

**Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки на заготовке
концевой фрезы**

д.т.н. проф. Петухов Ю.Е., Домнин П.В.
ГОУ ВПО МГТУ «Станкин»

(499) 972-94-57, sayunn@mail.ru, _domnin@rambler.ru

Аннотация. В статье описан способ обработки винтовых фасонных поверхностей концевыми фрезами прямого профиля. Также описано решение задачи о возможности обработки фасонной винтовой поверхности фрезой с заданным профилем посредством математического и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: обработка, инструмент, программа, винтовая поверхность, фасонный профиль, формообразование, фреза.

Статья написана в рамках проведения поисковой НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Решение задачи о возможности обработки фасонной винтовой поверхности фрезой с заданным профилем представляет не только научный, но и большой практический интерес, так как позволяет сократить номенклатуру необходимого инструмента и в некоторых случаях отказаться от проектирования и изготовления специальных канавочных фрез.

Кроме того, использование стандартного инструмента с прямолинейными режущими кромками открывает возможность оснащения инструмента твердым сплавом, минералокерамикой и сверхтвердыми материалами.

Использование этих инструментальных материалов позволяет реализовать высокоскоростную обработку на операциях фрезерования фасонных поверхностей и тем самым повысить ее производительность и эффективность использования оборудования.

Наиболее сложной из указанного класса задач является определение возможности обработки винтовой поверхности концевой фрезой.

На примере решения этой задачи ниже рассмотрен алгоритм программы по определению условий, обеспечивающих возможность обработки цилиндрической винтовой поверхности с заданным фасонным торцевым сечением.

Цель алгоритма - определить параметры установки α , β , a , b и диаметр D концевой фрезы (рисунок 1), при которых возможно получение винтовой поверхности с заданным торцевым сечением при установленном минимальном отклонении профиля δ .

В случае, если такая обработка невозможна при заданных ограничениях, определяются параметры установки, обеспечивающие достижение минимально возможного отклонения профиля δ_{min} .

На рисунке 1 приведена схема установки концевой фрезы диаметром D относительно обрабатываемой детали.

В исходном положении ось концевой фрезы располагается вертикально и пересекает ось обрабатываемой детали под прямым углом, а торец фрезы совмещен с горизонтальной плоскостью, проходящей через ось заготовки.

Установка фрезы заключается в перемещении фрезы вдоль своей оси O_1Y на расстояние a , и в вертикальной плоскости перпендикулярно собственной оси по OX на расстояние b , затем – при повороте вокруг горизонтальной оси O_1X на угол α и в заключение – при повороте заготовки вокруг вертикальной оси OY на угол β .

Перечисленные параметры используются для непосредственной установки концевой фрезы и обрабатываемой детали на станке. Однако в расчетной схеме определения профиля винтовой поверхности при известном профиле инструмента используются только три параметра: угол скрещивания - ε , межосевое расстояние - t , а также величина, характеризующая положение точки скрещивания; для случая обработки винтовой поверхности концевой фре-

зой эту величину определяет расстояние l от точки скрещивания до ее торца (от точки пересечения межосевого перпендикуляра осью фрезы).

