

На правах рукописи

УДК 621.9.02

**Ломакин**

**Андрей Васильевич**

**Разработка и исследование технологического  
процесса получения гранных отверстий методом  
качающегося прошивания**

05.02.07 – Технологии и оборудование механической и  
физико-технической обработки

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2011

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом  
Университете им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Зубков Николай Николаевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Якухин Виктор Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент  
**Волчкевич Илья Леонидович**

**Ведущая организация:** **ОАО ВНИИИНСТРУМЕНТ**

Защита состоится « » ..... 2011 года в ... часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим высылать по адресу: **105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2011г.

Телефон: (499) 267-09-63

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



В.П. Михайлов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Гранные отверстия под ключ в головках крепежных деталей общего машиностроения выполняются по 11, 12 и 14 квалитетам точности. Если для крупносерийного производства крепежная деталь, включая гранное отверстие, формируется целиком методами пластического деформирования, то формирование гранных отверстий в мелкосерийном производстве нестандартных крепежных деталей осуществляется в настоящее время прошиванием на прессах или электроэрозионной обработкой электродом-инструментом. Уменьшение парка необходимого оборудования, а также повышение производительности изготовления деталей с гранными отверстиями возможно за счет концентрации операций, когда гранное отверстие формируется из предварительно просверленного цилиндрического отверстия на металлорежущих станках, формирующих саму деталь. Придание прошивке качательного движения по конусу с вершиной конуса в центре прошиваемого отверстия, по сравнению с прошиванием на прессах, многократно снижает усилие прошивания. Относительно низкие осевые усилия, позволяют выполнять операцию формирования гранного отверстия на металлорежущих станках токарной, фрезерной или сверлильной групп, поскольку усилие прошивания укладывается в рамки допустимых для механизмов подачи этих станков.

Кинематика металлорежущего станка не предусматривает возможности качательного движения инструмента или заготовки. Специальные приспособления, преобразующие вращательное движение шпинделя в качательное движение инструмента, достаточно сложны. В связи с этим предлагается реализовать не абсолютное, а относительное качательное движение за счет совместного вращения инструмента и заготовки при угловом несовпадении осей отверстия и инструмента.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что метод обработки гранных отверстий качающейся прошивкой является актуальным для мелкосерийного и единичного производства отверстий под ключ в головках нестандартных крепежных деталей. Целесообразность использования метода качающегося прошивания (КП) обусловлена возможностью его реализации на обычном металлорежущем оборудовании при относительно высокой производительности обработки. Следовательно, данный метод позволяет сократить число единиц используемого оборудования и снизить затраты на производство деталей.

**Цель и задачи работы.** Разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору рациональных режимов резания при обработке гранных отверстий методом КП и геометрических параметров качающейся прошивки.

Для достижения цели настоящей работы необходимо решить следующие задачи:

1. Провести теоретический анализ кинематических особенностей процесса резания при реализации метода КП.
2. Установить параметрические взаимосвязи входных и выходных параметров обработки методом КП.
3. Установить закономерности силового взаимодействия инструмента и заготовки, обосновать способы минимизации осевого усилия прошивания.
4. Исследовать влияние технологических факторов обработки на показатели качества гранных отверстий.
5. Установить ограничения и разработать методику выбора рациональных режимов обработки гранных отверстий методом КП и геометрических параметров инструмента в зависимости от требуемых параметров качества отверстия и технологических возможностей используемого металлорежущего оборудования.
6. Разработать комплекс технологической оснастки для обработки гранных отверстий методом КП на станках токарной, фрезерной и сверлильной групп.

#### **Методы исследований.**

Для решения поставленных задач применены экспериментальные методы исследования процесса резания, а именно, динамометрические исследования силовых зависимостей процесса КП и показателей качества обработанных отверстий от технологических параметров обработки, использовались основы теории планирования экспериментов. Для проведения теоретических исследований применялись основные положения теории резания металлов и формообразования при обработке резанием, основы технологии машиностроения, аналитической геометрии и теории машин и механизмов.

Экспериментальные и технологические исследования проводились в лаборатории кафедры МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием специально разработанных приспособлений, современных приборов, методов и средств измерения. Достоверность и обоснованность теоретических выводов подтверждена экспериментальными данными полученными лично соискателем.

**Научная новизна.** Научная новизна заключается в раскрытии основных закономерностей процесса КП с целью нахождения способов управления этим процессом и заданным качеством обработки. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Проведенный анализ кинематических схем метода качающегося прошивания позволил установить границу перехода от прошивания на прессах к качающемуся прошиванию, а также обосновать вариант реализации относительного качательного движения за счет двух вращательных движений при угловом несоответствии осей прошиваемого отверстия и инструмента.
2. Установлены аналитические зависимости расчета длины активной части режущей кромки качающейся прошивки, позволяющие оценить величину снижения осевого усилия, определены теоретические значения радиуса

скругления углов получаемого гранного отверстия и величины шероховатости боковых граней обработанного отверстия.

3. Выявлено, что наибольшее влияние на осевое усилие прошивания оказывает соотношение амплитуды качания вершин инструмента и величины подачи за цикл качательного движения.

4. Установлено, что качество точности получаемого гранного отверстия в наибольшей степени определяется винтовой формой отверстия, которая неизбежна для процесса качающегося прошивания. Наибольшее влияние на винтовую форму гранного отверстия оказывает угол качания прошивки.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Обоснована возможность получения гранных отверстий методом КП по 11 качеству точности на металлорежущем оборудовании.

