

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.91.01

**КИНЕМАТИКА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ВРАЩАЮЩИМСЯ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ
С КАСАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, В.С. АНИСИМОВ**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены преимущества механической обработки поверхностей деталей инструментом с касательным движением режущей кромки, приведены результаты исследований кинематических параметров процесса резания плоских, цилиндрических и сферических поверхностей деталей.

Ключевые слова: механическая обработка, процесс резания, вращающийся режущий инструмент, касательное движение, угол наклона режущей кромки.

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

Обоснование преимуществ касательного движения режущей кромки инструмента. Согласно ГОСТ 25762 [3] касательное движение D_K – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменять контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. Профессор В.Ф. Бобров [4] трактует понятие касательного движения шире и рассматривает наружное продольное точение резцом с углом наклона режущей кромки равным 90° , когда режущая кромка касательна к обработанной поверхности, и продольное точение широким резцом с углом наклона режущей кромки не равным 0° и углом в плане равным 0° , когда режущая кромка перемещается вдоль самой себя. Он доказал, что увеличение угла λ при свободном резании уменьшает степень деформации стружки по длине, толщине и ширине. Если было бы возможно резание инструментом с углом λ_K равным 90° , то в этом случае размеры срезанной стружки были бы равны размерам срезаемого слоя. Однако это не означает, что зерна металла срезаемого слоя не будут деформироваться, т.к. относительный сдвиг и интенсивность деформаций с ростом угла λ уменьшаются сравнительно мало, а в некоторых случаях остаются постоянными. Последнее происходит потому, что уменьшение нормального относительного сдвига компенсируется соответствующим увеличением относительного сдвига вдоль режущей кромки. При возрастании угла λ растут составляющие силы резания и боковая сила, т.к. возрастает рабочая длина режущей кромки. С увеличением угла λ увеличивается удельная работа резания и удельная работа трения на передней поверхности инструмента, а удельная работа деформации при этом уменьшается. Влияние увеличения угла λ на удельную работу и ее составляющие заметно только при $\lambda > 30^\circ\text{--}40^\circ$. При возрастании угла λ происходит уменьшение средней температуры стружки и увеличение износа режущей кромки. В дальнейших исследованиях процесса резания с принудительным перемещением режущей кромки вдоль самой себя отмечается [5], что указанный процесс соответствует процессу резания инструментом со статическим углом $\lambda \neq 0$ и постоянной рабочей длиной режущей кромки. Особенности процесса, по сравнению с обычным резанием с прямолинейной кромкой,

состоят в том, что, во-первых, рабочий угол наклона режущей кромки создается кинематически и его величина определяется соотношением линейных скоростей вращения резца и заготовки v_p / v ; во-вторых, что в соприкосновении со срезаемым слоем за один оборот резца вступают все новые участки передней и задней поверхностей. Процессу присущи почти все закономерности резания, осуществляемого путем придания инструменту статического угла $\lambda_c \neq 0$. Исключением является более интенсивное уменьшение силы трения F , чем нормальной силы N при увеличении соотношений v_k / v (рабочего угла наклона кромки λ_k), приводящего не к увеличению среднего коэффициента трения, как это имеет место при традиционном резании, а к его уменьшению. Путь резания точки режущей кромки вращающегося резца уменьшается при возрастании угла λ , что увеличивает период стойкости инструмента.