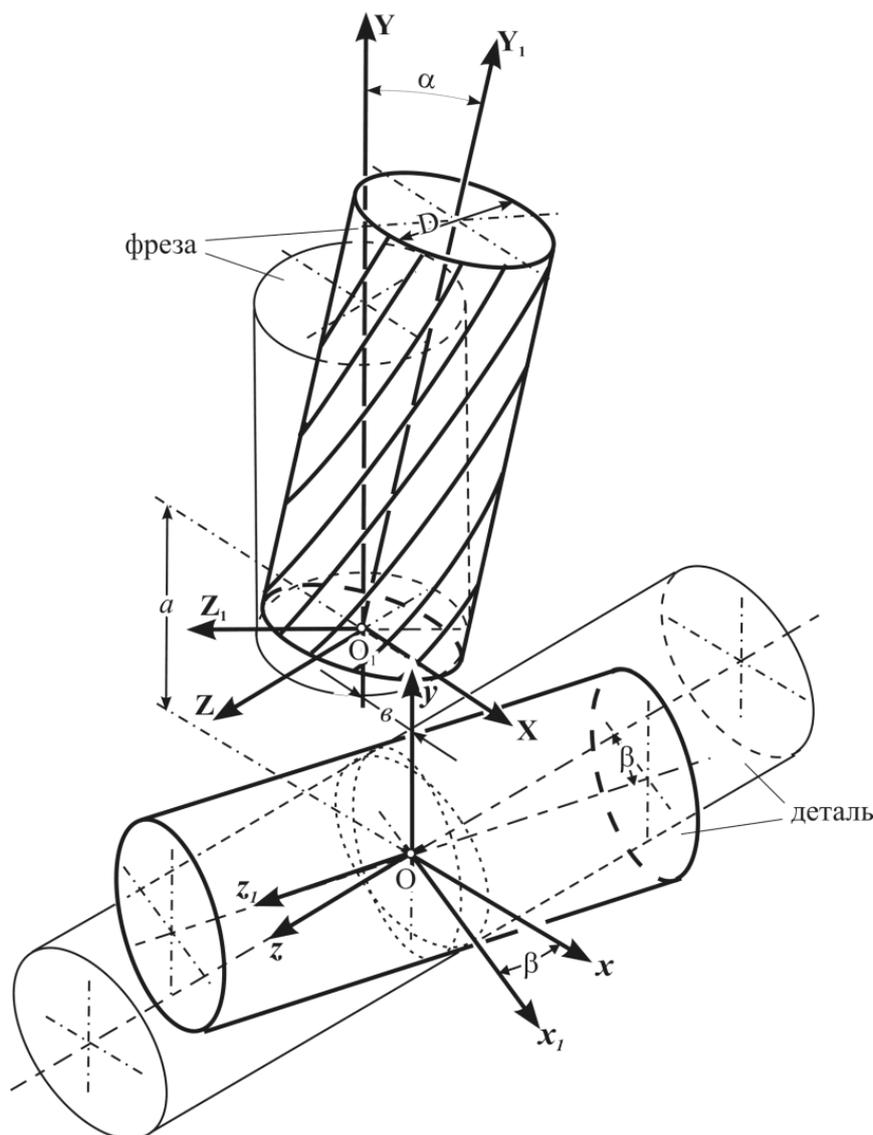


Рисунок 1 – Схема расположения фрезы при обработке винтовой поверхности

На рисунке 2 приведена схема определения связи между указанными расчетными ε , m , l и станочными параметрами (α , β , a , b) установки концевой фрезы.

В положении обработки ось детали совмещена с осью z_1O системы координат $X_1Y_1Z_1$, а ось инструмента – с осью O_1Y_1 систем $X_1Y_1Z_1$. Искомый угол скрещивания $\varepsilon = \angle O_1ee_1$, межосевое расстояние $m = eO_2$; расстояние от точки скрещивания до центра торца фрезы $l = eO_1$. Ниже приведен вывод зависимостей, позволяющих определить расчетные установочные параметры ε , m , l .

Известно: $a = O_1K$, $v = OK$, $\alpha = \angle aO_1k$, $\beta = \angle dac$.

Тогда для $m = eO_2 = O_1e = Oc \cdot \sin(\angle e_1cO)$, $Oc = Od - cd$,

$Od = v / \cos(\beta)$, $cd = ad \cdot \sin(\beta)$, $cd = ad \cdot \text{ctg}(\alpha)$, $ad = ak \cdot kd$, $ak = a \cdot \text{ctg}(\alpha)$, $kd = v \cdot \text{tg}(\beta)$,

$$\sin(\angle e_1cO) = \frac{vc}{ed} = \frac{\sqrt{bd^2 + dc^2}}{ed}, \quad ed = ad \cdot \text{ctg}(\alpha), \quad dc = ad \cdot \sin(\beta),$$

$$\sin(\angle e_1cO) = \frac{\sqrt{\text{ctg}^2(\alpha) + \sin^2(\beta)}}{\text{ctg}(\alpha)} = \sqrt{1 + \sin^2(\beta) \cdot \text{tg}^2(\alpha)}.$$

