



Ломакин
Андрей Васильевич
аспирант кафедры
«Инструментальная
техника и технологии»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Кинематика процесса качающегося прошивания

А.В. Ломакин

Предлагается способ снижения осевого усилия прошивания при обработке гранных отверстий путем выведения из зоны резания части режущей кромки. Это обеспечивается приданием инструменту качательного движения. Рассмотрена кинематика процесса качающегося прошивания, установлены расчетные зависимости, позволяющие определить ограничения на основные технологические параметры.

Ключевые слова: гранные отверстия, качающееся прошивание.

The article considers the method to reduce the axial broaching force when machining polygonal holes by withdrawal of a part of the cutting edge from the cutting zone. That is ensured by providing an additional broach rotary movement. The article describes kinematics of the rotary broaching process, establishes design relations allowing to determine restrictions on main technological parameters.

Keywords: polygonal holes, rotary broaching.

Для реализации метода прошивания гранных отверстий на станках токарной, фрезерной и сверлильной групп может быть использован метод качающегося прошивания (КП) [1]. При применении данного метода снижение осевого усилия обработки обеспечивается уменьшением суммарной длины одновременно работающих кромок, что основано на изменении кинематики формообразования. Это требует введения дополнительных движений. При традиционном методе прошивания ось инструмента совпадает с осью отверстия. Для уменьшения активной длины режущей кромки предлагается наклонить ось прошивки относительно оси обрабатываемого отверстия, при этом часть периметра режущей кромки выйдет из контакта с заготовкой. Для обработки всего периметра отверстия необходимо, чтобы прошивка «обошла» весь контур обрабатываемой детали. С этой целью инструменту придают круговое качательное движение (рис. 1) [1].

Поскольку прошивка совершает качательное движение вокруг точки пересечения осей инструмента и отверстия, за каждый оборот прошивки каждая точка режущей кромки инструмента совершает возвратно-поступательное движение. Движение точек инструмента вниз является рабочим ходом, вверх — холостым ходом (рис. 1). Контакт инструмента и обрабатываемой детали происходит на части периметра режущей кромки, которая является ее активной длиной. Длина активного участка режущей кромки будет зависеть от угла наклона прошивки и величины ее осевой подачи.

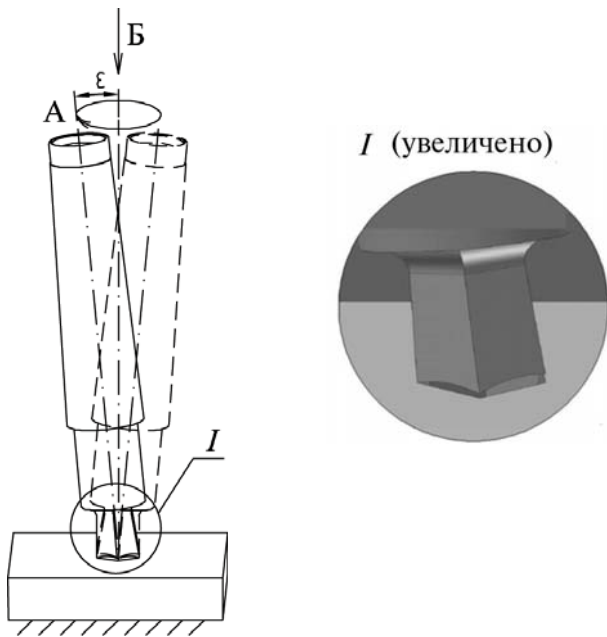


Рис. 1. Прошивание гранных отверстий методом качающейся прошивки

При обработке гранных отверстий методом КП ось инструмента описывает конус вокруг оси обрабатываемого отверстия. Вершина конуса находится в точке пересечения осей инструмента и оси обрабатываемого гранного отверстия, при этом она перемещается равномерно и прямолинейно вдоль оси отверстия (рис. 1, движение Б). Угол при вершине описываемого конуса равен 2ε . Движение А — пространственное равномерное вращательное движение оси I качающейся прошивки вокруг оси обрабатываемого отверстия z.

Разложим пространственное вращательное движение А на два простых (плоских) вращательных движения. Имеем два равномерных вращательных движения В и Г (рис. 2) и одно равномерное прямолинейное движение Б. Движения В и Г разнонаправленные и имеют одинаковую угловую скорость ω .

Анализируя принципиальную кинематическую схему, можно предложить второй вариант реализации метода КП — разложением качательного движения на два вращательных движения (рис. 3). Если в первом случае заготовка неподвижна и качающаяся прошивка совершает сложное пространственное движение, то во втором варианте заготовка и инструмент вращаются вокруг своих осей с одинаковой угло-