В 70 – 80-е годы XIX столетия активизировалось применение ротационного резания, в котором реализуется касательное перемещение режущей кромки, и во многих исследованиях доказывались преимущества этого вида обработки по снижению трения, работы резания, температуры резания, шероховатости обработанной поверхности [6]. В частности, В.А. Землянский утверждал [7], что согласно вариационному принципу Остроградского – Гамильтона (принципу наименьшего действия), из всех возможных перемещений системы действительное перемещение между заданными точками будет соответствовать наименьшему действию. Применительно к обработке самовращающимся инструментом из всех возможных значений линейной скорости вращения при заданных условиях действительная скорость будет соответствовать наименьшей суммарной работе сил резания на режущих кромках резца и сил трения в его опорах. Следовательно, самовращающийся резец сам должен за счет линейной скорости вращения выходить на режим минимальной затраты энергии, что соответствует наименьшим силам и температуре в зоне резания, а значит и наибольшей стойкости инструмента. Одновременно с этим при любой скорости вращения, не равной нулю, стойкость вращающегося резца должна быть большей, чем у обычного резца, из-за более эффективного охлаждения при непосредственном контакте рабочих участков режущих кромок с охлаждающей средой и увеличением длины активной части лезвия резца. При резании круглым резцом трение скольжения деформируемого материала по рабочим поверхностям заменяется частично трением качения в опорах вращающейся части резца. Это явление сопровождается уменьшением линейных скоростей, а значит и соответствующим снижением работы поверхностного трения, что в свою очередь, влечет за собой снижение работы объемного деформирования благодаря меньшей интенсивности деформации. Уменьшение пластического деформирования срезаемого слоя и трения на поверхностях режущего лезвия инструмента за счет касательного перемещения режущей кромки приводит к снижению температуры резания. Так, И.С. Кушнер и В.В. Ледяев отмечали [8] немонотонное изменение температуры резания при увеличении соотношений скоростей вращения резца и заготовки. Причем точки минимальных значений температуры резания соответствуют соотношению линейных скоростей резца и детали в пределах 0,5...0,6, что соответствует углу наклона режущей кромки примерно 30°. Немонотонное изменение температуры резания при переменной скорости вращения резца, по-видимому, связано со следующими обстоятельствами: уменьшение количества выделяемой теплоты в результате снижения работы резания, происходящего при увеличении соотношений скоростей резца и детали (угла наклона режущей кромки), противодействует уменьшению отдачи теплоты в окружающую среду контактными поверхностями резца. Чем больше это соотношение, тем меньше время охлаждения поверхностей резца при холостом пробеге режущей кромки и более нагретыми вступают в резание его контактные поверхности. Действие обоих факторов приводит к образованию точки минимума на кривых зависимости температуры резания от соотношения линейных скоростей резца и детали.

Результаты этих исследований не были реализованы в полной мере в связи с отсутствием компактных приводов с «жесткими» и высокоскоростными характеристиками, быстродействующих программируемых систем и т.д. Необходимо отметить, что этим работам предшествовали разработки 40-х годов XIX столетия, включающие вращательные трубчатые резцы [9], использующие принцип В. Рейхеля [10], который утверждал, что каждой паре обрабатываемого и инструментального материалов соответствует оптимальная температура резания. Позднее профессор А.Д. Макаров подтвердил достоверность этого принципа [11] применительно к обработке нержавеющей стали и жаропрочных сплавов. То есть с интервалом в 20 – 40 лет происходит возвращение к старым идеям, на качественно новом техническом уровне в связи с развитием «жесткого» и быстродействующего металлообрабатывающего оборудования.

В работе [12] были сопоставлены результаты исследований процесса резания с касательным перемещением режущей кромки в режимах самовращения и принудительного вращения инструмента, а также рассмотрены преимущества применения прерывистой режущей кромки. В частности, отмечена взаимосвязь таких характеристик процесса резания, как сила резания, усадка стружки, длина контакта, коэффициент трения и температура резания при изменении режима резания (соотношения линейной скорости вращающихся резца и детали, скорости детали, подачи на оборот и глубины резания) [13]. Установлен минимум значений температуры резания при определенных значениях соотношений линейных скоростей вращения резца и заготовки, что позволило предложить способ обработки с оптимизацией

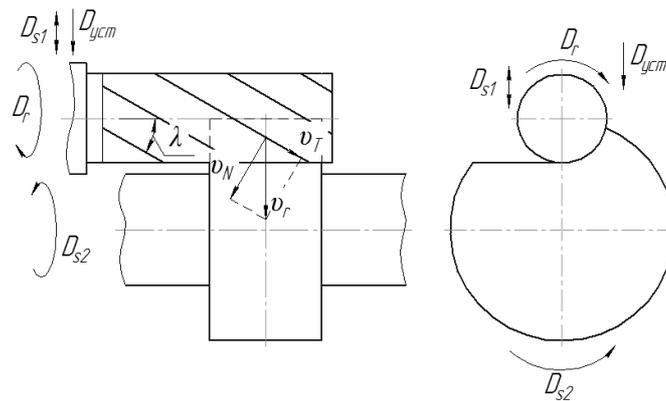
режимов резания [14], при котором корректировку скорости резания производят путем изменения одновременно линейной скорости вращения резца и заготовки при значениях соотношений скоростей вращения резца и заготовки от 0,2 до 0,6.

