

## Влияние касательного перемещения режущего лезвия на производительность механической обработки

*Рассмотрены кинематические схемы токарной обработки лезвийным инструментом с касательным перемещением режущего лезвия. Показаны методы снижения напряженности процесса резания за счет прерывания и периодизации процесса и касательного перемещения лезвия вдоль зоны контактного взаимодействия. Исследовано влияние кинематического коэффициента и режимов резания на динамические характеристики процесса и свойства формируемых поверхностей. Показано что вращение режущего лезвия обеспечивает снижение температуры в зоне резания, повышение скорости резания в 2-5 раз, а изменение механизмов изнашивания лезвия инструмента при переходе от резания заторможенным лезвием к самовращающемуся позволяет в 3-50 раз повысить его технологическую стойкость.*

**Ключевые слова:** резание; режущий инструмент; кинематика процесса; вращение лезвия; трение скольжения; изнашивание; качество обработки.

**Вступление.** Механика процессов резания определяет производительность и уровень качества обработанных поверхностей и, следовательно, их эксплуатационные свойства. На характер стружкообразования, динамические характеристики процесса, механизмы изнашивания режущего лезвия инструмента существенным образом наряду с особенностями механики процесса влияют свойства инструментального и обрабатываемого материала. В области традиционной механической обработки материалов достаточно глубоко изучены основные явления процесса резания, включая закономерности стружкообразования, динамики процесса, тепловых явлений и формирования свойств обработанных поверхностей. Это дало возможность создать большое число разного вида режущих инструментов для эффективного выполнения самых разнообразных технологических операций. Такие инструменты объединяет то, что в процессе снятия стружки рабочие поверхности режущего лезвия контактируют с материалом обрабатываемой заготовкой по схеме относительного скольжения без проскальзывания. Вдоль задней поверхности скользит обрабатываемая поверхности заготовки, а по передней поверхности сходит отделенная стружка. Скорость относительного скольжения при резании оказывает существенное влияние на энергетические затраты при резании и в значительной мере определяет температуру резания и стойкость инструмента.

**Постановка задач и методология исследования.** В металлообработке предпринимались попытки реализации процессов резания с уменьшенным влиянием скорости относительного скольжения (практически равной скорости резания) на механику процесса. Использовались, например, принципы непрерывного и периодического перемещения лезвия вдоль зоны резания [1–4]. Принцип обновления активной части режущего лезвия для повышения работоспособности инструмента реализован при точении призматической пластинкой, установленной под углом к оси заготовки и перемещающейся в процессе работы посредством кинематической связи с механизмом подачи станка или с помощью дополнительного привода [4]. При высокой жесткости оборудования для автоматического замещения изношенного участка режущей кромки широкие резцы с прямолинейной режущей кромкой, расположенной под углом к оси обрабатываемой детали. Перемещающая такую призматическую пластину, систематически заменяют изношенный участок лезвия. При перемещении резца после каждого прохода на величину, превышающую активную длину режущей кромки, периодически восстанавливается ее работоспособность.

Принципы периодического (шагового) перемещения режущих лезвий с круговой режущей кромкой реализованы в токарных инструментах для обработки малогабаритных роторов электродвигателей [5], разработках ВНИИ [5,6], Ю.Д. Лигского [7]. Множество конструкций шаговых резцов предложено Л.П. Поздняковым и Г.Ф. Шатуровым [8]. В них реализована схема полной или частичной замены изношенного участка режущей кромки, и новый участок лезвия обеспечивает (формирует) качественные показатели обработанной поверхности. Другое направление снижения напряженности процесса резания реализовано при косоугольном (брюющем) точении, которое нашло применение при механической обработке валов из труднообрабатываемых и вязких материалов с обеспечением достаточно высоких параметров шероховатости [1–8]. При косоугольном резании режущая кромка инструмента имеет значительный угол наклона между нормалью к режущей кромке и вектором скорости резания. При этом такой угол может обеспечиваться заточкой или установкой главной режущей кромки под углом или дополнительным движением режущей кромки инструмента вдоль самой за счет кинематики наладки или станка.

Одним из перспективных подходов к конструированию режущих инструментов является уменьшение скорости относительного скольжения в контактных зонах при взаимодействии их рабочих поверхностей с обрабатываемым материалом путем непрерывного касательного перемещения лезвия в зоне резания. Это обеспечивает замену доли трения скольжения в контактной зоне на трение качения.

