$$

Как известно [1], угол наклона режущей кромки λ рассматривается в инструментальной, статической и кинематической системах координат. В инструментальной системе координат угол λ_r , по сути, угол заточки режущей кромки инструмента, рассматриваемого как геометрическое тело (вне процесса резания). Этот угол определяется между режущей кромкой и отсчетной осью или поверхностью инструмента. Например, для концевой фрезы угол λ_r – это угол между режущей кромкой и геометрической осью (осью симметрии) (рис. 8).

Угол λ_c в статической системе координат – это угол установки инструмента на станке только при главном движении резания. В этом случае за отсчетную плоскость принимается основная плоскость, перпендикулярная вектору линейной скорости главного движения. Например, для концевой фрезы λ_c – это угол в статической плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью $P_{vC}-P_{vC}$.

В кинематической системе координат учитываются все элементарные движения резания и отсчетную основную плоскость проводят перпендикулярно вектору скорости резания (результирующей). Например, для концевой фрезы угол λ_k – это угол между режущей кромкой и кинематической основной плоскостью $P_{vK}-P_{vK}$.

При обработке плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рис. 9а) возможные варианты расположения режущей кромки на цилиндрической и торцевой поверхностях фрезы представлены на рис. 9б, с.

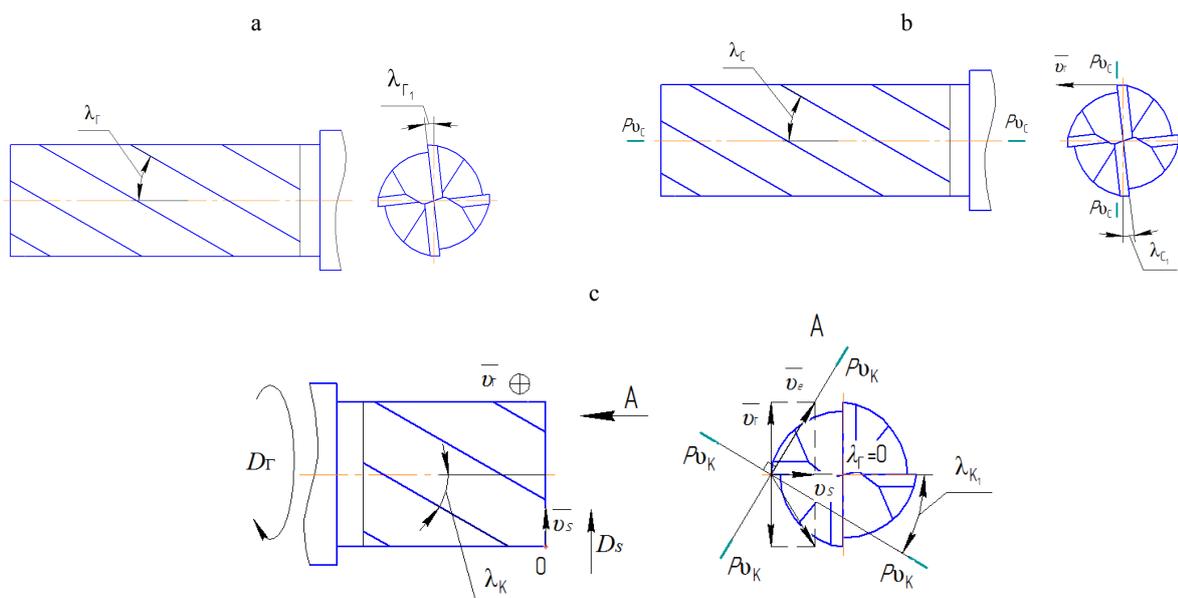


Рис. 8. Схема для определения угла наклона режущей кромки инструмента в инструментальной (а), статической (б) и кинематической (с) системах координат

Fig. 8. Diagram for determining the angle of inclination of the cutting edge of the tool in the instrumental (a), static (b) and kinematic (c) coordinate systems