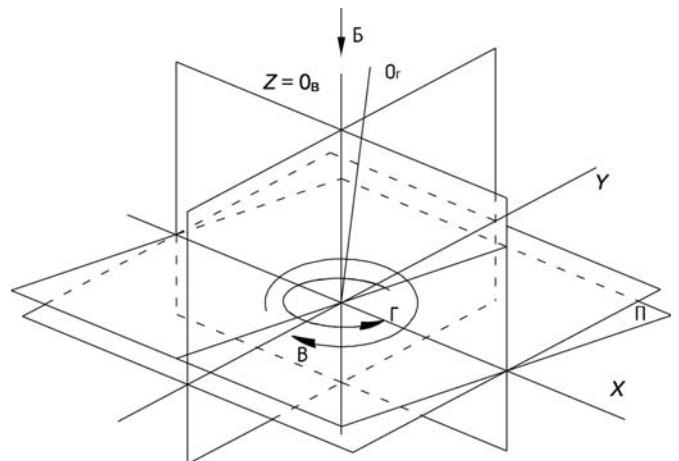


Рис. 2. Кинематические схемы процесса качающегося прошивания

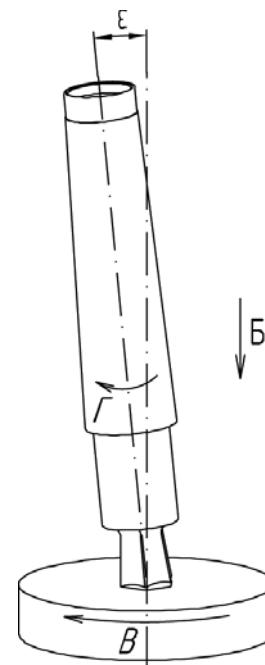


Рис. 3. Схема реализации метода КП разложением качательного движения на два вращательных движения

вой скоростью (рис. 3, движения В и Г соответственно). Качающаяся прошивка наклонена на угол качания ε и перемещается вертикально вниз вдоль оси отверстия (рис. 3, движение Б), не меняя угла наклона оси (в наклоненном положении). Данную схему технически реализовать проще, так как все составляющие совершают плоские движения.

Для определения скорости резания вернемся к первой схеме, когда ось прошивки описы-

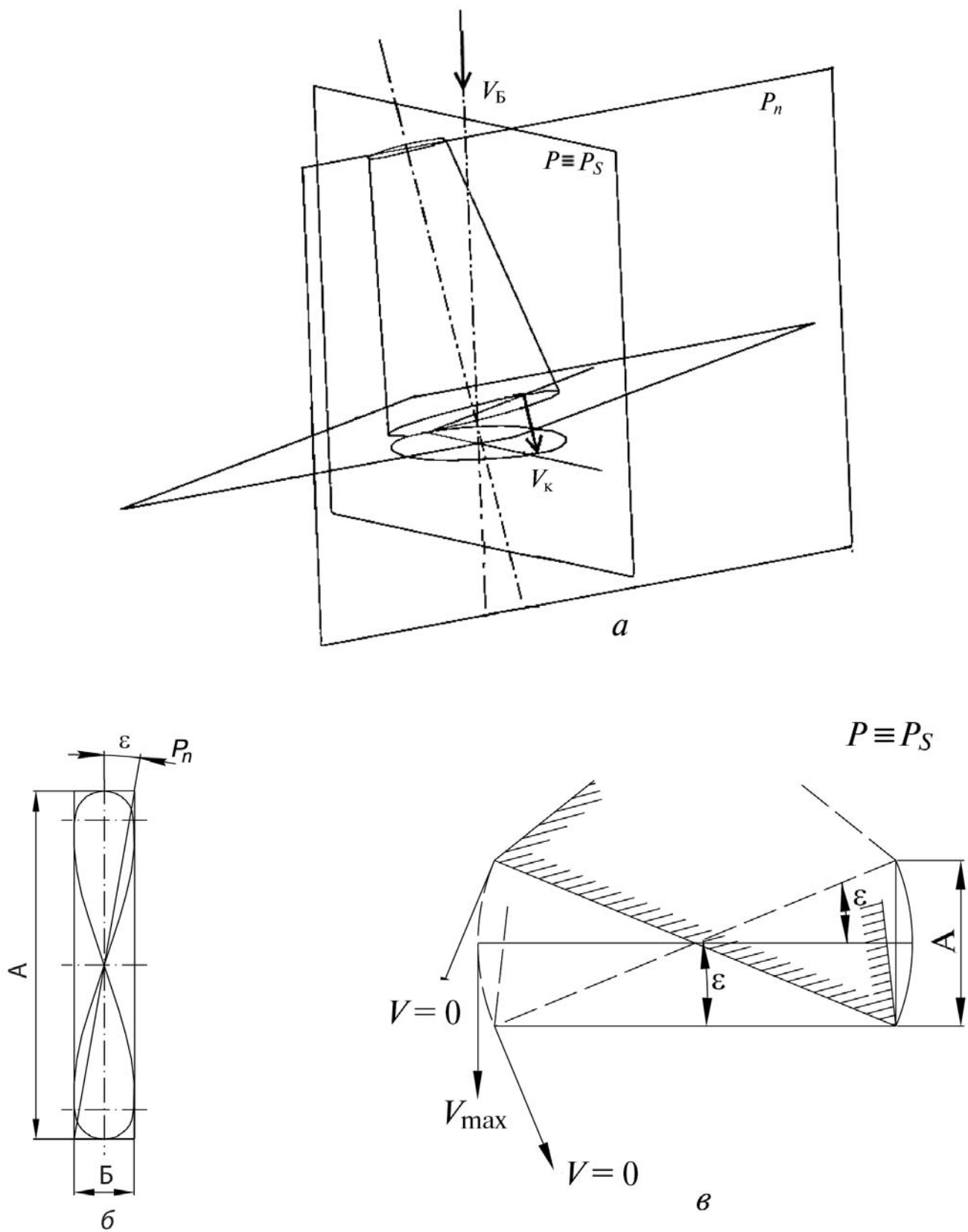


Рис. 4. Расположение основных плоскостей и углов при методе КП:

a — расположение проекционных плоскостей при методе КП; $б$ — траектория движения вершины инструмента в плоскости P_n ; $в$ — траектория движения вершины инструмента в плоскости P

вает конус (см. рис. 1). Проанализируем движение произвольной точки режущего лезвия инструмента. Поскольку качание прошивки происходит без проскальзывания, то каждая точка режущего лезвия инструмента взаимодействует (контактирует) только с точками одной образующей обрабатываемого отверстия, что приводит к копированию профиля качающейся прошивки на заготовку. Рассмотрим одно полное качание прошивки без осевого перемещения, т. е. когда ось инструмента опишет один полный конус. Соответственно, выбранная точка лезвия инструмента совершит одно качательное движение вокруг точки пересечения осей инструмента и заготовки.