Л.М. Нарьер предложил режущий инструмент с круговой режущей кромкой лезвия, установленного с возможностью вращения в процессе резания и запатентовал его в 1868 г. [9]. Основное назначение своего изобретения Нарьер видел в возможности обработки материалов различной твердости (преимущественно дерева) путем регулирования скорости самовращения или принудительного вращения резца. Им предложен ряд способов регулирования угла наклона режущего лезвия, схемы привода его вращения. Некоторые из них приведены на рис. 1. Однако информации о реализации данного инструмента отыскать не удалось.

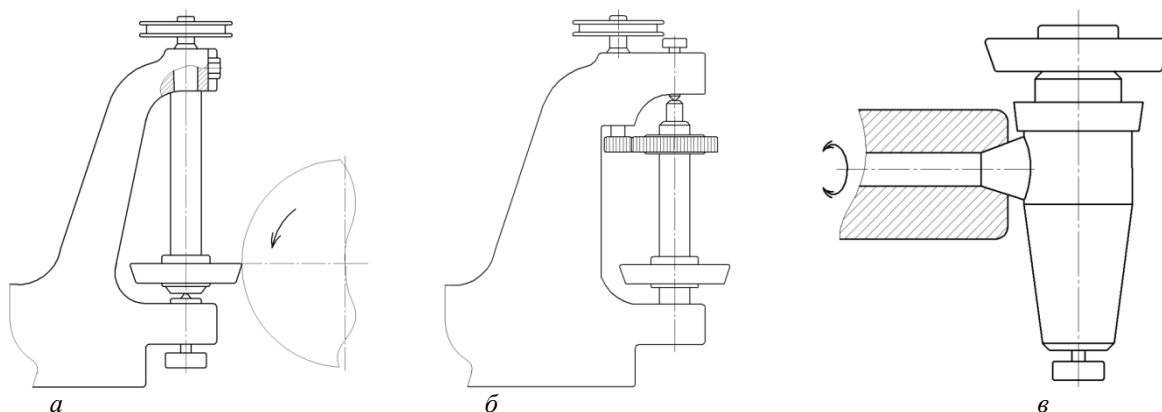


Рис. 1. Схемы вращающихся резцов Нарьер:

*а – самовращающийся, б – с приводом, в – с регулированием угла наклона режущей чашки*

Идеи Нарьер воспроизвели в Германии в 1901 г. в виде чашечного резца, плоскость режущей кромки которого установлена на уровне центров станка и приводится во вращение посредством кинематической связи с ходовым винтом станка. В СССР начало работ по ротационному резанию относится к концу 20-х годов прошлого века. Резцы имели трубчатую форму, и по сравнению с неподвижным резцом позволяли увеличить скорость и снизить мощность резания. Однако все преимущества вращающегося резца были возможны только при небольшой глубине резания. Б. Ф. Петропавловский в 1938 г. предложил конструкцию сборного многолезвийного ротационного резца для токарных и строгальных работ, позволившего работать с повышенными режимами резания и стойкостью инструмента. Нестабильность вращения круглых резцов послужила толчком к созданию резцов с принудительным вращением, например, конструкции А.И. Каширина и Л.М. Ронина [11]. Испытания показали его преимущества в отношении производительности и качества обработки.

Отличие механики процесса, стружкообразования, теплофизики и динамики ротационного резания от традиционных методов механической обработки потребовало глубокого их исследования. Комплексные теоретические и экспериментальные работы по исследованию процессов ротационного резания выполнены в ФТИ под руководством академика АН БССР Е.Г. Коновалова [12,13]. Значительный вклад в исследования метода внесли работы ВНИИ, ХАИ и др. [14–16] Зарубежный опыт исследований метода ротационного резания также значителен.

Особенности взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом при ротационном резании оказывают существенное влияние на стружкообразование, динамику процесса, изменяют картину протекания тепловых явлений в зоне резания и технологической системе в целом. При ротационном резании относительное скольжение в контакте рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом заменяется на качение с долей проскальзывания. Доля проскальзывания характеризует степень реализации основного принципа ротационного резания в конкретном инструменте и определяется кинематическим коэффициентом  $K$ , равным отношению линейных скоростей резца  $v_p$  и детали  $v_d$  при резании:  $K = v_p / v_d$ . Для точения  $v_d$  равно скорости главного движения резания.

Взаимное качение двух тел возможно, если хотя бы одно из них является телом вращения. Так как обрабатываемые детали могут иметь различную форму и нецелесообразно ограничивать применение нового процесса, форма тела вращения придается режущему лезвию инструмента. Таким образом, переход к ротационному резанию предполагает относительное перемещение режущего лезвия в касательном направлении, а в самом простом случае режущая часть инструмента имеет круговую режущую кромку. Тогда касательное перемещение означает вращение ее вокруг собственной оси.