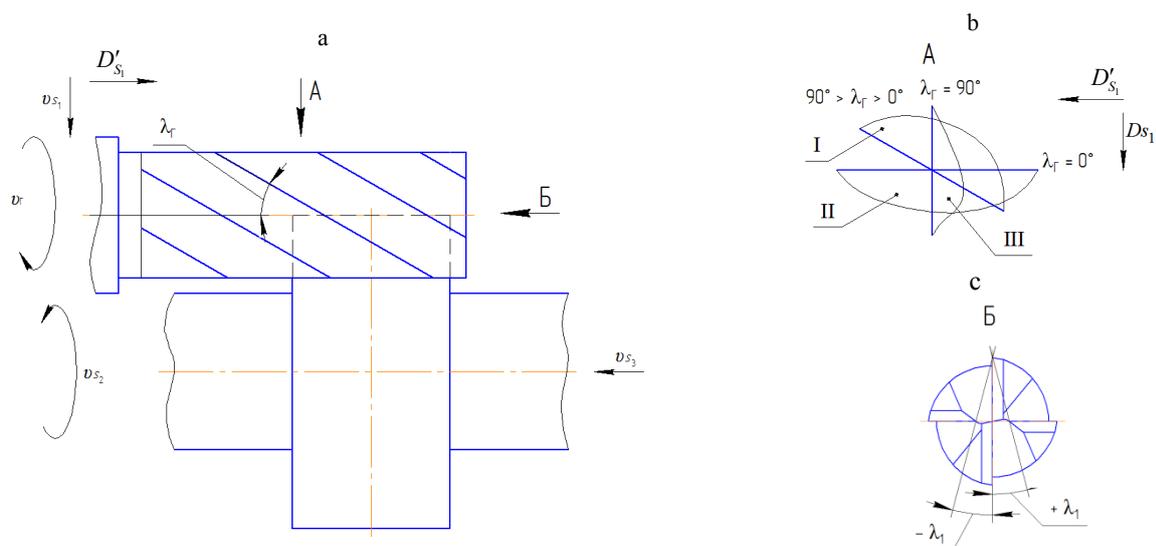


Рис. 9. Схема обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (а) и возможные углы наклона режущей кромки на цилиндрической (б) и торцевой (с) поверхностях концевой фрезы: I – фрезерование с подачами D_{s1} и D'_{s1} ; II – то же с подачей D_{s1} ; III – то же с подачей D'_{s1} ;

Fig. 9. Scheme of processing a flat surface of a rotating part with a rotating tool (a) and possible angles of inclination of the cutting edge on the cylindrical (b) and end (c) surfaces of the end mill: I – milling with feeds D_{s1} and D'_{s1} ; II – milling with feed D_{s1} ; III – milling with feed D'_{s1}

Если предположить, что $\lambda_r = 0^\circ$ (рис. 9б), то режущая кромка инструмента будет контактировать по максимальной ширине b , что приведет к росту сил и мощности резания. При $0^\circ < \lambda_r \leq 90^\circ$ резание возможно как при подаче инструмен-

та v_{s3} перпендикулярно или под углом к оси, так и вдоль оси главного вращательного движения D'_{s1} . В этом случае возможна реализация фрезерования, ротационного и плунжерного резания, для которых характерно снижение

мощности резания за счет касательного движения.

При касательном движении важно соотношение линейных скоростей вращения инструмента и заготовки (передаточное отношение i_k). Если реализуется кинематическая схема резания точения, то $\frac{v_{II}}{v_3} \leq 1$ и оптимальным

считается значение кинематического коэффициента $i_k = 0,5-0,6$, что соответствует изменению $60^\circ > \lambda_K > 30$ [5, 6]. Если реализуется кинематическая схема фрезерования, то $\frac{v_3}{v_{II}} < 1$,

и в этом случае $i_k = 0,01-0,10$, т. е. влияние изменения направления вектора линейной скорости вращения заготовки на положение основной плоскости незначительно и им можно пренебречь.

При фрезеровании существенным является влияние изменения λ_C , или угла установки осей вращения инструмента и заготовки на процесс резания, который для разных кинематических схем резания может принимать различные значения (рис. 10).

Например, при обработке цилиндрической или конической поверхности детали фреза и деталь соосны и $\lambda_C = \lambda_T$ (положение I фрезы на рис. 10). При обработке неполной сферической поверхности детали оси вращения детали и фрезы наклонены относительно друг друга под углом $90^\circ \geq \lambda_C > 0^\circ$ (положения II и III фрезы на рис. 10) и $\lambda_K = \lambda_C$.

При получении поверхностей деталей на станках с ЧПУ номинальная их форма отличается от реальной за счет интерполяции траек-

торий резания прямолинейными перемещениями по осям X и Y (рис. 11) [9].