Введем проекционные плоскости. Плоскость P — плоскость, образованная пересекающимися осями инструмента и отверстия; плоскость P_n — плоскость перпендикулярная плоскости P , параллельная оси обрабатываемого отверстия и проходящая через точку заготовки, обрабатываемую выбранной точкой лезвия качающейся прошивки (рис. 4, а).

При отсутствии перемещения инструмента вдоль оси обрабатываемого отверстия в проекции на плоскость P_n траектория движения точек лезвия инструмента представляет собой «восьмерку», лежащую на части сферы, описываемой выбранной точкой (рис. 4, б). В проекции на плоскость P выбранная точка лезвия

инструмента совершает колебательное движение по дуге окружности с центром в точке пересечения осей заготовки и прошивки по гармоническому закону (рис. 4, в).

Определим направления скоростей при обработке гранных отверстий методом КП. Скорость качательного движения выбранной точки лезвия инструмента V_k всегда находится в плоскости P и направлена по касательной к описываемой дуге. Скорость V_k принимает нулевое значение в крайних точках траектории и максимальное значение — в средней точке траектории, когда плоскость вершин инструмента занимает горизонтальное положение, а скорость имеет вертикальное направление. Также всегда вертикально вниз направлена скорость перемещения всей прошивки вдоль оси обрабатываемого отверстия — V_b .

Рассмотрим эпюру изменения суммарной вертикальной скорости перемещения выбранной точки лезвия качающейся прошивки (рис. 5). Соотношение значений скоростей V_k и V_b влияет на определение понятия скорости резания для КП и на величину активной длины режущей кромки. Так как скорость не постоянна, а изменяется от нуля до своего максимального значения, то будем сравнивать $V_{k \max}$ и V_b . Если $V_{k \max} > V_b$, то, согласно определению по ГОСТ 25762—83 [2], V_k — скорость резания при качающемся прошивании, V_b — скорость подачи.

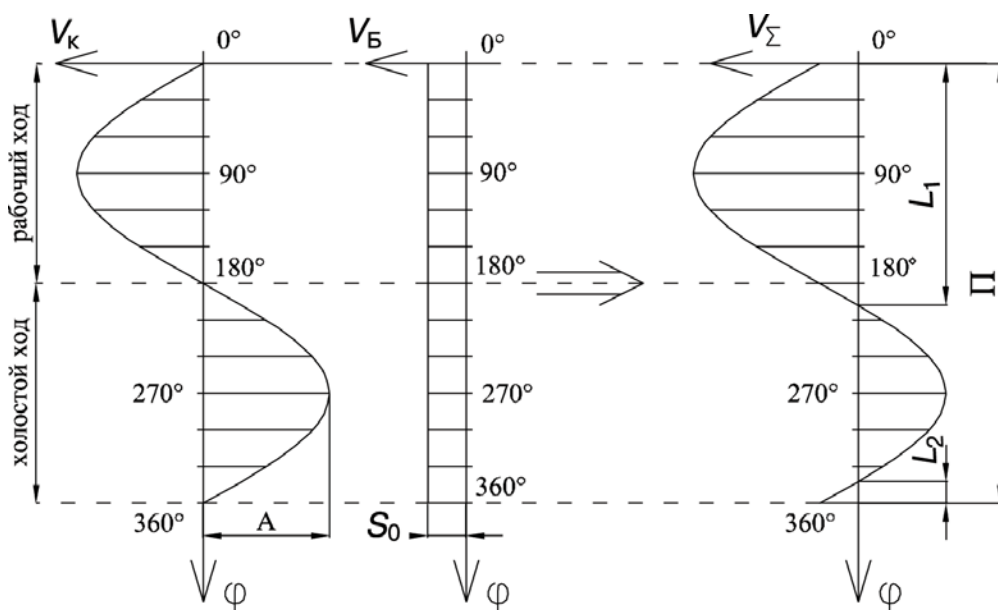


Рис. 5. Эпюра вертикальных скоростей перемещения точек лезвия качающейся прошивки

В противном случае, если $V_{кmax} < V_B$, то V_B является скоростью резания и процесс качающегося прошивания превращается в традиционное прошивание, а скорость V_k будет скоростью вспомогательного движения.

При $V_{кmax} > V_B$ может существовать участок эпюры, (рис. 5), который находится в «отрицательной» зоне. Это означает существование участка режущей кромки, который в данный момент времени не принимает участия в резании. Иными словами, активная длина режущей кромки меньше периметра всей режущей кромки.

Длину активной режущей части $L_{акт}$ можно рассчитать из эпюры. Так как за один рассматриваемый оборот качающаяся прошивка «обходит» весь периметр обрабатываемого отверстия, то за период колебаний путь, пройденный инструментом, равен периметру обрабатываемого отверстия P . Тогда активная длина режущей кромки равна сумме длин участков L_1 и L_2 , т. е. $L_{акт} = L_1 + L_2$.