Выполненные в ФТИ исследования и проектно-конструкторские разработки позволили создать различные конструкции ротационных инструментов, причем значительная их часть выполнена на уровне изобретений. Выявлены перспективные области применения таких инструментов в химической промышленности - обработка стеклопластиков, нержавеющей стали и жаропрочных сплавов; в бумагоделательной - изготовление и ремонт валов суперкаландров, обработка ножей гарнитуры дисковых и конических мельниц; в автомобильной промышленности - обработка отбеленных чугунов, деталей в условиях прерывистого резания, упрочненных износостойкими покрытиями и др. Учитывая высокую эффективность ротационных инструментов, совершенствование оборудования в части применения повышенных скоростей резания они будут все более востребованы в арсенале технологии металлообработки.

В процессе исследований метода в различных конструкциях ротационных резцов использовались ряд типоразмеров круглых режущих лезвий, некоторые из которых приведены на рис. 2.



Рис. 2. Формы твердосплавных пластин, применяемые для оснащения ротационных резцов

Динамика процесса исследовалась с применением динамометров УДМ600 и УДМ100 конструкции ВНИИ и специального однокомпонентного динамометра с пьезокерамическим датчиком при оценке импульсных процессов при прерывистом точении. Оценку кинематического коэффициента выполняли с применением малогабаритного тахогенератора и осциллографа, а также электронного частотомера. Исследования выполнены при точении стали 45 НВ200 и стали 40Х 46...48НRC на станке 16К20П. Резцы оснащались твердосплавной пластиной формы 12050 и устройством для регулирования момента трения в опорах. При оценке влияния трения в опорах на кинематический коэффициент применялись специальные регулируемые тормозные колодки, закрепляемые на хвостовике шпинделя резца. Качество обработанной поверхности оценивалось по параметру шероховатости  $R_a$ . В пределах угла контакта лезвия с заготовкой (вдоль поверхности резания), несомненно, значения кинематических углов и контактные явления изменяются. В практике расчетов кинематического коэффициента такими изменениями пренебрегают ввиду их небольшого влияния на общую картину.

В процессе ротационного резания происходит непрерывная смена контактных поверхностей не только детали, но и непрерывно обновляется активный участок режущего лезвия, а любой элементарный участок режущей кромки лезвия периодически участвует в снятии стружки и формировании микрорельефа обработанной поверхности. Известно, что при периодическом прерывании процесса резания улучшаются условия работы режущих инструментов: снижаются контактные нагрузки, увеличивается теплоотвод из зоны резания, снижается сила резания [17]. В процессе ротационного резания сочетаются два эффективных способа повышения производительности обработки резанием: снижение относительного скольжения в контакте инструмента с деталью и периодизация процесса резания элементарным участком режущего лезвия без прерывания этого процесса. Это представляет значительный резерв для повышения эффективности обработки резанием.

Различают две геометрические схемы ротационного резания, отличающиеся функциями, которые выполняют торец и боковая поверхность режущей чашки [13,17]. Общепринято, что при первой геометрической схеме торец чашки выполняет функции передней поверхности, а боковая часть - соответственно задней поверхности лезвия инструмента. При противоположном выполнении функций торцом и боковой поверхностью чашки имеет место вторая геометрическая схема ротационного резания. При различных схемах резания ротационный инструмент определенным образом устанавливается относительно обрабатываемой поверхности. В общем случае ось резца имеет два угла наклона

относительно координатных осей станка или заготовки (считаем, что плоскость режущей кромки всегда перпендикулярна оси вращения резца).

Схемы ротационного резания применительно к точению показаны на рис. 3. Варианты установки ротационного инструмента по первой геометрической схеме показаны на рис. 3 а-в. При установке по схеме, представленной на рис. 1а, плоскость режущей кромки и вершина резца соответственно располагаются на уровне оси центров станка. Вращение инструмента осуществляется, как правило, принудительно. Наклон оси резца относительно направления подачи обеспечивает его самовращение при обработке. В зависимости от направления поворота различают прямую и обратную схемы установки ротационного инструмента. Принято, что при прямой схеме поворот оси осуществляется в направлении, совпадающем с направлением вектора подачи (рис. 3 б). Ротационный резец, ось которого наклонена противоположно вектору подачи, считается установленным по обратной схеме (рис. 3 в). Первая геометрическая схема может быть использована для точения наружных поверхностей, включая торцы и в процессах фрезерования.