Результаты рассмотренных исследований были положены в основу совершенствования и развития обработки поверхностей деталей в виде тел вращения вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Кинематика процесса резания. Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость резания, подача) и характеристики (сила резания, усадка стружки) процесса резания рассмотрим некоторые схемы обработки конструктивных элементов и поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом.

На рисунке 1 представлена схема обработки плоской поверхности детали на токарно-фрезерном станке с ЧПУ. Обработка плоской поверхности может осуществляться как при попутном (рисунок 1, а), так и при встречном фрезеровании (рисунок 1, б).

а)



б)

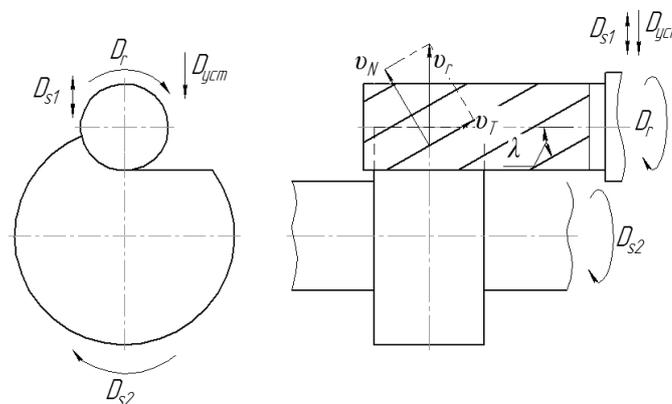


Рисунок 1. – Схемы обработки плоской поверхности детали при попутном (а) и встречном (б) фрезеровании

Вращательное движение инструмента D_r , которое совпадает по направлению с движением подачи заготовки D_{s2} , (при попутном фрезеровании) или разнонаправлено (при встречном фрезеровании), в сочетании с движением подачи инструмента D_{s1} позволяет получать плоскую поверхность детали. На данных схемах видно, что нормальная линейная скорость резания v_N , направленная перпендикулярно к режущей кромке инструмента в сочетании с касательной линейной скоростью резания v_T образуют линейную скорость резания инструмента v_r . Независимо от угла наклона режущей кромки λ скорость резания инструмента v_r будет перпендикулярна в любой точке режущей кромки к оси вращения инструмента. Но, учитывая скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} , результирующая скорость резания при попутном и встречном фрезеровании в различных точках соприкосновения режущего лезвия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки будет разной.

Как при попутном, так и при встречном фрезеровании скорость движения подачи инструмента v_{s1} от точки начала врезания в заготовку до точки пересечения с осью детали имеет одно направление, которое затем меняется на противоположное (рисунки 2 и 3). Данное изменение направлений скорости движения подачи инструмента v_{s1} влияет на общее направление результирующей скорости резания. Направление результирующей линейной скорости обработки $v \uparrow$ и $v \downarrow$, будет зависеть от направления

суммарной скорости подачи v_{s1} и v_{s2} , включающей скорости движения подачи инструмента v_{s1} и заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке.