2. Предложены схемы реализации метода КП непосредственным и относительным качательным движением инструмента и разработаны конструкции приспособлений для получения гранных отверстий на металлорежущих станках токарной, фрезерной, сверлильной и расточной групп.

3. Установлены технологические параметры обработки, определяющие осевое усилие прошивания и такие точностные показатели отверстий как разбивка, конусность и их винтовая форма.

4. Разработана методика назначения режима резания и конструктивных параметров инструмента в зависимости от требований, предъявляемых к отверстию и технологических возможностей используемого оборудования.

#### **Реализация работы.**

Результаты диссертационной работы представлены в виде технологических рекомендаций по проектированию операции обработки гранных отверстий, методики выбора рациональных режимов резания и назначения геометрических параметров качающейся прошивки. Результаты работы используются также в образовательной программе по специальности 1510030065 в курсе «Спецглавы механической и физико-технической обработки».

#### **Апробация работы.**

Результаты исследований докладывались и обсуждались на общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая весна – 2007», Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2008г. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении НИР № ГР 01200802519.

### **Публикации.**

По материалам диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ, в том числе в трех изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций результатов исследований на соискание степени к.т.н.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы из 84 наименований. Работа содержит 145 страниц, в том числе 86 страниц основного текста и 89 рисунков.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассмотрены области применения гранных отверстий в современной технике, обобщены требования, предъявляемые к крепежным деталям, и применяемым обрабатываемым материалам в различных областях машиностроения. Обоснована актуальность использования метода КП для получения гранных отверстий в условиях мелкосерийного широкономенклатурного производства нестандартных крепежных деталей.

Анализ возможных методов обработки гранных отверстий позволил составить их классификацию по виду обработки и типу обрабатываемых отверстий. Проведенный патентный анализ отечественных и зарубежных способов получения гранных отверстий малых серий лезвийной обработки выявил, что большинство из них основано на применении расточки по копиру. Основным недостатком методов, основанных на этом принципе или совмещении радиальной и осевой подач, является проблема получения острых углов гранного отверстия.

Для мелкосерийного производства представляет интерес получение гранных отверстий инструментом, использующим свойства фигур равной ширины, и обработка гранных отверстий методом КП.

Метод обработки гранных отверстий инструментом, использующим свойства фигур равной ширины, предполагает интенсификацию такого известного явления, как огранка отверстий при работе вращающимся инструментом при нежестком закреплении инструмента или заготовки. Количество граней получаемого отверстия всегда на одну больше, чем количество граней инструмента. Реализация данного принципа известна и запатентована в конструкциях сверл для формирования квадратных и шестигранных отверстий. Например, трехгранное сверло компании Drill Service Ltd. (Великобритания) обеспечивает получение квадратного отверстия за счет придания оси вращающегося сверла специальной траектории. Широкого распространения такие сверла не получили из-за необходимости использования специальных кондукторов и плавающих патронов.

Упоминание о методе КП были найдены в «Справочнике металлиста» за 1961г. и справочнике «Токаря-универсала» за 1987г., где было приведено приспособление для обработки внутренних многогранников на токарных станках, что позволяет снижать осевые усилия прошивания и представляет суть

метода КП. Опубликованный принцип снижения осевых усилий прошивания формально позволяет получать гранные отверстия на металлорежущем оборудовании, но проблемы управления этим процессом и получения отверстий с заданными требованиями по качеству не исследовались.

Анализ иностранных источников показал, что в настоящее время за рубежом существуют специализированные фирмы, предлагающие к продаже инструмент, работающий по принципу КП, однако информация по применению инструмента носит разобщенный характер рекламного плана.

Литературный обзор получения гранных отверстий методом КП показал отсутствие исследований по данному процессу, рекомендаций по назначению технологических параметров обработки, геометрических параметров инструмента, прогнозированию величины осевого усилия резания, точности и качества поверхности полученных отверстий, рациональным областям использования и ограничениям метода КП.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что исследование метода КП для выработки рекомендаций по его рациональному использованию является актуальной научно-технической задачей.

В первой главе сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** проведен кинематический анализ процесса резания методом КП, введены термины, понятия и определения элементов метода КП, как разновидности лезвийной обработки резанием, установлены основные зависимости между технологическими параметрами и такими параметрами качества получаемых отверстий как точность и шероховатость.

Анализ вариантов снижения осевого усилия при прошивании гранных отверстий показал, что дополнительно уменьшить силу обработки возможно уменьшением суммарной длины одновременно работающих режущих кромок за счет изменения кинематики формообразования. Это требует введения дополнительных движений. При прошивании на прессах ось инструмента совпадает с осью отверстия. Уменьшение активной длины режущей кромки достигается периодическим наклоном оси прошивки относительно оси обрабатываемого отверстия на угол  $\epsilon$ . В этом случае часть периметра режущей кромки выходит из контакта с заготовкой. Для обработки периметра всего отверстия необходимо, чтобы прошивка «обошла» весь контур обрабатываемой детали. Это достигается тем, что инструменту придают равномерное качательное движение «А» при его прямолинейном движении  $D_s$  вдоль оси отверстия (рис. 1).

Для получения гранного профиля отверстия необходимо чтобы качательное движение прошивки совершалось без ее проскальзывания относительно заготовки, то есть обработка осуществляется методом копирования. Точка пересечения осей отверстия и инструмента лежит в плоскости вершин инструмента и перемещается равномерно и прямолинейно

вдоль оси отверстия. Таким образом, прошивка совершает качательное движение вокруг точки пересечения осей инструмента и отверстия в каждой плоскости семейства плоскостей, проходящих через ось обрабатываемого отверстия (рис. 1).