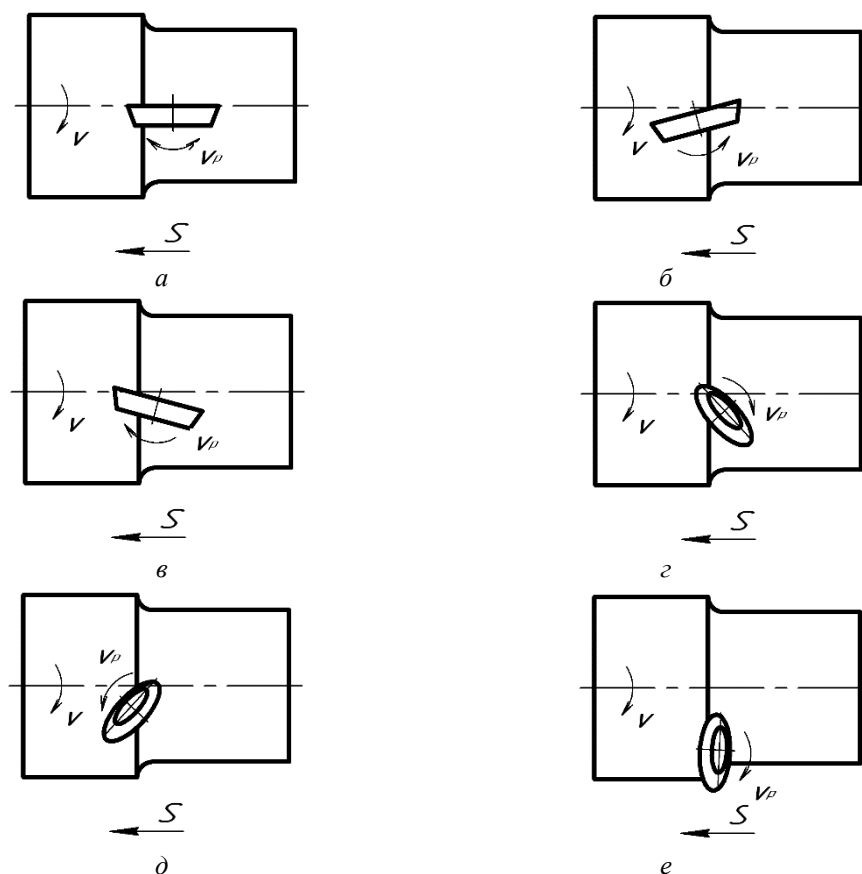


Рис. 3. Схемы установки ротационного резца при точении

Существенным недостатком первой схемы ротационного резания является ограничение размеров шпиндельного узла инструмента диаметром режущей чашки и высотой центров станков токарной группы традиционной компоновки. Это затрудняет создание надежного жесткого резцового узла. В 70-е были созданы токарные автоматы для обработки роторов и статоров электрических машин с обратным вращением шпинделя и расположением шпиндельного узла ротационного инструмента соответственно выше линии центров станка. Это позволило снять ограничение на осевые размеры инструмента. До настоящего времени именно на таком оборудовании обрабатывается основная масса магнитопроводов электродвигателей общепромышленного применения.

Вторая геометрическая схема ротационного резания получила наибольшее распространение. Такая схема установки отличается наклоном оси резца под двумя углами относительно координатных осей станка: углом разворота оси резца относительно вектора подачи и углом наклона плоскости режущей кромки относительно вектора главного движения. Функции передней поверхности инструмента выполняет при этом боковая поверхность чашки, а функции задней — торец чашки. Вершина резца располагается на уровне линии центров станка. Часть режущей кромки находится при этом выше линии центров. Как и для первой геометрической схемы ротационного резания, для второй схемы также имеет место прямая (рис. 3 г) и обратная (рис. 3 д) схемы установки.

В Физико-техническом институте разработана одноповоротная вторая геометрическая схема ротационного резания [17] отличающаяся только одним углом разворота оси резца (угла  $\varphi$  относительно вектора подачи). Установка инструмента в рабочее положение осуществляется плоскопараллельным смещением повернутого на угол  $\varphi$  резца на величину  $H$ , обеспечивающую значение угла  $\omega$  между вектором главного движения  $v$  и плоскостью режущей кромки в нормальном сечении детали, проходящем через вершину резца. Такая схема установки ротационного резца показана на рис. 4.