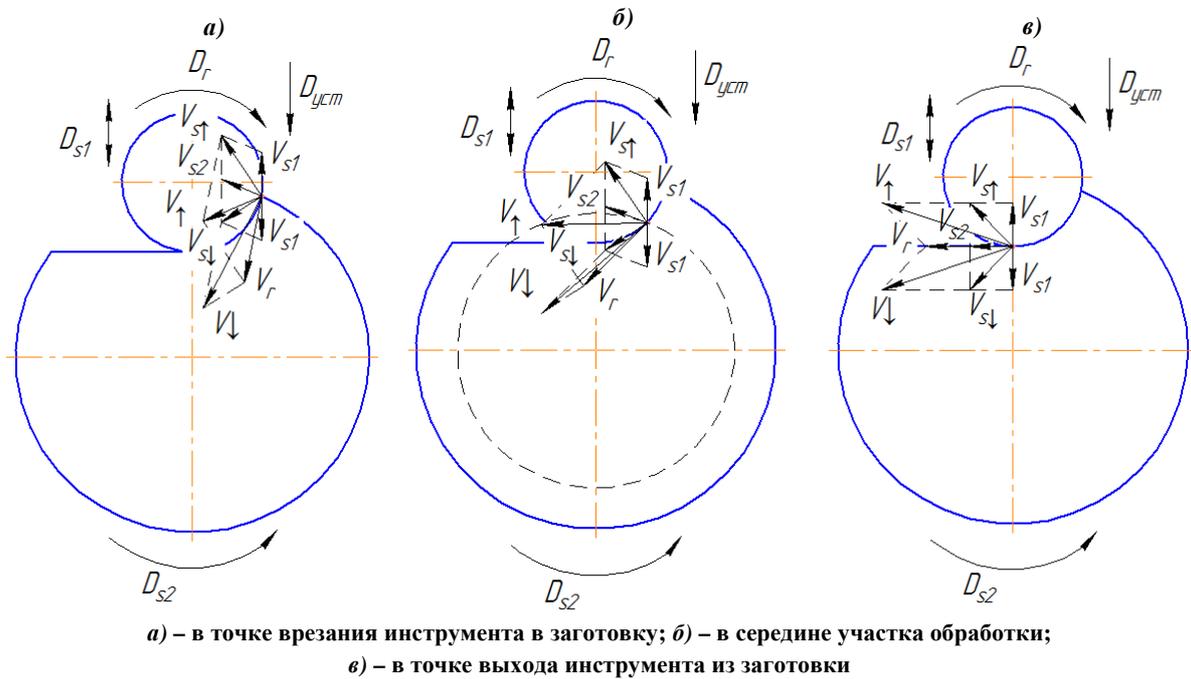


Рисунок 2. – Направления линейных скоростей резания при попутном фрезеровании плоской поверхности

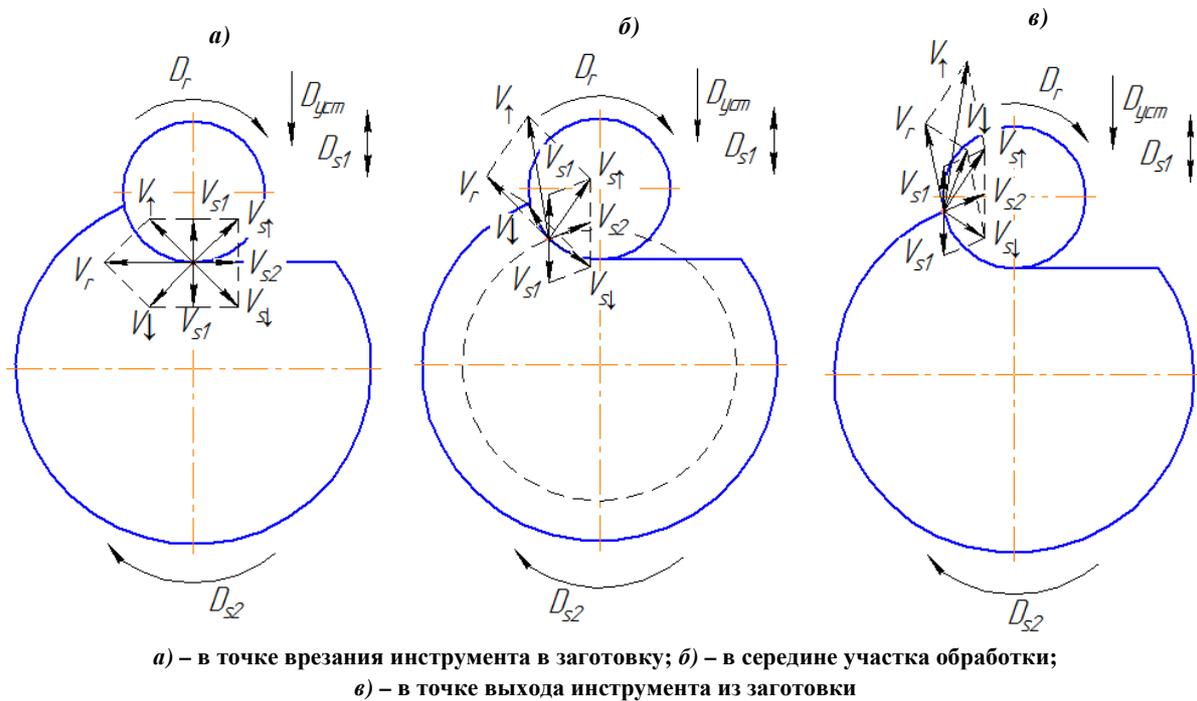


Рисунок 3. – Направления линейных скоростей резания при встречном фрезеровании плоской поверхности

Из рисунков 2 и 3 видно, что при попутном и встречном фрезеровании наблюдается угловое расхождение между результирующими скоростями обработки v_{\uparrow} и v_{\downarrow} . Величина расхождения между результирующими векторами будет зависеть не только от скорости движения подачи инструмента v_{s1} , но и от разнонаправленности скорости резания инструмента v_r со скоростью подачи заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке (при попутном фрезеровании скорость v_r и скорость заготовки v_{s2} в рассматриваемой точке направлены в одну сторону: при встречном – разнонаправлены).