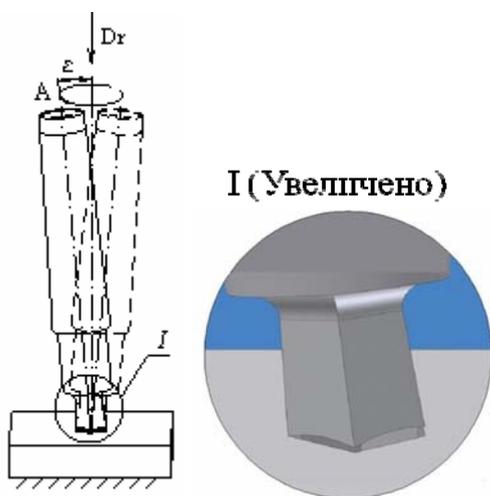


Рис. 1. Прошивка гранных отверстий непосредственным качанием

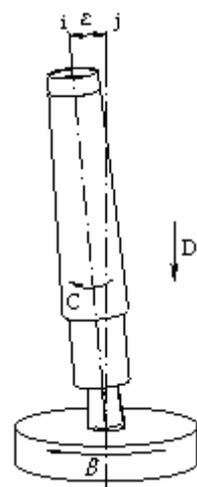


Рис. 2. Прошивка гранных отверстий относительным качанием

Кинематика существующих металлорежущих станков не предусматривает возможности качательного движения инструмента или заготовки. Специальные приспособления, преобразующие вращательное движение шпинделя в качательное движение инструмента относительно сложны. В связи с этим предлагается реализовать не абсолютное, а относительное качательное движение за счет совместного вращения инструмента (движение «С») и заготовки (движение «В») с одинаковой угловой скоростью при угловом несовпадении их осей на угол  $\epsilon$  (рис.2). Центры вращения движений «В» и «С» совпадают, и находятся в точке пересечения осей отверстия и инструмента. Синхронизацию частот вращения проще всего осуществить самовращением одной из пар, то есть либо прошивка вращает заготовку в приспособлении (например, для станков фрезерной и сверлильной групп), либо заготовка вращает прошивку в приспособлении (например, для станков токарной группы).

Контакт инструмента и обрабатываемой детали происходит на некоторой части периметра режущей кромки. Длина этого участка режущей кромки (активного участка) зависит от угла наклона прошивки и величины ее осевой подачи.

Рассмотрено движение прошивки за одно полное качание без осевого перемещения, то есть когда ось инструмента опишет один полный конус, а выбранная точка лезвия инструмента совершит одно полное качательное движение вокруг центра качания.

Введены проекционные плоскости (рис. 3а). Плоскость Р – плоскость, образованная пересекающимися осями инструмента и отверстия. Плоскость Р<sub>n</sub>

– плоскость перпендикулярная плоскости  $P$ , параллельная оси обрабатываемого отверстия и проходящая через точку заготовки, обрабатываемую выбранной точкой лезвия качающейся прошивки.

При отсутствии перемещения инструмента вдоль оси обрабатываемого отверстия в проекции на плоскость  $P_n$  траектория движения точек лезвия инструмента представляет собой пространственную фигуру в виде «восьмерки» лежащей на части сферы, описываемой выбранной точкой (рис. 3б). 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. 3в).

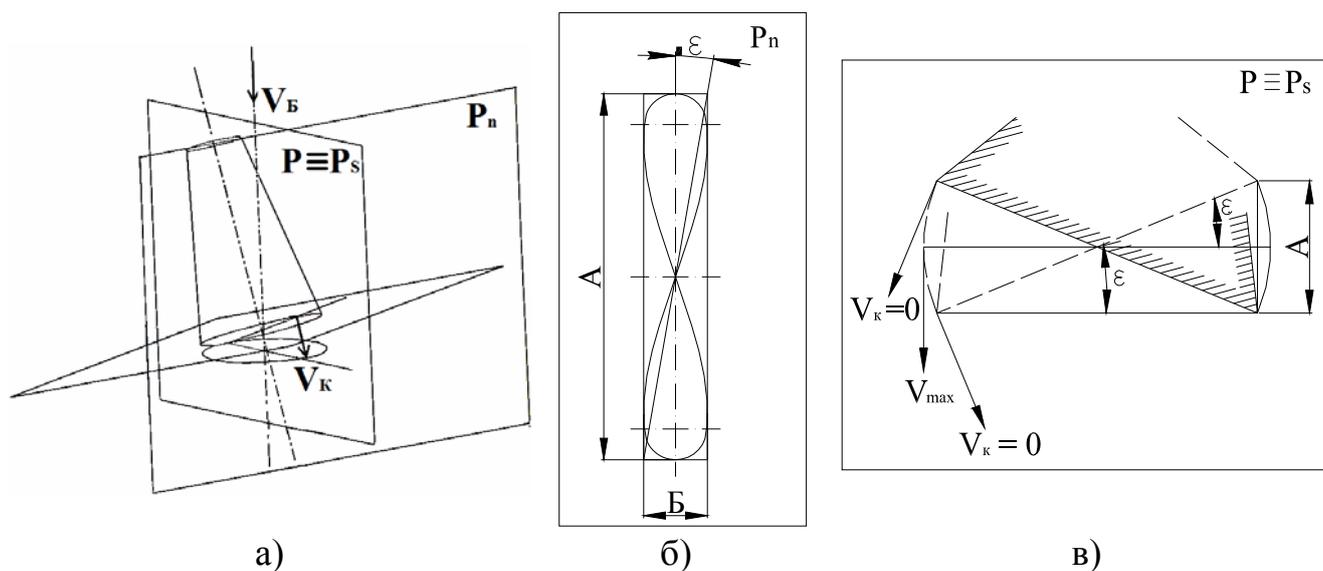


Рис. 3. Расположение основных плоскостей и траектории движения точек лезвия инструмента при методе КП