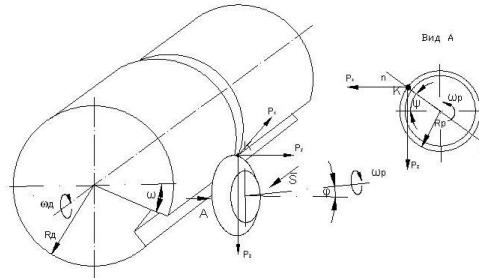


Рис. 4. Ротационный резец при точении по второй одноповоротной прямой схеме

По аналогии с прямой одноповоротной схемой ротационного резания работает инструмент по методу отслаивания. Вершина круглого резца при этом расположена на уровне оси вращения заготовки, а угол разворота оси  $\varphi$  имеет небольшие значения ( $\varphi < 10^\circ$ ). Обработка таким инструментом применяется чаще на обдирочных операциях на жестком оборудовании с вертикальной компоновкой и мощным приводом. Вращение режущей части инструмента осуществляется принудительно с небольшой частотой вращения.

Описанные схемы ротационного резания используются как в самовращающихся, так и в принудительно вращающихся инструментах. В качестве приводов используются электро-, пневмо- и гидромоторы, а также кинематическая связь с приводами главного движения или движения подачи. Первая геометрическая схема ротационного резания отличается от второй меньшим радиусом кривизны проекции активного участка режущей кромки на основную плоскость и, следовательно, меньшим поперечным сечением среза, а поэтому допускает проведение обработки изделий с большими глубинами резания. Условной вершиной ротационного резца считается точка соприкосновения круговой режущей кромки с обработанной поверхностью. При работе ротационного резца по прямой схеме резания его вершина располагается выше конечной точки контакта и угол наклона режущей кромки отрицательный. В этом случае вращающаяся режущая кромка врезается в обрабатываемый материал со стороны обработанной поверхности и выходит из работы в сторону необработанной поверхности изделия, обеспечивая выход образующейся при резании стружки с передней поверхности ротационного резца в сторону необработанной поверхности. Таким образом, при резании по прямой схеме обработанная поверхность не повреждается сходящей стружкой. У ротационного резца, установленного по обратной схеме резания, условная вершина расположена ниже конечной точки контакта и угол наклона режущей кромки положительный. При этом режущая кромка врезается в изделие со стороны необработанной поверхности, направляя образующуюся при резании стружку в сторону обработанной поверхности.

Вторая геометрическая схема ротационного резания по сравнению с первой имеет следующие преимущества: устойчивое самовращение режущей чашки инструмента в широких диапазонах значений углов его установки; возможность применения достаточно жестких и с большой несущей способностью подшипниковых узлов; оснащения ими станков различных групп - токарных, расточных, фрезерных, строгальных, шлифовальных, в том числе многолезвийным и комбинированным инструментом; получение более высокого качества обработанной поверхности; допускается обработка с большими значениями подачами благодаря большому радиусу кривизны следов кругового режущего лезвия на обработанной поверхности; меньший износ режущей чашки и сокращение расхода инструментального материала; большее число допустимых переточек режущей чашки (до 25—30 раз) без ухудшения работоспособности ротационного режущего инструмента; более удачное направление силы резания относительно направляющих станка; удобная установка и присоединение к хвостовику шпинделя различных приводов для принудительного вращения режущей чашки, подсоединение виброгасителей различных типов; более рациональное направление схода стружки.

**Результаты экспериментов.** Оценка влияния скорости касательного перемещения режущего лезвия, характеризуемого кинематическим коэффициентом, на эффективность процесса резания выполнена при точении стали 45 НВ200 и стали 40Х 46...48НРС на станке 16К20П. Резец оснащался твердосплавной пластиной формы 12050 Т15К6. Схема установки – вторая одноповоротная. Углы установки варьировались в пределах  $\varphi=10-80^\circ$ ,  $\omega=15-50$ . Углы заточки лезвия: передний  $\gamma - 20-35$ , задний  $\alpha - 10-25$ .

На рисунках 5–7 приведены некоторые результаты экспериментов и полученные зависимости.