Для определения величины результирующего вектора \vec{v}_\uparrow или \vec{v}_\downarrow воспользуемся теоремами косинусов и синусов. Расчетная схема нахождения результирующих скоростей представлена на рисунке 4.

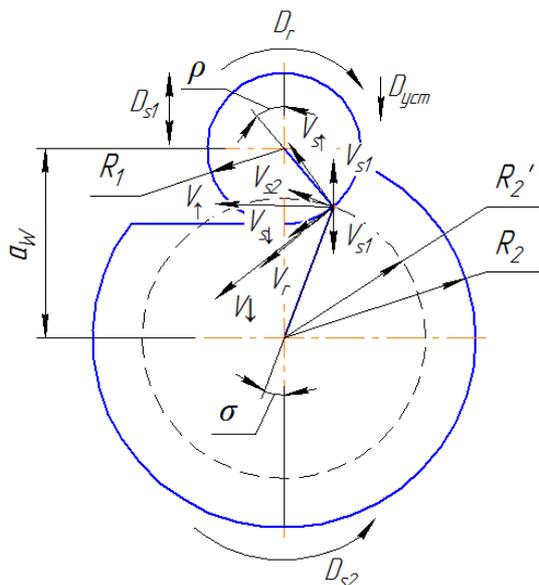


Рисунок 4. – Схема для определения результирующих линейных скоростей

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 как $R_2' = \sqrt{a_w^2 + R_1^2 - 2 \cdot a_w \cdot R_1 \cdot \cos \rho}$. Зная этот радиус можно найти угол, под которым наклонен искомый радиус. Он находится следующим образом: $\frac{R_2'}{\sin \rho} = \frac{R_1}{\sin \sigma}$. Отсюда определяется угол наклона радиуса: $\sigma = \arcsin \frac{R_1 \cdot \sin \rho}{R_2'}$.

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 вектор подачи $v_{s\uparrow}$ или $v_{s\downarrow}$, направление которого зависит от направления подачи инструмента v_{s1} в рассматриваемой точке: $v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow}) = v_{s1} \cdot v_{s2} \cdot \cos v_{s1}v_{s2}$. Отсюда, зная направление скорости резания инструмента v_r , линейный вектор которой расположен перпендикулярно к радиусу окружности инструмента R_1 в рассматриваемой точке, можно найти результирующие векторы линейных скоростей обработки \vec{v}_\uparrow и \vec{v}_\downarrow : $v_\uparrow(v_\downarrow) = v_r \cdot v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow}) \cdot \cos v_r v_{s\uparrow}(v_{s\downarrow})$.

Как известно, угол наклона режущей кромки λ рассматривается в инструментальной, статической и кинематической системах координат [3]. 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) (рисунок 5).

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 $Pv_c - Pv_c$.

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

При обработке плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рисунок 6, а) возможные варианты расположения режущей кромки на цилиндрической и торцевой поверхностях фрезы представлены на рисунках 6, б и 6, в.