а) схема расположения проекционных плоскостей; б) траектория движения точек лезвия инструмента в проекции на плоскость  $P_n$  без осевой подачи инструмента; в) траектория движения точек лезвия инструмента в проекции на плоскость  $P$  без осевой подачи инструмента

Рассмотрены 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. В крайних точках траектории скорость  $V_k$  принимает нулевые значение и максимальное значение – в средней точке траектории, когда плоскость вершин инструмента занимает горизонтальное положение, а скорость имеет вертикальное направление. Так же всегда вертикально вниз направлена скорость перемещения всей прошивки вдоль оси обрабатываемого отверстия –  $V_B$ .

Анализ эпюры изменения суммарной вертикальной скорости перемещения выбранной точки лезвия качающейся прошивки (рис. 4) показал, что соотношение значений скоростей  $V_k$  и  $V_B$  влияет как на определение

скорости резания, так и на величину активной длины режущей кромки. Принимая во внимание, что скорость не постоянна и изменяется от нуля до своего максимального значения, будем сравнивать  $V_{к\max}$  и  $V_B$ . Если  $V_{к\max} > V_B$ , то согласно определению по ГОСТ 25762-83 «Обработка резанием. Термины. Определения и обозначения общих понятий», максимальная скорость качательного движения  $V_k$  является скоростью резания при КП, а  $V_B$  является скоростью подачи.

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

При  $V_{к\max} > V_B$  может существовать участок эюры (рис. 4, справа), 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 и равна сумме длин  $L_1 + L_2$ .

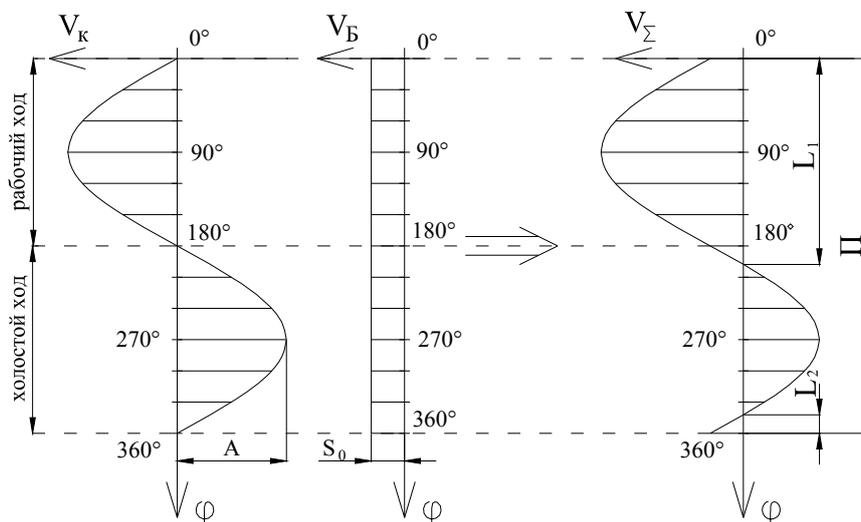


Рис. 4. Эюра вертикальных скоростей перемещения точек лезвия качающейся прошивки

Уравнение скорости резания для метода КП получено из уравнения гармонических колебаний:

$$V = X' = (d \sin(\varepsilon) \sin(2\pi nt))' = 2\pi nd \sin(\varepsilon) \cdot \cos(2\pi nt), \frac{M}{c},$$

где  $d$  – диаметр окружности, описываемой вершиной инструмента;

$n$  – число оборотов качающейся прошивки (заготовки) вокруг своей оси.

Далее, согласно ГОСТ 25762-83, для метода КП введены следующие понятия: рабочая плоскость  $P_S$ , основная плоскость  $P_V$ , плоскость резания  $P_n$ , главная секущая плоскость  $P_\tau$ , передний угол  $\gamma$ , задний угол  $\alpha$ , кинематическая основная плоскость  $P_{VK}$ , кинематический главный передний угол  $\gamma_k = \gamma_c - \varepsilon$ , кинематический задний угол  $\alpha_k = \alpha_c - \varepsilon$  (рис. 5).

Угол наклона режущей кромки для рассматриваемого отрезка изменяется от своего минимального значения  $\lambda_{\min}$  до максимального –  $\lambda_{\max}$ . Исходя из кинематики процесса КП, режущая кромка наклоняется на угол качания, следовательно,  $|\lambda_{\min}| = |\lambda_{\max}| = \varepsilon$ , то есть угол наклона кромки изменяется в диапазоне  $-\varepsilon \leq \lambda \leq \varepsilon$ .

Угол в плане  $\varphi$  принимает свое максимальное значение равное  $90^0$  в середине граней и в вершинах. Минимальное значение угол в плане  $\varphi_{\min}$  принимает в окрестности вершин, то есть  $\varphi$  изменяется в диапазоне  $90^0 \cdot \frac{(n-2)}{n} < \varphi \leq 90^0$ .