Из уравнения гармонических колебаний $X = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$, дифференцируя данное уравнение, получаем уравнение для скорости резания:

$$V = 2\pi n d \sin(\varepsilon) \cos(2\pi n t), \frac{M}{c},$$

где d — диаметр окружности, описанной вокруг инструмента в форме правильного многоугольника, м; n — число колебательных движений прошивки или число оборотов шпинделя станка, c^{-1} .

Как видно из полученного уравнения, при обработке гранного отверстия определенного размера скорость резания зависит от числа оборотов шпинделя станка и угла качания прошивки. Построим диаграмму изменения найденной скорости от указанных факторов (рис. 6).

Из диаграммы видно, что угол качания прошивки ε оказывает наибольшее влияние на изменение скорости V_k . Однако следует отметить, что даже при больших значениях ε и n метод КП характеризуется небольшими значениями скорости резания, а значит и небольшими температурами в зоне обработки. Последний вывод важен для выбора марки инструментального материала.

С небольшим допущением можно принять, что скорость результирующего движения резания V_c направлена по оси отверстия, поэтому кинематическую систему координат ориенти-

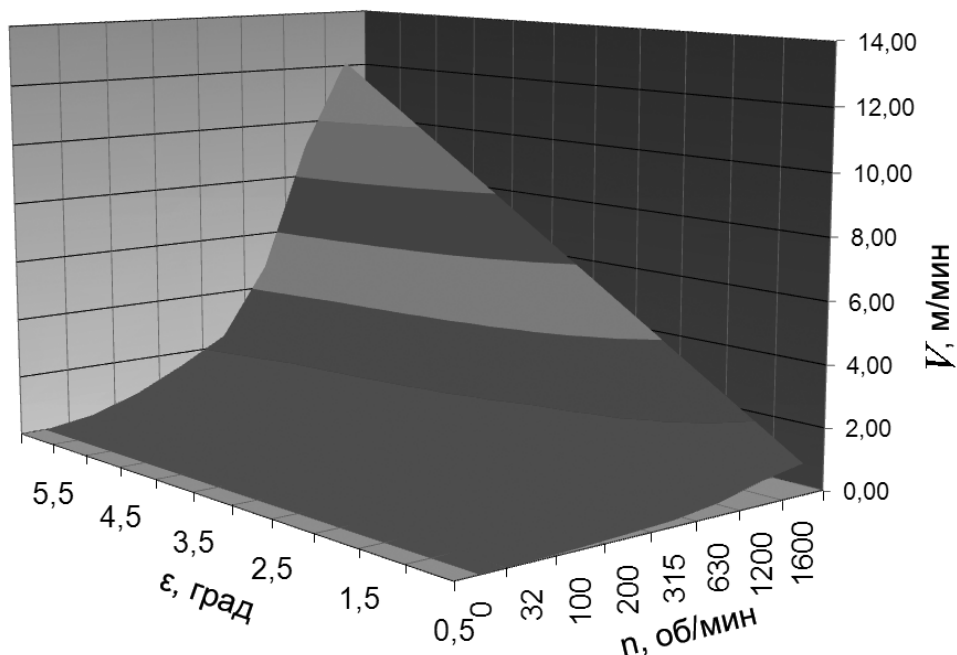


Рис. 6. Диаграмма изменения скорости резания V_k от числа оборотов шпинделя станка и угла качания прошивки ε для инструмента с диаметром описанной окружности 11,55 мм

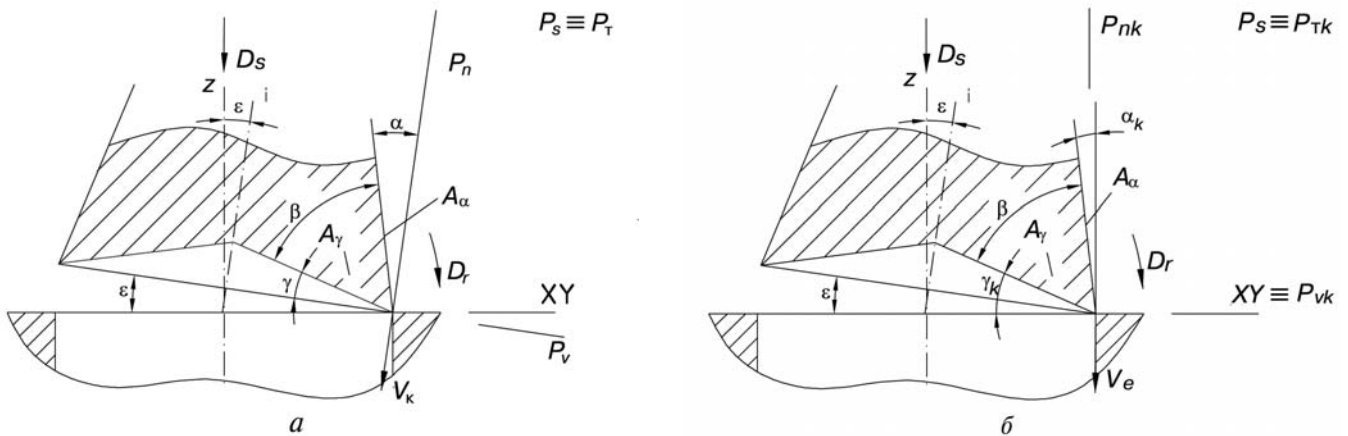


Рис. 7. Системы координат при методе КП:

a — статическая система координат; *б* — кинематическая система координат

руем по оси z (рис. 7, б). В этом случае кинематическая основная плоскость P_{VK} перпендикулярна оси обрабатываемого отверстия и параллельна плоскости XY (рис. 7, б). Кинематическая секущая плоскость совпадает со статической секущей плоскостью и рабочей плоскостью (см. рис. 6, б). Кинематический главный передний угол γ_k — угол в кинематической главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и кинематической основной плоскостью [2] (рис. 7, б). Кинематический задний угол α_k — угол кинематической главной секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и кинематической плоскостью резания [2] (рис. 7, б).