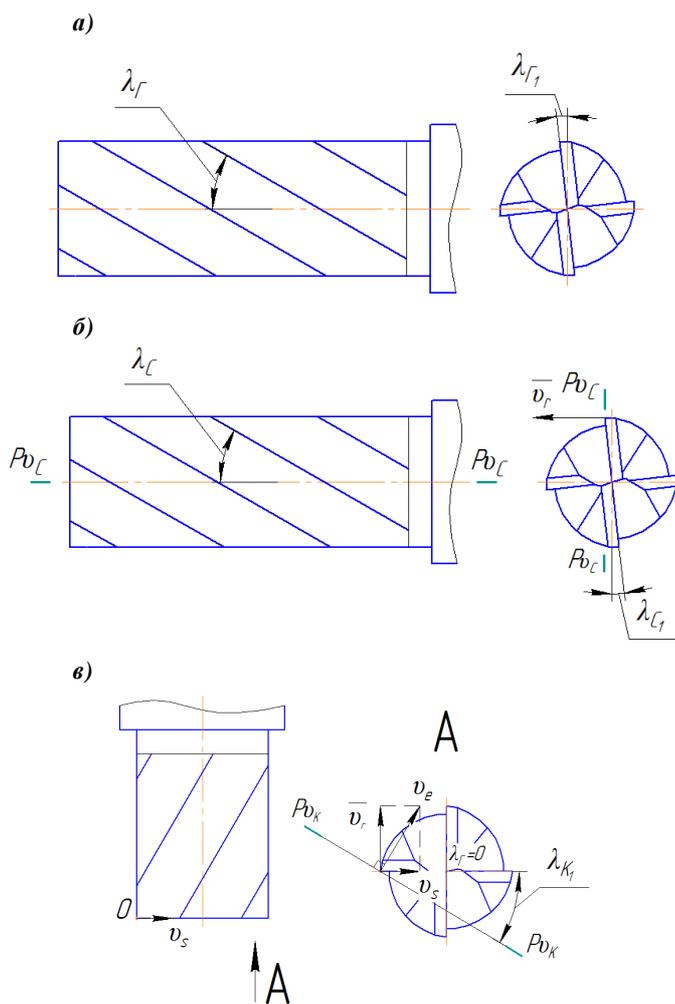


Рисунок 5. – Схема для определения угла наклона режущей кромки инструмента в инструментальной (а), статической (б) и кинематической (в) системах координат

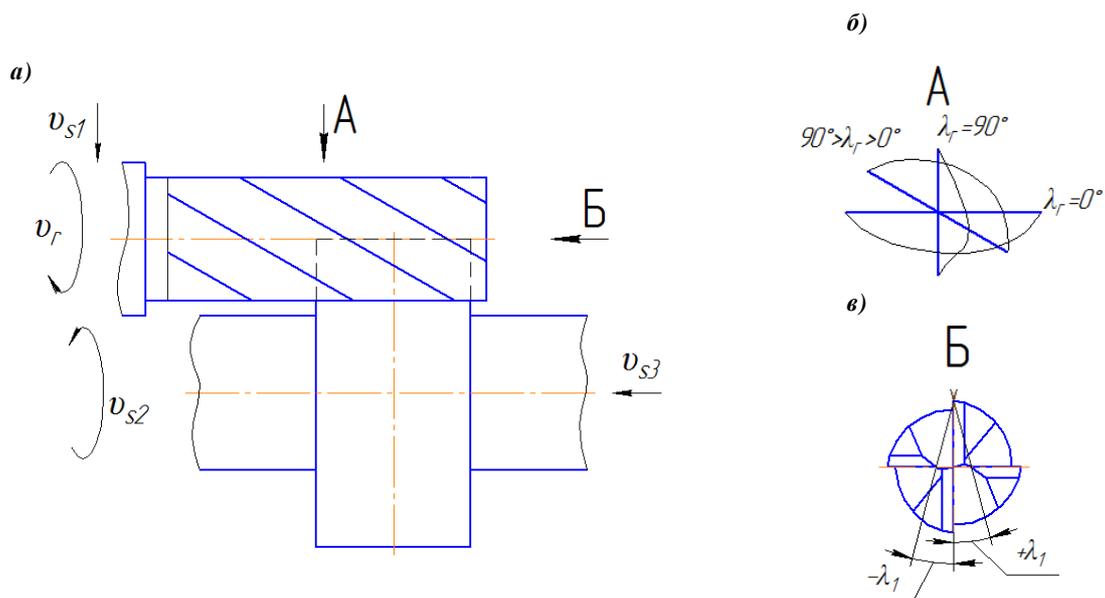


Рисунок 6. – Схема обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (а) и возможные углы наклона режущей кромки на цилиндрической (б) и торцевой (в) поверхностях концевой фрезы

Если $\lambda_r = 0^\circ$ (см. Рисунок 6, б), то режущая кромка инструмента контактирует по максимальной ширине b , что приводит к росту сил и мощности резания. При $0^\circ < \lambda_r \leq 90^\circ$ резание возможно при подаче инструмента v_{s3} вдоль оси главного вращательного движения. В этом случае реализуется ротационное и плунжерное резание, 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 $i_k = 0,5 \dots 0,6$, что соответ-

ствует изменению $60^\circ > \lambda_K > 30^\circ$. Если реализуется кинематическая схема фрезерования, то $\frac{v_3}{v_{II}} < 1$ и в

этом случае $i_k = 0,01 \dots 0,1$, то есть влияние изменения направления вектора линейной скорости 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 (рисунок 7).