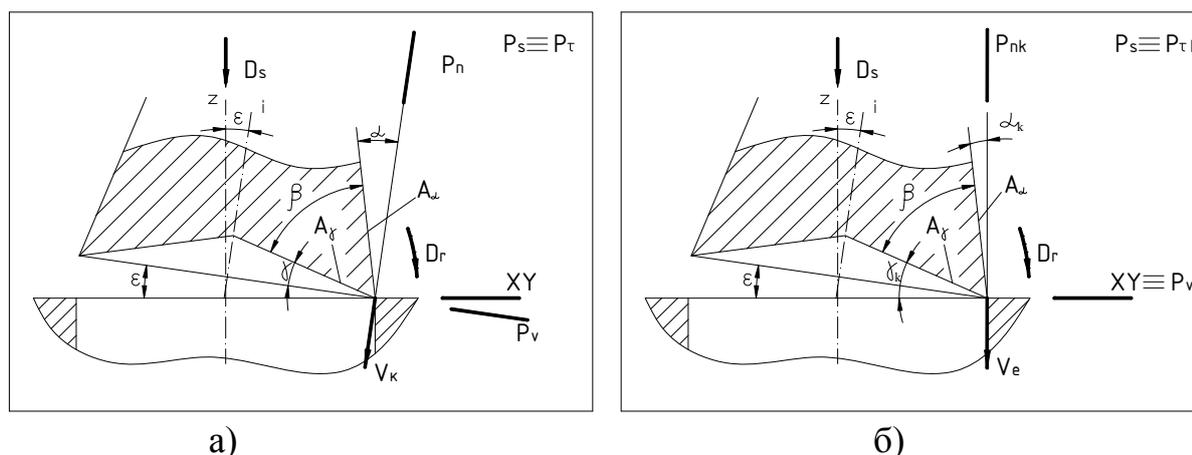


Рис. 5. Системы координат при методе КП

а) статическая система координат; б) кинематическая система координат

При обработке гранных отверстий методом КП необходимо наличие предварительного отверстия, поэтому, сечение срезаемого слоя представляется в виде секторов, где толщина срезаемого слоя равна разнице радиусов описанной и вписанной окружностей в обрабатываемый многогранник. Ширина срезаемого слоя равна длине развертки обрабатываемого периметра.

Относительное качательное движение обеспечивает периодический вывод части режущей кромки прошивки из контакта с заготовкой. Чем меньше активная длина режущей кромки, тем меньше осевое усилие. Величина активной длины режущей кромки зависит от соотношения вертикальной составляющей амплитуды качательного движения точки режущего лезвия и величины подачи инструмента за цикл качания. Чем больше это соотношение, тем меньшая длина периметра режущей кромки в данный момент находится в контакте с заготовкой, и тем меньше усилие следует ожидать. Помимо радиального удаления точки режущего лезвия от оси прошивки, наиболее значимым фактором, определяющим вертикальную составляющую амплитуды качательного движения, является угол качания. Для схемы самовращения – это величина угла несоответствия оси отверстия с осью инструмента.

Активная длина режущей кромки рассчитана исходя из того, что 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  $L_{акт} \rightarrow L_{\text{дуги}}$ .

Установлены зависимости для расчета длины активного участка режущей кромки. Для правильных многогранников формула расчета будет зависеть от соотношения радиуса описанной окружности и отношения осевой подачи на оборот к синусу угла качания инструмента. Например, для правильных многогранников с числом сторон более или равным 5:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{акм} = \frac{2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{S_0}{R \cdot \sin(\varepsilon)}\right) \cdot n \cdot R \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{180^\circ}, \quad \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < R \\ L_{акм} = 2 \cdot n \cdot R \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \cdot \left(1 - \frac{\arccos\left(\frac{S_0}{R \cdot \sin(\varepsilon)} - 1\right)}{180^\circ}\right), \quad \text{при } R \leq \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} < 2R \\ L_{акм} = 2 \cdot n \cdot R \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right), \quad \text{при } \frac{S_0}{\sin(\varepsilon)} \geq 2R \end{array} \right.$$

Особенности обработки методом КП приводят к неизбежному возникновению радиуса скругления углов гранного отверстия. Предложена зависимость для расчета теоретической величины радиуса разбивки углов гранного отверстия  $r = \frac{2 \cdot R \cdot \sin^2(\varepsilon)}{\cos(\varepsilon)} + R_{инстр}$ ,

где  $R$  – радиус окружности описанной вокруг вершин инструмента, мм;  
 $\varepsilon$  – угол качания прошивки, град;  
 $R_{инстр}$  – радиус скругления вершин инструмента, мм.

Исходя из кинематики процесса качающегося прошивания, рассчитана ожидаемая величина шероховатости поверхности обрабатываемых гранных отверстий  $h_{\max} = \frac{S_0 \cdot \sin(\alpha_k) \cdot \cos(\gamma_k)}{\cos(\gamma_k + \alpha_k)}$ ,

где  $S_0$  – подача на оборот качающейся прошивки;

$\alpha_k$  – кинематический задний угол качающейся прошивки;

$\gamma_k$  – кинематический передний угол качающейся прошивки.

**В третьей главе** выявлены зависимости осевого усилия, параметров точности и шероховатости поверхности при прошивании гранных отверстий методом КП от технологических параметров обработки. Экспериментальные исследования проводились прошиванием шестигранного отверстия с размером под ключ равным 10 мм на вертикально-фрезерном станке модели 6Р12. Форма

и размер отверстия были выбраны как наиболее типовые в номенклатуре крепежных винтов. Использовались прошивки с рабочей частью из быстрорежущей стали Р6М5 с коническим хвостовиком (конус Морзе №2). Заточка задних поверхностей проводилась на универсальном заточном станке 3М642 с использованием делительного приспособления. Попытки использования твердосплавной рабочей части, в том числе из высокопрочного мелкозернистого твердого сплава Н10F (Sandvik Coromant) не увенчались успехом. Даже щадящие режимы обработки приводили к сколам режущих кромок.