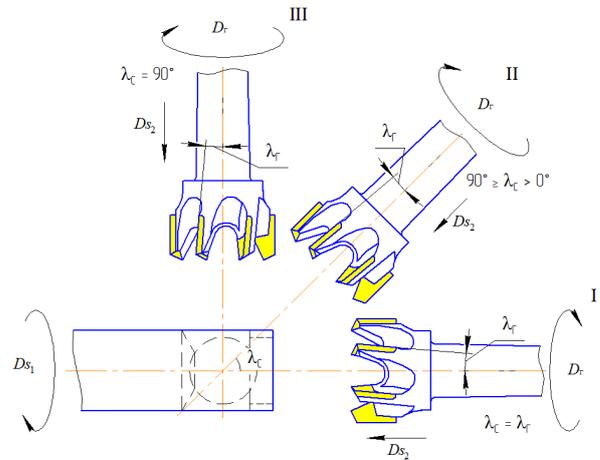


Рис. 10. Схемы обработки вращающимся инструментом вращающейся заготовки

Fig. 10. Schemes for processing a rotating workpiece with a rotating tool

Для обеспечения требований по качеству и точности получаемых поверхностей детали необходимо сопоставить назначаемые скоростные режимы резания с технологическими возможностями механизмов станка и системы ЧПУ.

Перемещение инструмента по заданной траектории резания осуществляется приближенно путем включения подачи попеременно, то вдоль одной, то вдоль другой оси. При этом интерpolator системы управления непрерывно оценивает отклонения от заданной траектории и стремится свести эти отклонения к минимуму. Значения отклонений равны или кратны цене одного управляющего импульса ($\Delta X_{имп}$, $\Delta Y_{имп}$), формируемого датчиком обратной связи.

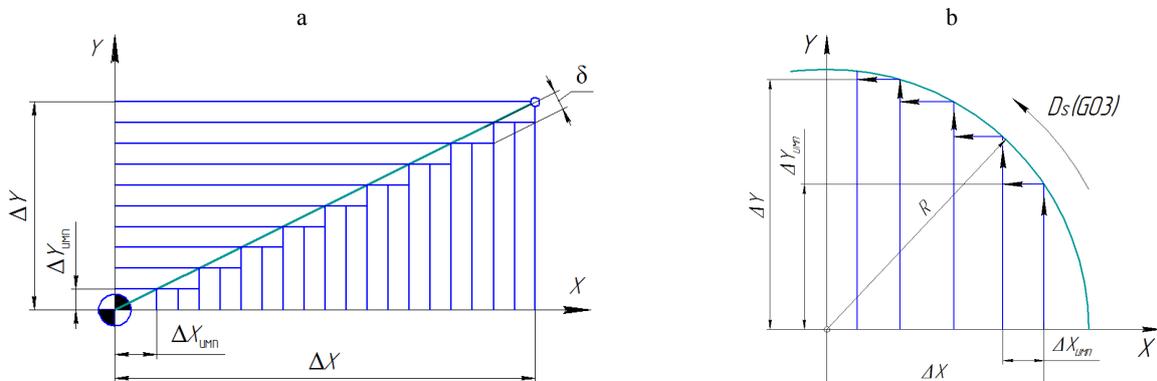


Рис. 11. Варианты реализации линейной (а) и круговой (б) интерполяции на станках с ЧПУ

Fig. 11. Implementation options for linear (a) and circular (b) interpolation on CNC machines

Например, прямая наклонная линия может формироваться попеременной подачей на приводы импульсов в такой последовательности: один импульс по оси Y и два импульса по оси X (рис. 11а).

Поскольку в современных станках наиболее часто длина импульса принимается равной 0,001 мм, перемещение между двумя соседними опорными точками практически можно рассматривать как плавное. Интерполяция может быть также круговой (рис. 11б) с помощью полиномов второй и высших степеней и др. Круговая интерполяция также предусматривает попеременное включение приводов, но при этом перемещения по осям не равномерны по величине. При круговой интерполяции начало системы координат совмещается с центром окружности радиуса R . Интерполятор направляет импульсы $\Delta X_{\text{имп}}$ и $\Delta Y_{\text{имп}}$ в привод подач то по оси X , то по оси Y . Помимо расчета количества импульсов для подачи в систему приводов той или иной оси, интерполятор обеспечивает и выдачу этого количества для управления. Современные станки с ЧПУ, как правило, имеют линейно-круговые интерполяторы.