При этом кинематические и статические передние и задние углы имеют следующие взаимоотношения: $\alpha = \alpha_c - \varepsilon$ и $\gamma = \gamma_c - \varepsilon$.

Угол наклона кромки λ — угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной

плоскостью [2] (рис. 8). При обработке отверстий методом КП режущей кромкой является ломаная линия, которая представляет собой часть периметра обрабатываемого гранного отверстия. В процессе резания каждый отрезок ломаной линии совершает поворот вокруг центра мгновенных скоростей. Центрами мгновенных скоростей поочередно (последовательно) являются все вершины (узлы) режущей кромки. Угол λ для отрезка режущей кромки изменяется от своего минимального значения λ_{\min} до максимального значения λ_{\max} (рис. 8). Исходя из кинематики процесса КП, режущая кромка наклоняется на угол качания, следовательно, $|\lambda_{\min}| = |\lambda_{\max}| = \varepsilon$, т. е. угол наклона кромки изменяется в диапазоне $-\varepsilon \leq \lambda \leq \varepsilon$.

Угол в плане ϕ — угол в основной плоскости между плоскостью резания и рабочей плоскостью [2] (рис. 9). Максимальное свое значение, равное 90° , угол в плане принимает в середине

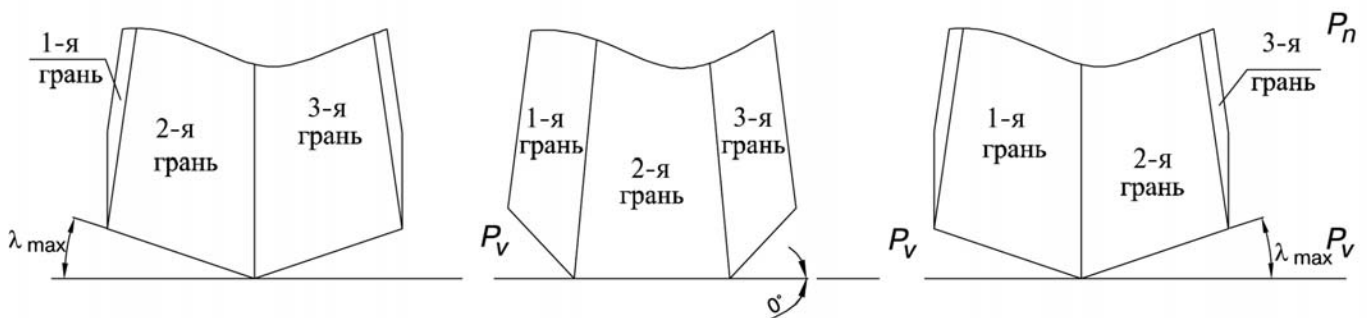


Рис. 8. Определение угла λ

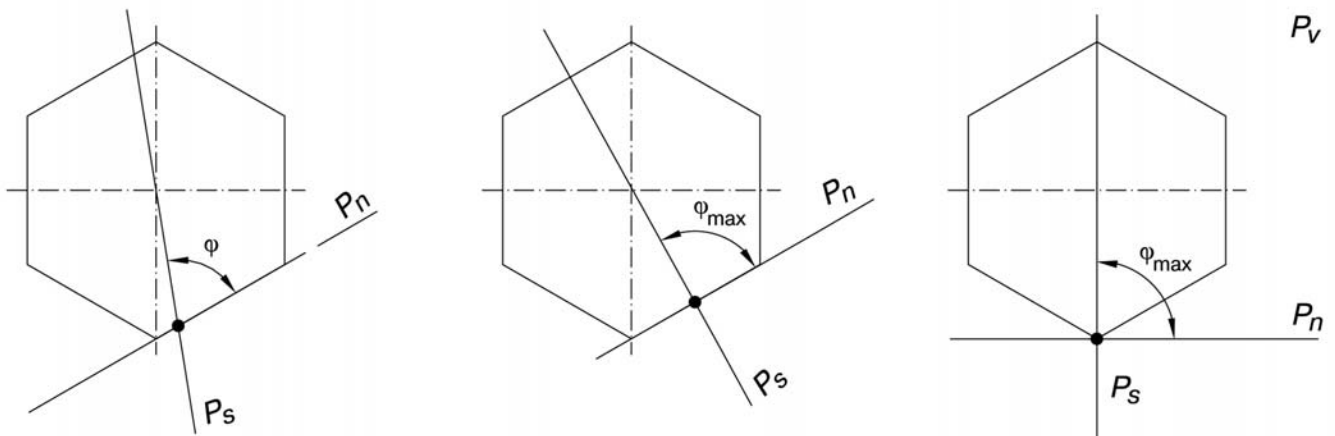


Рис. 9. Определение угла φ

граней и в вершинах. Минимальное значение φ_{\min} принимает в окрестности вершин. Из геометрии известно, что угол при вершине любого правильного многоугольника равен $180^\circ \frac{(n-2)}{n}$. Значит, двигаясь от центра грани к ее вершине в малой ее окрестности угол в плане приближается по своему значению к половине значения угла при вершине обрабатываемого правильного многогранника, т. е. $\varphi_{\min} = 180^\circ \frac{(n-2)}{n} : 2 = 90^\circ \frac{(n-2)}{n}$. Следовательно, при обработке гранных отверстий угол в плане находится в диапазоне $90^\circ \frac{(n-2)}{n} < \varphi \leq 90^\circ$.