При проведении экспериментов изменялись следующие параметры обработки: угол качания прошивки – в диапазоне от  $\varepsilon = 0^\circ$  до  $\varepsilon = 3,0^\circ$  с интервалом в  $0,5^\circ$ ; подача на оборот инструмента – от  $S_0 = 0,005 \text{ мм/об}$  до  $S_0 = 0,333 \text{ мм/об}$ ; скорость резания – от  $V = 0,27 \text{ м/мин}$  до  $V = 5,15 \text{ м/мин}$ .

Для проведения экспериментов была выбрана схема относительного качательного движения, т.е. разложением на два вращательных движения, реализующаяся на фрезерном станке поворотом шпинделя на заданный угол качания. Синхронизация частот вращения инструмента и заготовки осуществлялась самовращением заготовки, закрепленной в приспособлении, изготовленном на основе шариковых подшипников.

При исследовании характера изменения осевого усилия прошивания  $P_z$  от подачи на оборот  $S_0$  было подтверждено существование критических подач, превышение которых не приводит к снижению усилия обработки, т.е. критическое значение подачи является границей перехода от качающегося прошивания к традиционному прошиванию. Значение критической подачи изменяется в зависимости от величины угла качания прошивки.

Зависимость осевого усилия прошивания  $P_z$  от угла качания инструмента  $\varepsilon$  показала, что с увеличением угла качания значение осевой силы уменьшается. На образцах из стали 45 было зафиксировано снижение усилия более чем в 25 раз, по сравнению с прошиванием тем же инструментом на гидравлическом прессе.

Подтверждено, что при прошивании гранных отверстий методом КП, согласно общим положениям теории резания, при увеличении скорости резания сила при обработке несколько снижается.

Оценивая полученные силовые зависимости, была установлена степень влияния исследуемых технологических параметров обработки на осевое усилие прошивания при обработке гранных отверстий в заготовках из стали 45 с размером под ключ 10 мм. Максимальное влияние на осевую силу прошивания оказывает угол качания прошивки  $\varepsilon^{-1,15}$ , значительно меньшее влияние оказывает подача на оборот инструмента  $S_0^{0,51}$  и скорость резания оказывает незначительное влияние  $V^{0,1}$ . Знание зависимости усилия прошивания позволяет ввести ограничения по минимально допустимому углу качания для

конкретного оборудования. Например, для токарно-винторезного станка 16К20, допустимое усилие продольной подачи которого составляет 7845Н, минимально допустимый угол качания составит  $\varepsilon_{\min}=0,96^{\circ}$  (для подачи  $S_0=0,005\text{мм/об}$ ),  $\varepsilon_{\min}=1,23^{\circ}$  (для  $S_0=0,013\text{мм/об}$ ) и так далее (рис.6).

Таким образом, например, для станка 16К20, допустимое усилие подачи 7845 Н, следовательно, существует ограничение по минимальному углу качания (рис. 6) для данной подачи в  $\varepsilon > 0,96^{\circ}$ .