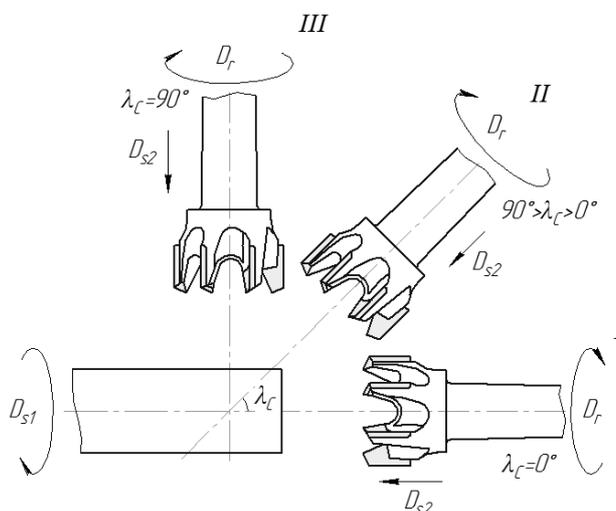


Рисунок 7. – Схемы установки вращающегося инструмента относительно вращающейся детали

Например, при обработке цилиндрической или конической поверхностей детали фреза и деталь соосны и $\lambda_c = 0^\circ$ (положение I фрезы на рисунке 7). 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 рисунке 7).

Заключение. Кинематический анализ различных схем обработки плоских, цилиндрических, сферических, винтовых (резьбовых) поверхностей деталей показывает, что им присуще движение режущей кромки по касательной к поверхности резания или обрабатываемой поверхности детали, характеризующиеся соответствующими направлением и величиной линейной скорости резания. При этом возможно изменение значений геометрического угла наклона режущей кромки вращающегося инструмента в пределах от 0° до 90° за счет угла установки оси вращения детали или инструмента и положения основной плоскости в кинематической системе координат. Наличие касательного движения и трансформация угла наклона режущей кромки приводят к существенным изменениям физических характеристик процесса резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский, Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский – М. : Машгиз, 1948. – 199 с.
2. Попок, Н.Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, М.В. Черневич // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : Междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. ; редколл.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2014. – С. 93–95.

3. Обработка резанием : ГОСТ 25762-83 ; Введ. 01.07.84. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 42 с.
4. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машгиз, 1962. – 152 с.
5. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроение, 1972. – 111 с.
6. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Минск : «Наука и техника», 1972. – 272 с.
7. Землянский, В.А. Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами / В.А. Землянский, Б.В. Лупкин. – Киев : Техника, 1980. – 120 с.
8. Кушнер, И.С. Круглые вращающиеся резцы / И.С. Кушнер, В.В. Ледаев // Эффективные режущие и мерительные инструменты. – Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1966. – С. 40–49.
9. Каширин, А.Н. Резание металлов принудительно вращающимся резцом системы Л.М. Ронин и А.Н. Каширин / А.Н. Каширин, Л.М. Ронин. // Изв. АН СССР, ОТН. – 1940. – № 7. – С. 39–46.
10. Рейхель, В. Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала / В. Рейхель // Мировая техника. – 1936. – № 4. – С. 6–14.
11. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
12. Попок, Н.Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимся инструментом : дисс. ... канд. техн. наук / Н.Н. Попок. – Минск, 1983. – 274 л.
13. Новоселов, Ю.А. Оптимизация процесса резания на основе сопоставительного анализа взаимосвязи выходных характеристик / Ю.А. Новоселов, Н.Н. Попок // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1989. – № 5. – С. 149–153.
14. Способ обработки с оптимизацией режимов резания : а. с. В23В1/00 / П.И. Ящерицын, Ю.А. Новоселов, Н.Н.Попок. – Оpubл. 30.10.1985.

Поступила 05.07.2019

KINEMATICS OF PROCESSING SURFACES OF PARTS WITH A ROTATING CUTTING TOOL WITH A TANGENT MOVEMENT OF THE CUTTING EDGE

N. POPOK, V. ANISIMOV

Advantages of machining surfaces of the tool parts with tangential movement of the cutting edge, the results of research of kinematic parameters of the cutting process of planar, cylindrical, and spherical surfaces.

Keywords: *machining, cutting process, rotating cutting tool, tangent movement, angle of inclination of the cutting edge.*