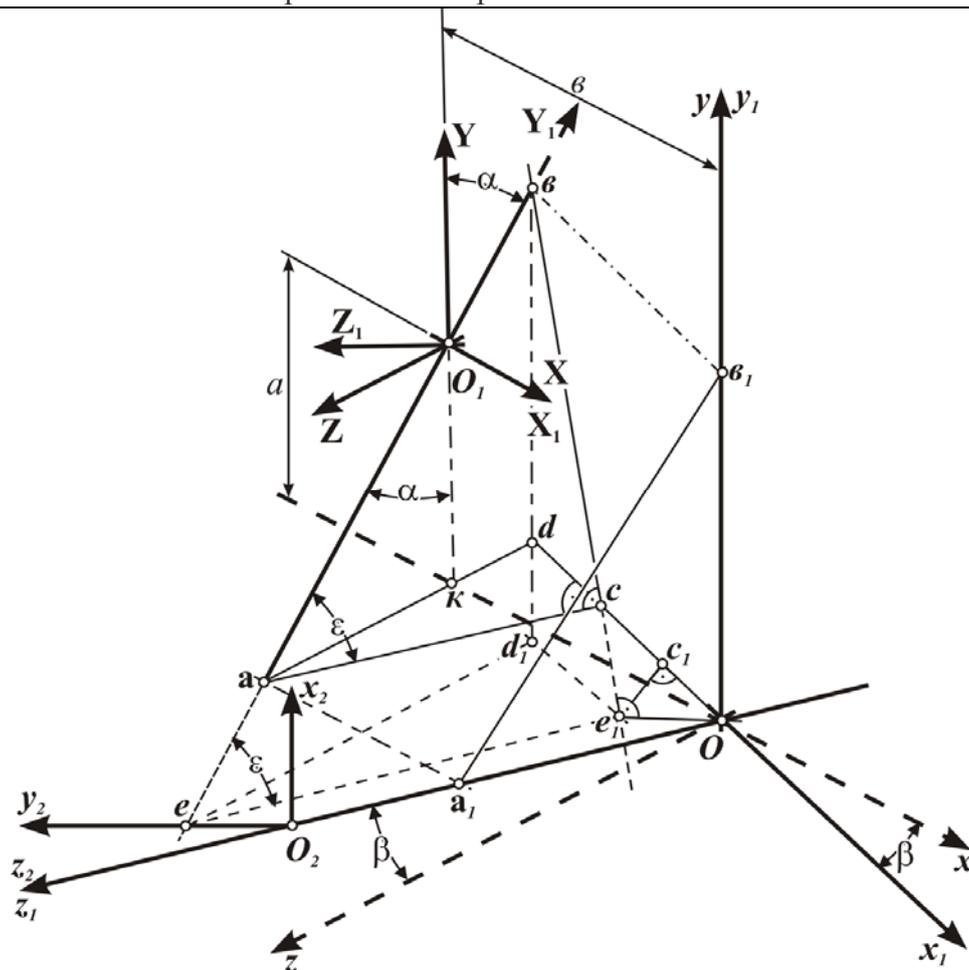


Рисунок 2 – К определению параметров установки ϵ, m, l

Таким образом:

$$m = \left[\frac{\epsilon}{\cos(\beta)} - (atg(\alpha) - \epsilon tg(\beta)) \sin(\beta) \right] \sqrt{1 + \sin^2(\beta) \operatorname{tg}^2(\alpha)}. \quad (1)$$

Для $l = O_1e = \frac{a - ad}{\sin(\alpha)}$, $ad = ce_1 \cdot \sin(\angle e_1cO)$, $ce_1 = ac \cdot \sin(\angle e_1cO)$,

$$ad = Oc \cdot \cos(\angle e_1cO) \cdot \sin(\angle e_1cO).$$

Таким образом:

$$l = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left[a + \left\{ \frac{\epsilon}{\cos(\beta)} - (atg(\alpha) - \epsilon tg(\beta)) \sin(\beta) \right\} \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \sin(\beta)}{\operatorname{ctg}^2(\alpha) + \sin^2(\beta)} \right] \quad (2)$$

Для $\cos(\epsilon) = \frac{ak_1}{aO_1}$, $ak_1 = ak \cdot \cos(\beta)$, $ak = aO_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$, $aO_1 = \frac{a}{\cos(\alpha)}$.

Таким образом:

$$\cos(\epsilon) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta). \quad (3)$$

Поставленная задача по определению диаметра и параметров установки фрезы на станке при обработке винтовой поверхности с заданным профилем в торцевом сечении может быть решена только с использованием методов многомерной оптимизации, так как в общем случае в обработке участвует не только торец, но и цилиндрический участок фрезы.

Простыми параметрами, значения которых необходимо вычислить в результате опти-

мизации, являются: α, β, a, b, D .