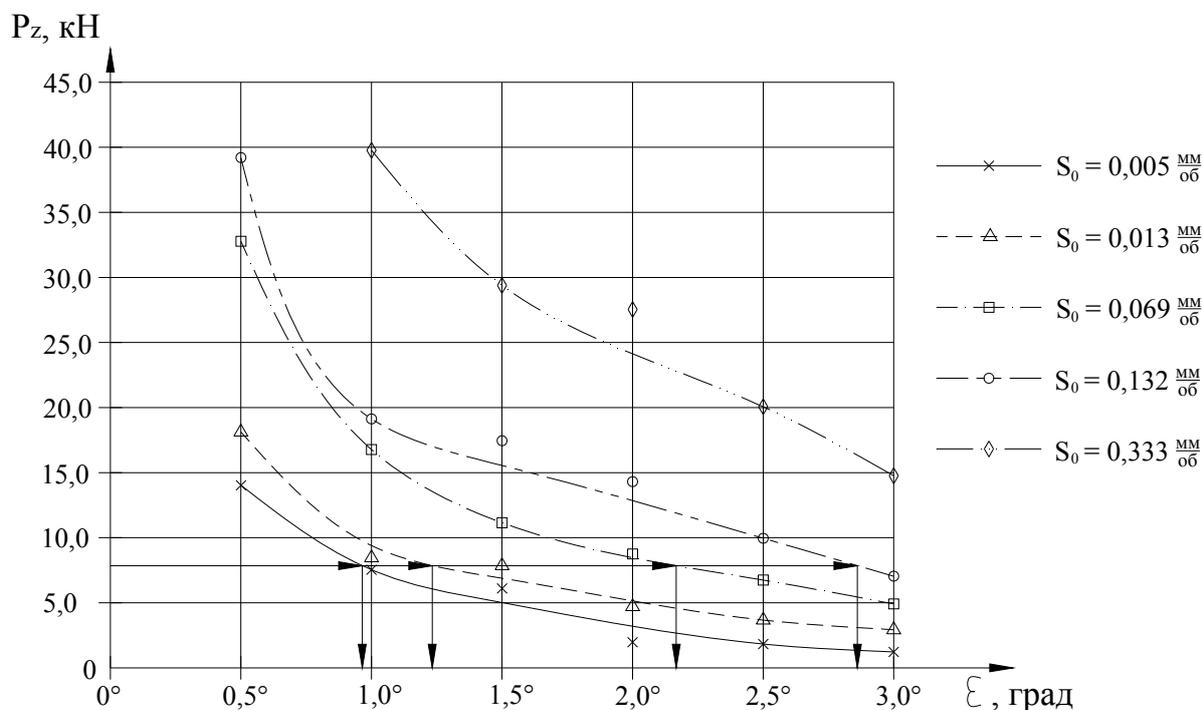


Рис. 6. График зависимости осевого усилия прошивания от угла качания прошивки

При обработке гранных отверстий методом качающегося прошивания происходит копирование торцевой проекции формы режущей кромки инструмента на обрабатываемую заготовку. При обязательном наличии положительного заднего угла  $\alpha$  больше угла качания инструмента  $\varepsilon$ , не нулевое значение переднего угла  $\gamma$  приводит к тому, что как сама режущая кромка, так и ее торцевая проекция будут иметь отклонения сторон режущей кромки от прямолинейности. Для исключения этой погрешности принято использование инструмента с нулевым передним углом  $\gamma = 0^{\circ}$ . Дополнительным преимуществом прошивки с нулевым передним углом является высокая прочность режущего клина, а также простота заточки и переточки инструмента.

Придание качательного движения инструменту существенно снижает усилие обработки, однако, по сравнению с прошиванием без качания, ухудшает шероховатость поверхности, грани отверстия приобретают непараллельность и неплоскостность, возникает разбивка обрабатываемых размеров.

Анализ шероховатости обработанной поверхности показывает, что максимальное влияние на ее величину оказывает подача на оборот  $S_0$

прошивки. Угол качания  $\varepsilon$  оказывает значительно меньшее влияние. В экспериментах при всех применяемых сочетаниях технологических параметров шероховатость обработанных образцов не превышала значения  $Ra = 2,8$  мкм. Профилограммы обработанных поверхностей отверстий в целом подтвердили теоретическую форму, шаг и высоту микронеровностей поверхности, получаемой качающейся прошивкой.

В процессе обработки гранных отверстий методом качающегося прошивания получаемый размер под ключ отверстия на обработанной заготовке отличается от соответствующего размера на инструменте, которым было обработано это отверстие. Разность размеров под ключ инструмента и обработанного отверстия может быть как положительной, так и отрицательной. Выявлено, что при малых углах качания разбивка  $\Delta$  является отрицательной, то есть получаемый на заготовке размер под ключ несколько меньше, чем соответствующий ему размер на качающейся прошивке. Это с одной стороны, приводит к возникновению усилий при изъятии прошивки из готового отверстия, но с другой стороны, прошивка при обратном ходе работает в качестве выглаживающего инструмента, уменьшающего шероховатость обработанной поверхности. С увеличением угла качания  $\varepsilon$  отрицательное значение разбивки размера под ключ уменьшается, и при угле качания  $\varepsilon \geq 2,8^\circ$  разбивка принимает положительные значения.

Установлено, что полученные гранные отверстия имеют прямую конусность, то есть размер под ключ верхней грани шестигранного отверстия несколько больше аналогичного размера под ключ нижней грани того же отверстия. Анализ конусности показал, что ее максимальная величина составляет не более  $0,3^0$ , что приводит к уменьшению линейного размера по длине отверстия не более, чем на  $0,04$  мм.

Очевидно желание минимизировать осевое усилие за счет больших углов качания, однако на величину угла качания существуют ограничения, в первую очередь, из-за неизбежной при качающемся прошивании винтовой формы гранного отверстия, которую можно оценить по углу  $\Theta$  поворота нижней грани относительно верхней. Получение винтообразной формы отверстия объясняется тем, что в каждый момент времени равнодействующая сил резания качающегося инструмента не перпендикулярна оси заготовки, то есть имеет окружную составляющую. Задняя поверхность качающейся прошивки опирается на обработанную поверхность и является направляющей при формировании гранного отверстия. Чем меньше задний угол прошивки, который должен быть больше угла качания, тем больше опора инструмента на обработанную поверхность и лучше функция самонаправления.

Установлено, что угол поворота нижней грани относительно верхней определяется углом качания и слабо зависит от других технологических параметров обработки. Винтообразная форма отверстия вносит до 70% от суммарной погрешности размеров отверстия, полученного методом КП.

Установленная зависимость  $\Theta = f(\varepsilon)$  позволила ввести ограничения на максимально допустимый угол качания для получения отверстия заданного качества точности. Периодическое реверсирование направления вращения шпинделя могло бы кардинально решить проблему образования винтообразной формы отверстия при КП на станках с ЧПУ. Однако такой режим работы не благоприятен для эксплуатации металлорежущего оборудования и снижает производительность обработки.

Проверка влияния различных СОТС на осевое усилие прошивания показала, что наибольший эффект достигается при использовании синтетической СОТС 5% водный раствор Ивката. Снижение усилия составило до 21% по сравнению с резанием в сухую, в то время как индустриальное масло И-20А снижает усилие максимум на 5%. Вероятно, помимо хороших смазывающих свойств СОТС должна обладать пониженной вязкостью, поскольку ее доступ в зону резания при КП затруднен.

Проведенный анализ показал, что при соответствующем ограничении режимных параметров обработки метод качающегося прошивания обеспечивает получение гранных отверстий с параметрами точности, по 11 качеству, что удовлетворяет требованиям для крепежных деталей общего машиностроения.

Проведен анализ форм получаемых стружек и расчет дополнительной длины предварительного отверстия для ее компактирования при получении глухих гранных отверстий.