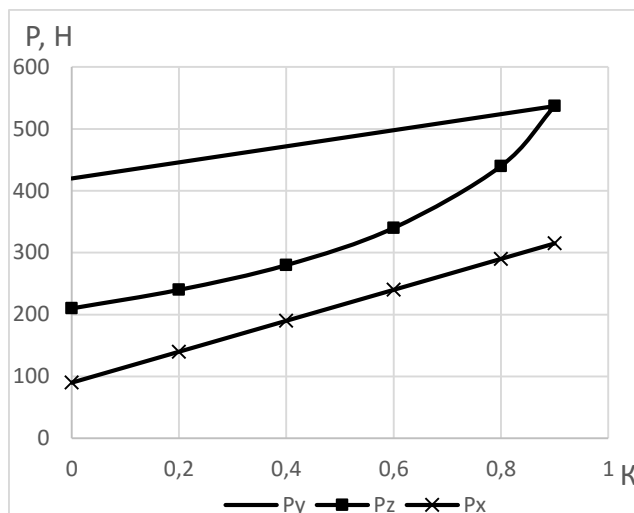


Рис. 5. Зависимость силы резания от кинематического коэффициента ротационного реза ( $V = 6,8$  м/с,  $t = 0,2$  мм,  $D_p = 45,8$  мм).

Данные приведены для второй одноповоротной прямой схемы резания. Составляющие  $P_y$  и  $P_x$  растут с увеличением значения кинематического коэффициента. Более выраженное влияние оказывает увеличение  $K$  на главную составляющую силы резания  $P_z$ , однако в пределах значений  $K$  0,4–0,7 рост  $P_z$  плавный.

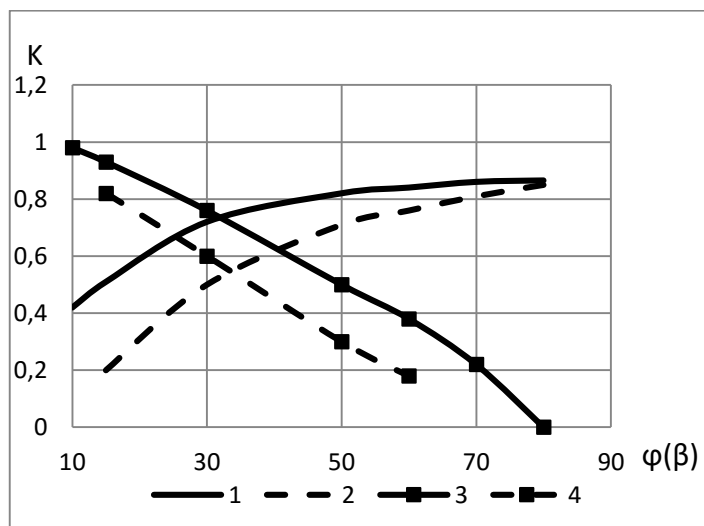


Рис. 6. Зависимость кинематического коэффициента ротационного реза от углов установки ( $1,2-\phi$ ;  $3,4-\beta$ ; сплошные линии – прямая схема, штриховые- обратная)

Для прямой и обратной схем ротационного резания увеличение значений углов установки  $\phi$  и  $\beta$  вызывает противоположное изменение кинематического коэффициента.

Увеличение  $\beta$  до 40-50 градусов вызывает почти монотонное снижение значения  $K$  и приводит к полной остановке реза при значениях  $\beta$  более 65-70°. Влияние  $\phi$  менее заметно и в пределах 25–50 градусов ведет к плавному росту кинематического коэффициента. В этих пределах отмечается наиболее стабильное самовращение реза. Из разных источников следует, что такой диапазон значений  $\phi$  технически и технологически приемлем при точении и фрезеровании ротационным инструментом.

Из выполненных исследований следует, что скорость резания не является определяющим показателем динамики процесса. Значительный рост угла контакта режущего лезвия с обрабатываемым материалом с увеличением глубины резания вызывает рост значений радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и потому ротационные резы при точении наиболее применимы при чистовых операциях с режимами  $t = 0,05-1$  мм. Подача не накладывает таких ограничений и даже на чистовых операциях величина  $S = 0,1-0,3$  мм/об обеспечивает значение параметра шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности 0,8–1,6 мкм