При шаге перемещений, равном 0,01–0,02 мм, и при большом количестве кадров дискретность отсчета перемещений рабочего органа может составлять 0,07 нм или 7×10^{-8} мм. Максимальную подачу, которую способна обеспечить конкретная система ЧПУ, можно определить по формуле

$$F_{\text{max}} = \frac{\text{Длина перемещения в кадре}}{\text{Время обработки кадра}} \times 60. \quad (6)$$

Следовательно, при перемещениях 0,01 мм и времени обработки кадра 2 мс максимальная подача ограничена значением 0,3 м/мин. При этом система ЧПУ должна иметь возможность просматривать данные как минимум на 100–200 блоков в минуту вперед для обеспечения непрерывного движения инструмента.

Если принять результирующую скорость резания равной 100 м/мин и угол наклона режущей кромки фрезы равным 45° , то значение линейной скорости касательного движения будет равно 70 м/мин. Так как линейная скорость касательного движения в несколько сот раз больше скорости подачи в кадре, подачей

в кадре с точки зрения формирования криволинейной поверхности детали можно пренебречь. Также можно пренебречь влиянием величины прямолинейных перемещений в кадре, или шагом интерполяции, равным 0,01–0,02 мм, так как, например, при подаче фрезы, равной 0,1 мм/об, и угле в плане режущего инструмента, равном 90° , толщина срезаемого слоя будет равна 0,1 мм. То есть толщина срезаемого слоя в десятки раз больше шага интерполяции и выполняется еще одно условие выбора значения подачи, при котором оно должно изменяться обратно пропорционально объему удаляемого материала для сохранения постоянной нагрузки на инструмент. При рекомендованном [9] соблюдении соотношения глубины резания (ширины срезаемого слоя) и подачи (толщины срезаемого слоя) не более 0,2 и высокой скорости резания (порядка 600 м/мин) обеспечивается получение поверхности с шероховатостью по параметру $Ra = 1,6\text{--}3,2$ мкм, сопоставимому со шлифованными поверхностями.

Рассмотрим частный случай обработки плоской поверхности (рис. 12а, б) на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45, при котором линейная интерполяция (рис. 12д) осуществляется путем совмещения прямолинейного перемещения инструмента вдоль оси X и кругового движения (подворота) детали относительно своего геометрического центра (рис. 12б, д). Инструмент 2 (рис. 12а, б) снимает припуск по ширине a_e и глубине резания a_p «послойно» до получения номинальной плоской поверхности длиной $l_{\text{л}}$. Количество необходимых проходов выбирается с учетом диаметра режущего инструмента и задается системе ЧПУ, которая затем рассчитывает и реализует обработку плоской поверхности на станке с промежуточными значениями ширины резания a_{ei} и длины плоской поверхности $l_{\text{л}i}$.

Круговое движение детали в процессе резания имеет равный шаг подворота (равный угол подворота) в отличие от прямолинейного перемещения инструмента, при котором по мере приближения инструмента к геометрическому центру детали (середине обрабатываемой плоской поверхности) величины его проходов изменяются. Эти разные величины проходов можно определить по теореме синусов.