Как описывалось выше, при отсутствии осевой подачи траектория движения вершин инструмента в проекции на плоскость P_n (см. рис. 4, б) представляет собой «восьмерку». Если качательное движение инструмента происходит только в одной плоскости, то величина ширины «восьмерки» равна нулю. Но так как прошивка за один свой оборот совершает качательное движение во всех плоскостях, которые можно провести через ось обрабатываемого отверстия и любую точку его периметра, значение величины ширины «восьмерки» не равно нулю. Следовательно, при обработке гранных отверстий методом качающегося прошивания все обработанные отверстия имеют радиус скругления в углах. Высота «восьмерки» характеризует амплитуду качания прошивки.

Рассмотрим траекторию движения вершины инструмента в плоскости P_n при отсутствии осевой подачи инструмента на оборот. Полученная траектория вписывается в прямоугольник со сторонами А — высота и Б — ширина «восьмерки». Диагональ описанного прямоугольника со стороной, равной А, составляет угол, равный углу качания прошивки. Тогда ширина «восьмерки» равна $B = A \operatorname{tg}(\varepsilon)$, а высота «восьмерки» равна $A = d \sin(\varepsilon)$, откуда $B = d \operatorname{tg}(\varepsilon) \sin(\varepsilon)$.

С учетом радиуса скругления вершины инструмента $R_{\text{инстр}}$ данная формула позволяет произвести оценку радиуса r в углах получаемого гранного отверстия: $r = d \operatorname{tg}(\varepsilon) \sin(\varepsilon) + R_{\text{инстр}}$.

Оценим долю кинетической составляющей радиуса в углах гранного отверстия (при нулевом радиусе скругления вершины инструмента). Например, при $R_{\text{инстр}} = 0$ мм и $\varepsilon = 1^\circ$ радиус в углах отверстия составит всего 3 мкм. При увеличении угла качания до 3° r возрастает до 27 мкм, что также является допустимым для большинства случаев использования гранного отверстия в крепежных деталях.

Поскольку осевое усилие при КП зависит от активной длины режущей кромки [3], рассчитаем $L_{\text{акт}}$ в зависимости от угла качания ε и подачи на оборот S_0 для произвольного правильного многоугольника. Для качающейся прошивки с формой произвольного правильного многоугольника с числом сторон n и радиусом описанной окружности R активная часть режу-