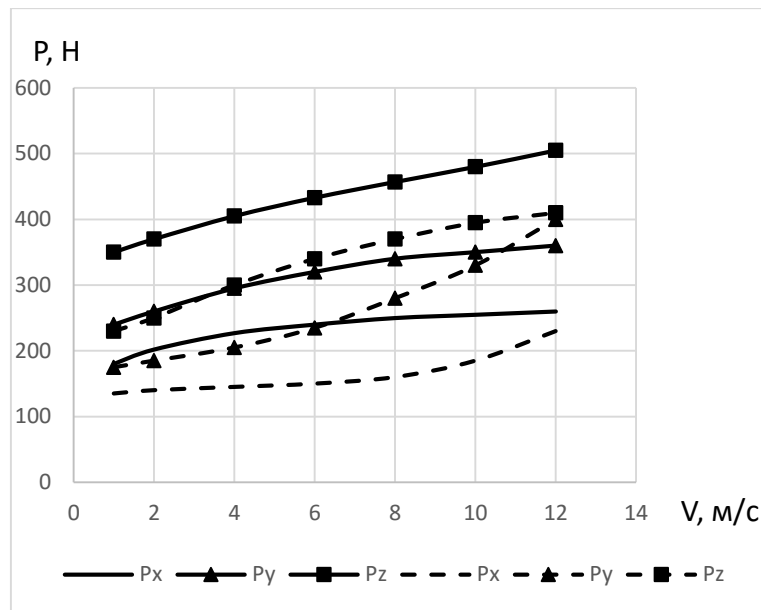


Рис. 7. Залежність складових сил різання від швидкості різання при точенні ротаційним різцем сталі 45 HB200 ( $S=0,28$  мм/об,  $t=0,2$  мм,  $D_p=45,5$  мм)

**Обсуждение результатов.** Стабільність значення кінематического коефіцієнта вздовж поверхності різання забезпечується рівномірністю вращения ротаційного різця. Такі умови роботи різця, а значить і стабільність показателів якості обробленої поверхності забезпечуються вибором кутів його установки. С збільшенням кута  $\phi$  величина кінематического коефіцієнта росте для другої прямої і зворотної схеми ротаційного різання. С збільшенням значення  $\phi$  більше  $45^\circ$  рост  $K$  зменшується.

Зміна кута установки  $\beta$  ( $\omega$  для другої одноповоротної схеми – рис.4) викликає майже монотонне зниження значення  $K$  і приводить до повної зупинки різця при значеннях  $\beta$  більше  $65-70^\circ$ .

Із режимів різання найбільше впливає на кінематический коефіцієнт оказує глибина різання. Дане обставина викликане значительним ростом радіальної складової сили різання с збільшенням глибини різання. Збільшення подачі інструмента для другої прямої і зворотної схеми ротаційного різання приводить до росту  $K$ , але це збільшення складає 7-18% с зміною подачі від 0,1 мм/об до 1 мм/об. Швидкість головного руху різання при точенні ротаційним різцем на технічно прийнятних її значеннях (2-12 м/с) і оптимальних значеннях кутів установки незначительно впливає на значення  $K$ .

**Висновок.** Мікрорельєф і фізико-механічні показателі оброблених ротаційним різцем поверхностей залежать від рівномірності вращения ротаційного різця і забезпечуються стабільністю значень кінематического коефіцієнта вздовж поверхності різання. Така стабільність досягається вибором кутів установки різця.

Касательне переміщення режущого лезвія вздовж зони різання забезпечує його кінематическе заострення, зниження динамічної і теплової напруженності процесу різання, що являється ключем до підвищення продуктивності обробки і стійкості режущого лезвийного інструмента.

#### Список использованной литературы:

1. Андреев Г.С. Работоспособность режущего инструмента при прерывистом резании / Г.С. Андреев // Вестник машиностроения. – 1973. – № 5. – С. 72–75.
2. Подураев В.Н. Стойкость инструмента при прерывистом резании / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев // Станки и инструмент. – 1969. – № 10. – С. 25–28.
3. Панкин А.В. // Станки и инструмент. – 1936. – № 1. – С. 3–8.
4. Рывкин Г.М. Чистовое точение резцами с перемещаемой режущей кромкой / Г.М. Рывкин, В.И. Самойлов // Станки и инструмент. – 1952. – № 4. – С. 20–22.
5. Рывкин Г.М. Инструментальная оснастка для автоматизированного производства / Г.М. Рывкин. – М., 1962.
6. Локтев А.Д. Инструменты, оснащенные пластинками с круговой режущей кромкой / А.Д. Локтев. – М., 1962. – С. 2–60.
7. Лигский Ю.Д. Круглый поворотный резец для чистового точения : а. с. 107394 ; кл. 49а, 3301 / Ю.Д. Лигский. – СССР, 1953.
8. Шатуров Г.Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г.Ф. Шатуров, Ж.А. Мрочек. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 460 с.