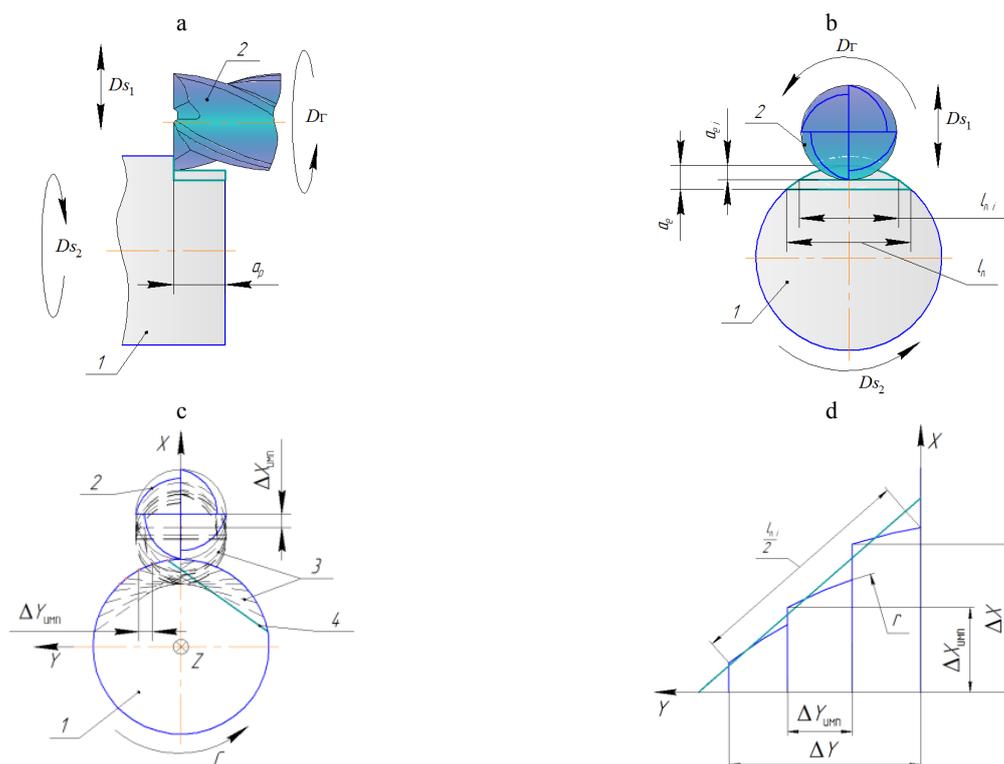


Рис. 12. Схемы обработки (a, b) и формирования плоской поверхности (c) с реализацией линейной интерполяции (d) на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45: 1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – промежуточные положения детали и инструмента; 4 – номинальная плоская поверхность

Fig. 12. Schemes for processing (a, b) and formation of a flat surface (c) with the implementation of linear interpolation (d) on a CNC lathe model EMCO S45: 1 – part; 2 – tool; 3 – intermediate positions of the part and tool; 4 – nominal flat surface

При врезании инструмента (рис. 13) обрабатываемая поверхность расположена под углом α_1 к оси Y . Соединив концы проекции обрабатываемой поверхности параллельными линиями вдоль геометрических осей детали, получим прямоугольный треугольник с катетами ΔX_1 и ΔY_1 и гипотенузой l_{n1} , в котором длина катета $\Delta X_1 = l_{n1} \sin \alpha_1$. При дальнейшем перемещении инструмента вдоль оси X обрабатываемая поверхность подвернется на некоторый угол и достигнет значения угла α_2 к оси Y , где $\alpha_2 < \alpha_1$. Также соединив концы проекции обрабатываемой поверхности параллельными линиями вдоль геометрических осей детали, получим другой прямоугольный треугольник с катетами ΔX_2 и ΔY_2 и гипотенузой l_{n2} , в котором длина катета $\Delta X_2 = l_{n2} \sin \alpha_2$. Так как в процессе резания получаем плоскую поверхность, которая на различных углах подворота детали будет одинаковой, можно утверждать, что $l_{n1} = l_{n2} = l_{n3}$. Следовательно, через синус угла можно найти катеты прямоугольных треугольников ΔX_1 и ΔX_2 . Отсюда получаем,

что $\Delta X_2 = l_{n2} \sin \alpha_2 < \Delta X_1 = l_{n1} \sin \alpha_1$. Например, при обработке лыски шириной 7 мм и глубиной 1 мм на цилиндрической детали диаметром 32 мм значения угла α изменяются в пределах от 9° до 20° и величины ΔX_1 и ΔX_2 будут равны соответственно 0,2 и 1,0 мм.

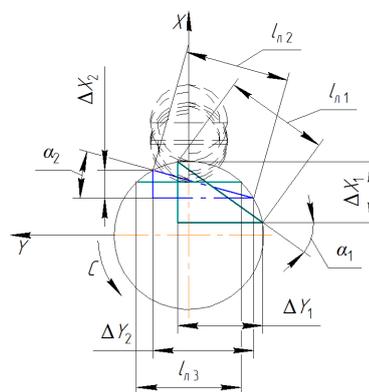


Рис. 13. Схема для расчета угла подворота при обработке плоской поверхности на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45

Fig. 13. Scheme for calculating the angle of rotation when processing a flat surface on a CNC lathe model EMCO S45

Следует отметить, что при каждом последующем повороте детали угол наклона обрабатываемой поверхности $\alpha \rightarrow 0$, а значит, каждое последующее перемещение инструмента $\Delta X \rightarrow 0$ до того момента, пока угол наклона обрабатываемой поверхности не начнет увеличиваться, а следовательно, начнет увеличиваться и прямолинейное перемещение инструмента.