**В четвертой главе** представлены разработанные конструкции приспособлений, позволяющие реализовывать метод КП на токарных, фрезерных, сверлильных, расточных универсальных станках и станках с ЧПУ. Предложена методика, позволяющая назначить режим обработки и рассчитать основные конструктивные элементы качающейся прошивки.

Для токарных станков разработаны две конструкции приспособлений: устанавливаемое в резцедержке и устанавливаемое в пиноль задней бабки. Конструкции приспособлений реализует схему относительного качательного движения, при этом синхронность вращения обеспечивается самовращением качающейся прошивки. Приспособление, устанавливаемое в пиноль задней бабки может быть использовано также на сверлильных станках. Для фрезерных и расточных станков разработано универсальное приспособление, устанавливаемое в шпинделе станка, реализующее непосредственное качательное движение инструмента.

Для обеспечения универсальности большинство спроектированных приспособлений имеют возможность варьирования угла качания прошивки. Это обеспечивает возможность использования оптимальных режимов резания, исходя из заданной производительности, качества поверхности обрабатываемого отверстия и имеющегося оборудования.

Разработаны методические рекомендации по выбору оптимальных режимов обработки и геометрических параметров качающейся прошивки от предъявляемых требований к отверстию и технологических возможностей применяемого оборудования. В методике сформулированы исходные данные необходимые для дальнейших расчетов. Методика содержит:

- расчет максимально допустимого угла качания прошивки, исходя из заданной точности обрабатываемого отверстия;
- расчет исполнительного размера инструмента с учетом величины разбивки обрабатываемого отверстия;
- определение максимального допустимого значения подачи на оборот инструмента, исходя из технологических возможностей применяемого оборудования и условия максимально допустимой шероховатости стенок обрабатываемого отверстия;
- расчет максимального допустимого значения числа оборотов шпинделя станка, исходя из допустимой скорости резания и технологических возможностей применяемого оборудования;
- назначение конструктивных размеров качающейся прошивки, диаметра и глубины предварительно просверленного отверстия.

#### **Основные выводы и результаты работы**

1. Снижение осевого усилия при прошивании гранных отверстий достигается введением дополнительного качательного движения инструмента относительно заготовки. Условием перехода обычного прошивания к качающемуся прошиванию является превышение максимального значения осевой составляющей скорости качательного движения крайней точки режущего лезвия (вершины инструмента) над величиной скорости подачи прошивки.

2. Установлены аналитические зависимости для расчета длины активного участка режущей кромки при КП. Их использование позволяет произвести оценку ожидаемого снижения осевого усилия в зависимости от технологических параметров обработки. Выполнен расчет теоретических значений радиуса скругления углов гранного отверстия и величины шероховатости граней получаемого отверстия.

3. Установлено влияние технологических параметров обработки на величину осевого усилия прошивания. Уменьшение угла качания резко повышает осевые нагрузки прошивания, то есть величина минимального допустимого угла качания ограничивается возможностями используемого оборудования по допустимым нагрузкам на механизм подач. Выведена эмпирическая зависимость осевого усилия прошивания при обработке шестигранных отверстий в заготовках из стали 45.

4. Определены погрешности формы получаемых отверстий и зависимость конусности, разбивки и винтовой формы гранных отверстий от режимных параметров процесса КП.

5. Установлено, что качество точности получаемого гранного отверстия в наибольшей степени определяется такой погрешностью как винтовая форма отверстия, которая неизбежна для процесса качающегося прошивания. Наибольшее влияние на винтовую форму гранного отверстия оказывает угол качания прошивки.

6. Показано, что при соответствующих ограничениях режимных параметров метод КП обеспечивает получение на металлорежущих станках гранных отверстий до 11 качества точности.

7. Предложена методика расчета режима резания и конструктивных параметров качающейся прошивки, при обработке шестигранных отверстий методом КП в зависимости от заданных параметров качества и точности отверстия, а также технологических возможностей используемого оборудования.

8. Разработаны конструкции приспособлений, позволяющие реализовать принцип относительного качания самовращением заготовки или инструмента и непосредственного качания на станках токарной, фрезерной, расточной и сверлильной групп, в том числе с ЧПУ.

**Основные положения диссертации** отражены в следующих работах:

1. Ломакин А.В. Получение гранных и некруглых отверстий вращающимся инструментом // Студенческая весна 2007: Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. конф. М., 2007. Том 4, Ч. 1. С.219-220.

2. Разработка теоретических основ и методов применения высокоэффективных формообразующих технологий и оборудования для снижения затрат при производстве машиностроительных деталей. Шифр темы 1.22.07а. Заключительный отчет о НИР / руководитель А.Г. Колесников, №ГР 01200802519; Инв. №02200801805. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 114 с.

3. Зубков Н.Н., Ломакин А.В. Получение гранных отверстий методом качающейся прошивки // Технология машиностроения. 2008. №7. С.13-15.

4. Зубков Н.Н., Ломакин А.В. Влияние параметров обработки на осевую силу при качающемся прошивании гранных отверстий: Тез. докл. Всерос. научно-технической конф., посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С.56-57.

5. Ломакин А.В. Кинематика процесса качающегося прошивания // Известия ВУЗОВ. Машиностроение. 2011. №2. С.58-67.

6. Зубков Н.Н., Ломакин А.В. Анализ точности гранных отверстий, получаемых методом качающегося прошивания // Электронное научно-техническое издание НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ. 2011. №4. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/173995.html> (дата обращения 03.05.2011).