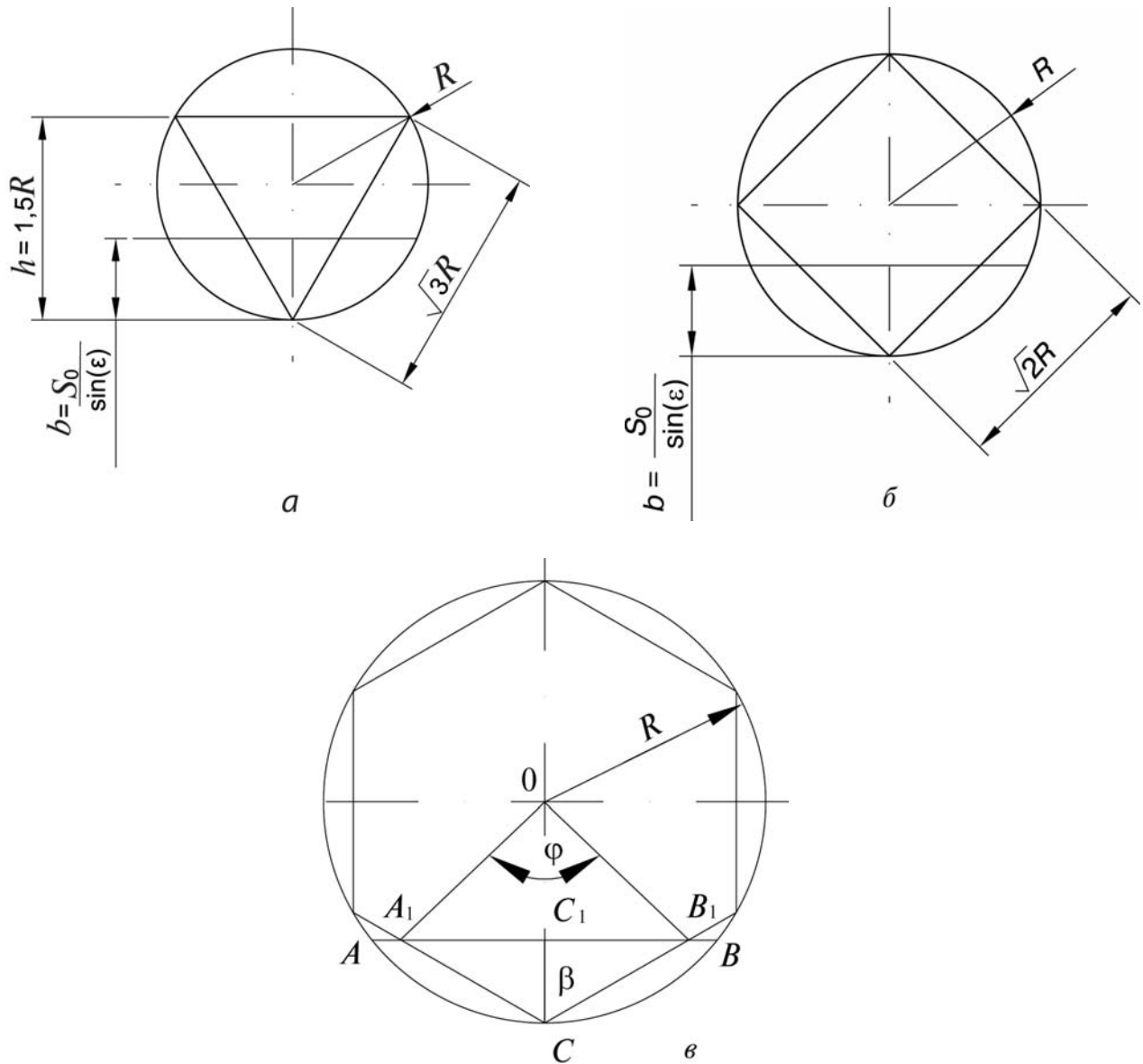


Рис. 10. Определение активной длины режущей кромки:
 а — для правильного треугольника; б — для квадрата; в — расчет центрального угла

щей кромки A_1CB_1 ограничивается хордой AB и дугой ACB (рис. 10).

Обозначим для заданного многоугольника его периметр P_n , а периметр описанной вокруг него окружности — P_c . При стремлении числа сторон многоугольника к бесконечности ($n \rightarrow \infty$) периметр многоугольника стремится к периметру описанной окружности ($P_n \rightarrow P_c$), тогда длина активной части режущей кромки стремится к длине стягивающей ее дуги: $L_{A_1CB_1} \rightarrow L_{\cup ACB}$. Или дуга $\cup ACB$ так же относится ко всему периметру окружности, как актив-

ная часть режущей кромки относится ко всему периметру правильного многоугольника. Следовательно, можно записать соотношение

$$\frac{L_{\cup ACB}}{P_c} = \frac{L_{A_1CB_1}}{P_n} \Rightarrow L_{A_1CB_1} \frac{L_{\cup ACB} P_n}{P_c} = L_{\text{акт}}.$$

Найдя необходимые величины и оценив погрешность расчетов, можно записать следующую систему уравнений для правильных многогранников.

Для пятигранника:

$$L_{\text{акт}} = \frac{2\arccos\left(1 - \frac{S_0}{R \sin(\varepsilon)}\right) nR \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{180^\circ}$$

при $\frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < R$,

$$L_{\text{акт}} = 2nR \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \left(1 - \frac{\arccos\left(\frac{S_0}{R \sin(\varepsilon)} - 1\right)}{180^\circ}\right)$$

при $R \leq \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < 2R$,

$$L_{\text{акт}} = 2nR \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

при $\frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} \geq 2R$,

где S_0 — подача качающейся прошивки на оборот шпинделя станка, мм/об.

Для правильного треугольника:

$$\begin{cases} L_{\text{акт}} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} & \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < 1,5R, \\ L_{\text{акт}} = 3\sqrt{3}R & \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} \geq 1,5R. \end{cases}$$

Для квадрата:

$$\begin{cases} L_{\text{акт}} = 2\sqrt{2} \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} & \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < R, \\ L_{\text{акт}} = 2\sqrt{2}b & \text{при } R \leq \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < 2R, \\ L_{\text{акт}} = 4\sqrt{2}R & \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} \geq 2R \end{cases}$$

Построим график зависимости активной длины режущей кромки от подачи на оборот в процентах от общей длины периметра обрабатываемого гранного отверстия. Для наглядности величину S_0 откладываем в логарифмических координатах.

Из графика зависимости, приведенного на рис. 11, видно, что наибольшее влияние на $L_{\text{акт}}$, а следовательно, и на усилие прошивания, оказывает угол качания прошивки: с увеличением угла качания инструмента $L_{\text{акт}}$ значительно уменьшается.

Поскольку усилие прошивания зависит от длины активного участка (а нас интересует именно многократное снижение осевых усилий), рассмотрим более подробно часть графика (рис. 11, справа), на котором длина активного участка режущего лезвия КП составляет не более трети от всего периметра режущих кромок. Из графика можно найти максимально