9. Pat. 166. Working Wood and Metal / J.M. Napier. – Great Britain, 1868.
10. *Игнат'ев А.М.* Трубчатый токарный резец : а. с. 42477 / А.М. Игнат'ев. – СССР, 1935.
11. *Каширин А.И.* Резание металлов принудительно вращающимся резцом системы Л.М. Ронина и А.И. Каширина / А.И. Каширин, Л.М. Ронин // Изв. АН СССР. – 1940. – № 7. – С. 38–46.
12. *Коновалов Е.Г.* Резание автообкатывающим резцом / Е.Г. Коновалов, И.Л. Тараканов // ДАН БССР. – 1966. – № 11.
13. *Коновалов Е.Г.* Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Мн. : Наука и техника, 1972. – 272 с.
14. *Землянский В.А.* Кинематика резания и стойкость круглых самовращающихся резцов / В.А. Землянский // Вестник машиностроения. – 1968. – № 6. – С. 70–73.
15. *Землянский В.А.* Возможности управления качеством поверхности при ротационном резании / В.А. Землянский, В.В. Пахучий // Резание и инструмент. – 1972. – Вып. 8. – С. 36–41.
16. *Бобров В.Ф.* Кинематика резания чашечными резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский // Вестник машиностроения. – 1969. – № 6. – С. 65–66.
17. Ротационное резание материалов / П.И. Яцерицын, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин, В.Я. Лебедев. – Мн. : Наука и техника, 1987. – 229 с.

#### References:

1. Andreev, G.S. (1973), «Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta pri preryvistom rezanii», *Vestnik mashinostroenija*, No. 5, pp. 72–75.
2. Poduraev, V.N. and Jaroslavcev, V.M. (1969), «Stojkost' instrumenta pri preryvistom rezanii», *Stanki i instrument*, No. 10, pp. 25–28.
3. Pankin, A.V. (1936), *Stanki i instrument*, No. 1, pp. 3–8.
4. Ryvkin, G.M. and Samojlov, V.I. (1952), «Chistovoe tochenie rezcami s peremeshhaemoj rezhushhej kromkoj», *Stanki i instrument*, No. 4, pp. 20–22.
5. Ryvkin, G.M. (1962), *Instrumental'naja osnastka dlja avtomatizirovannogo proizvodstva*, Moskva, 1962.
6. Loktev, A.D. (1962), *Instrumenty, osnashhennye plastinkami s krugovoj rezhushhej kromkoj*, Moskva, pp. 2–60.
7. Ligsikij, Ju.D. (1953), *Kruglyj povorotnyj rezec dlja chistovogo tochenija* [Round rotary cutter for fine turning], avtorskoe svidetel'stvo 107394, klass 49a, 3301, SSSR.
8. Shaturov, G.F. and Mrochek, Zh.A. (2001), *Progressivnye processy mehanicheskoy obrabotki poverhnostej*, UP «Tehnoprint», Minsk, 460 p.
9. Napier, J.M. (1868), *Working Wood and Metal*, Great Britain, Pat. 166.
10. Ignat'ev, A.M. (1935), *Trubchatyj tokarnyj rezec* [Tubular turning], avtorskoe svidetel'stvo 42477, SSSR.
11. Kashirin, A.I. and Ronin, L.M. (1940), «Rezanie metallov prinuditel'no vrashhajushhimsja rezcami sistemy L.M. Ronina i A.I. Kashirina», *Izv. AN SSSR*, No. 7, pp. 38–46.
12. Konovalov, E.G. and Tarakanov, I.L. (1966), «Rezanie avtoobkatyvajushhim rezcami», *DAN BSSR*, No. 11.
13. Konovalov, E.G., Sidorenko, V.A. and Sous', A.V. (1972), *Progressivnye shemy rotacionnogo rezanija metallov*, Nauka i tehnika, Minsk, 272 p.
14. Zemljanskij, V.A. (1968), «Kinematika rezanija i stojkost' kruglyh samovrashhajushhimsja rezcov», *Vestnik mashinostroenija*, No. 6, pp. 70–73.
15. Zemljanskij, V.A. and Pahuchij, V.V. (1972), «Vozможности upravlenija kachestvom poverhnosti pri rotacionnom rezanii», *Rezanie i instrument*, Vol. 8, pp. 36–41.
16. Bobrov, V.F. and Ierusalimskij, D.E. (1969), «Kinematika rezanija chashechnymi rezcami», *Vestnik mashinostroenija*, No. 6, pp. 65–66.
17. Jashhericyn, P.I., Borisenko, A.V., Drivotin, I.G. and Lebedev, V.Ja. (1987), *Rotacionnoe rezanie materialov*, Nauka i tehnika, Minsk, 229 p.

**Лебедев Владимир Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «ФТИ НАН Беларуси».

Научные интересы:

- процессы резания алмазно-абразивным и лезвийным инструментом;
- магнитно-абразивная обработка;
- контактное взаимодействие, изнашивание и испытание инструментов.

E-mail: fti\_lebedev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.09.2017.