ВЫВОДЫ

1. Анализ схем обработки сложнопрофильных поверхностей деталей позволяет выбрать рациональную кинематическую схему резания с касательным движением режущих кромок инструментов, обеспечивающую повышение производительности и качества формирования номинальной поверхности детали.

2. Получены математические зависимости для расчета линейной скорости резания при различных схемах и условиях обработки, что позволяет управлять режимом резания на станках с ЧПУ.

3. Рассмотрено изменение угла наклона режущей кромки в инструментальной, статической и кинематической схемах координат и определены диапазоны этого изменения, позволяющие реализовать зенкерование, периферийное, торцовое, плунжерное и охватывающее фрезерование, ротационное резание поверхностей различного профиля.

4. Рассмотрены частные случаи обработки поверхностей деталей на станках с ЧПУ с дискретными перемещениями режущего инструмента и детали, особенностью которых является формирование плоской поверхности детали путем совмещения прямолинейного перемещения инструмента вдоль одной оси и кругового движения (поворота) детали относительно другой оси, что обеспечивает получение поверхностей детали в пределах заданных параметров точности и шероховатости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий: ГОСТ 25762. М.: Изд-во стандартов, 1985. 24 с.
2. Цельные концевые фрезы. Каталог. Техническое руководство / SECO. 2020. 435 с.
3. Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. М.: Машгиз, 1948. 199 с.
4. Бобров, В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. М.: Машгиз, 1962. 52 с.
5. Коновалов, Е. Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко, А. В. Соусь. Минск: Наука и техника, 1972. 272 с.

6. Ротационное резание материалов / П. И. Яцерицин [и др.]. Минск: Наука и техника, 1987. 229 с.
7. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей / Н. Н. Попок [и др.] // Вестник Белорусско-российского университета. 2017. № 2 (55). С. 87–97.
8. Попок, Н. Н. Методология исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения / Н. Н. Попок // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2019. № 3. С. 21–30.
9. Звонцов, И. Ф. Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ: учеб. пособие / И. Ф. Звонцов, К. М. Иванов, П. П. Серебренникий. СПб.: Изд-во «Лань», 2017. 588 с.
10. Guhring Super Line [Electronic Resource]. 2016. Mode of access: <https://pdf.directindustry.com/pdf/guehring/superline-2016/9235-706023.html>.

Поступила 29.04.2024

Подписана в печать 09.07.2024

Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. State Standard 25762. *Machining. Terms, Definitions and Designations of General Concepts*. Moscow, Publishing House of Standards, 1983. 24 (in Russian).
2. SECO (2020) *Solid end Mills. Catalog. Technical Guide*. 435 (in Russian).
3. Granovsky G. I. (1948) *Cutting Kinematics*. Moscow, Mashgiz Publ. 199 (in Russian).
4. Bobrov V. F. (1962) *Influence of the Angle of Inclination of the Main Cutting Edge of the Tool on the Metal Cutting Process*. Moscow, Mashgiz Publ. 52 (in Russian).
5. Konovalov E. G., Sidorenko V. A., Sous A. V. (1972) *Progressive Schemes for Rotary Cutting of Metals*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 272 (in Russian).
6. Yashcheritsin P. I., Borisenko A. V., Drivotin I. G., Lebedev V. Ya. (1987) *Rotary Cutting of Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 229 (in Russian).
7. Popok N. N., Khmel'nitskii R. S., Anisimov V. S., Gvozd' G. I. (2017) Comprehensive Studies of the Physical and Technological Characteristics of Processing Spherical Surfaces of Parts. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (2), 87–97 (in Russian).
8. Popok N. N. (2019) Methodology for Studying the Process of Cutting Materials in Modern Conditions of Mechanical Engineering Development. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (3), 21–30 (in Russian).
9. Zvontsov I. F., Ivanov K. M., Serebrenitsky P. P. (2017) *Development of Control Programs for Computerized Numerical Control Equipment*. Saint Petersburg, Lan Publ. 588 (in Russian).
10. *Guhring Super Line*. 2016. Available at: <https://pdf.directindustry.com/pdf/guehring/superline-2016/9235-706023.html>.

Received: 29.04.2024

Accepted: 09.07.2024

Published online: 29.11.2024