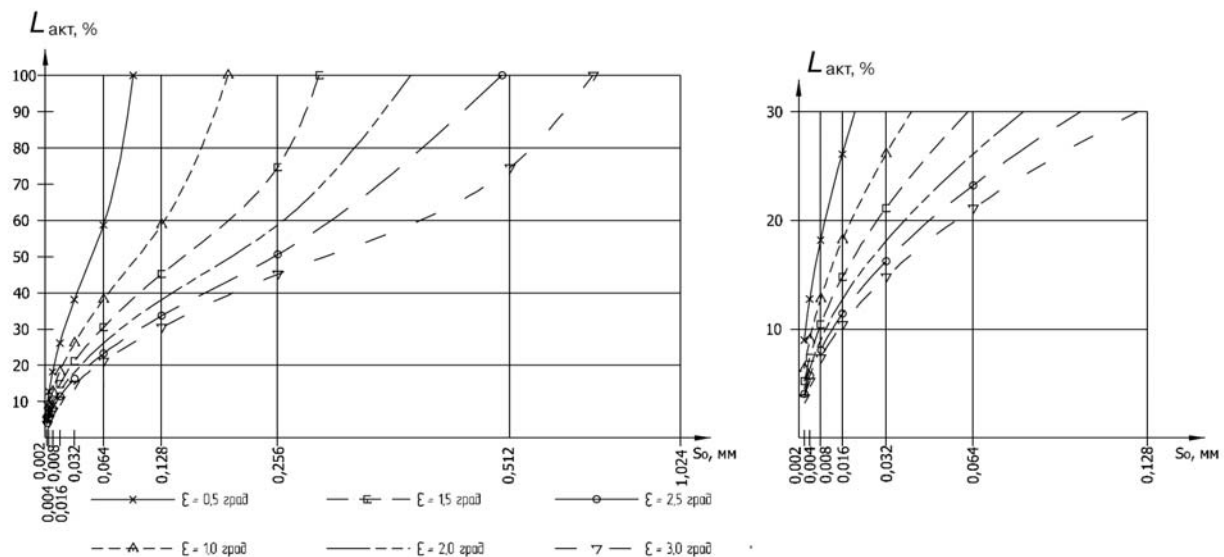


Рис. 11. График зависимости активной длины режущей кромки от подачи на оборот при различных углах качания прошивки

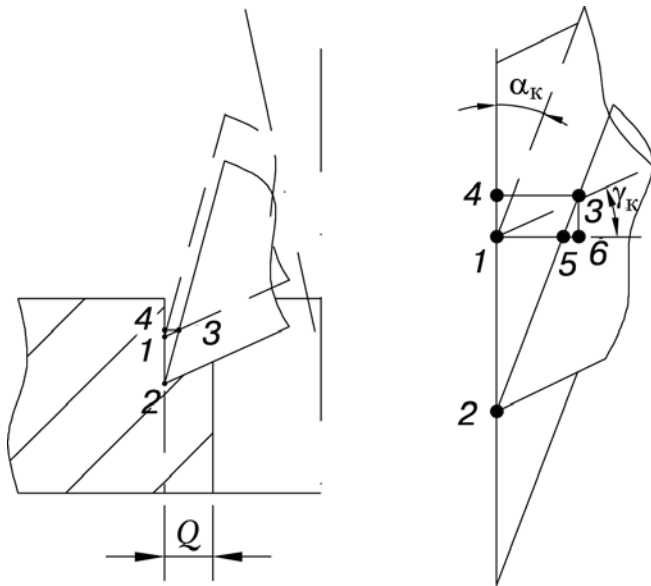


Рис. 12. Схема расчета ожидаемой величины шероховатости

допустимую подачу на оборот для каждого значения угла качания для условия сокращения длины активного участка до 30%. Например, при $\epsilon = 3^\circ$ подача на оборот должна быть не более $S_0 \approx 0,128$ мм / об.

Исходя из кинематики процесса качающегося прошивания, рассчитаем ожидаемую величину шероховатости поверхности обрабатываемых гранных отверстий методом КП. Для этого рассмотрим положение выбранной точки лезвия инструмента в момент ее наибольшего внедрения в материал обрабатываемой детали и положение этой же точки ровно через одно качательное движение (через один оборот). Наибольшее внедрение в материал заготовки выбранная точка лезвия качающейся прошивки осуществляет в крайней точке рабочего хода инструмента (рис. 12, точки 1 и 2).

Первое положение качающейся прошивки соответствует цифре 1, второе положение — цифре 2. Величина ожидаемой шероховатости будет равна длине отрезка 3—4 L_{3-4} и составит

$$h_{\max} = \frac{S_0 \sin(\alpha_k) \cos(\gamma_k)}{\cos(\lambda_k + \alpha_k)}$$

Выводы

1. Снижения осевого усилия при прошивании гранных отверстий можно достичь введением дополнительного качательного движения инструмента относительно оси заготовки.

2. Качательное движение инструмента относительно оси заготовки целесообразно осуществлять путем их совместного вращения при угловом несовпадении осей отверстия и инструмента. Это позволяет значительно упростить схему реализации метода КП на традиционном металлорежущем оборудовании.

3. Условием перехода от обычного прошивания к качающемуся прошиванию является превышение осевой составляющей скорости качательного движения угловой точки режущего лезвия (вершин инструмента) над величиной скорости подачи инструмента.

4. Установленные расчетные зависимости определения активной длины режущей кромки, радиусов скругления углов гранного отверстия и теоретической величины шероховатости обработанной поверхности методом КП позволяют определить основные режимные параметры обработки гранных отверстий с заданными требованиями.

Список литературы

- 1) *Зубков Н.Н., Ломакин А.В.* Получение гранных отверстий методом качающейся прошивки // *Технология машиностроения.* 2008. № 7. С. 13—15.
- 2) ГОСТ 25762—83 «Обработка резанием. Термины, определения и обозначение общих понятий».
- 3) *Зубков Н.Н., Ломакин А.В.* Влияние параметров обработки на осевую силу при качающемся прошивании гранных отверстий. Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции, посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2008. С. 56—57.

Статья поступила в редакцию 14.12.2010 г.