Особенность решения данной задачи заключается в том, что в процессе оптимизации на разных ее этапах используется различный набор целевых функций, что позволяет ускорить достижение конечного результата по минимизации отклонения профиля δ заданного торцевого сечения и полученного с расчетными параметрами.

На рис. 3 приведена блок-схема определения целевой функции.

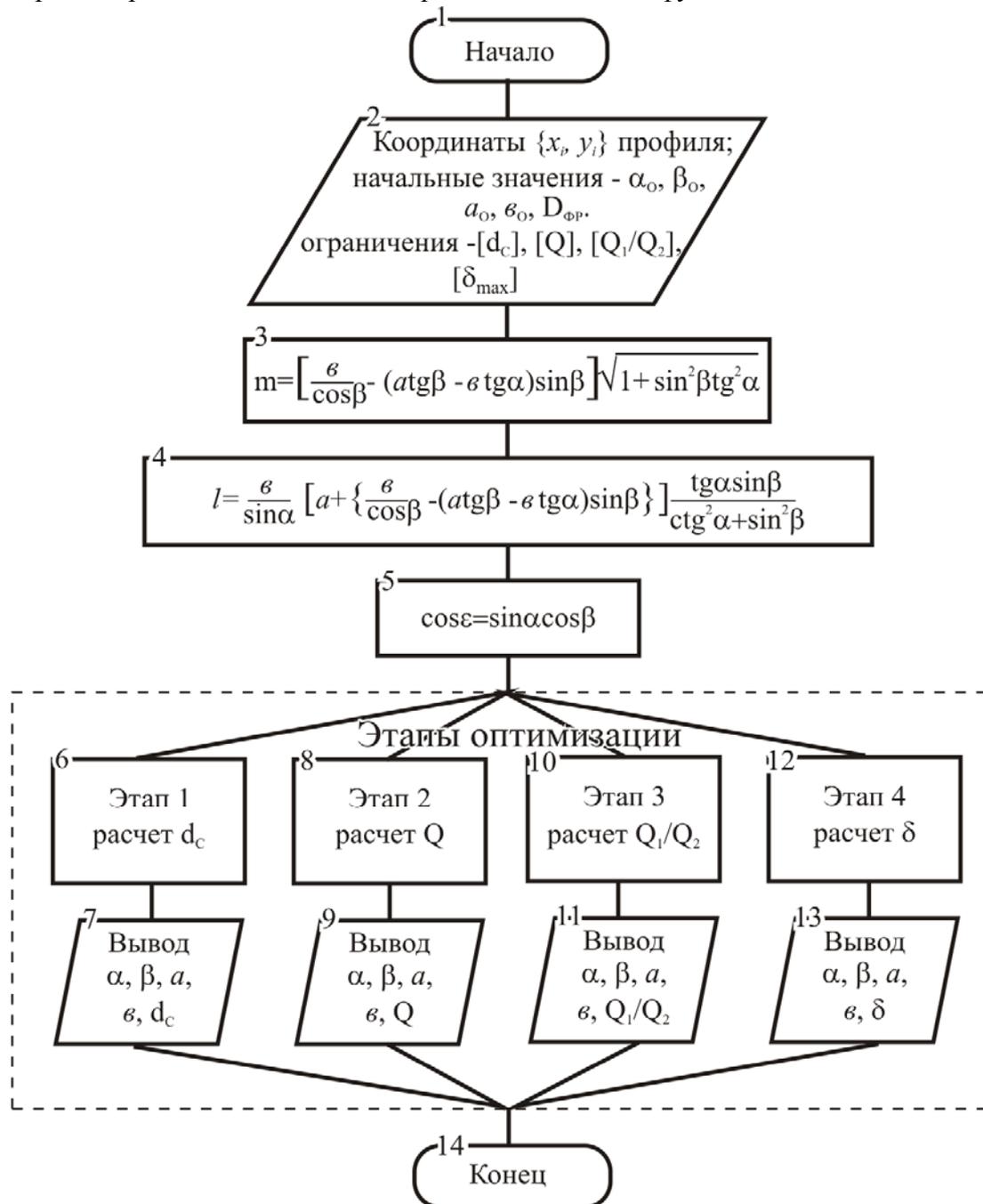


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма целевой функции

На первом этапе целевая функция направляет процесс оптимизации на минимизацию выражения:

$$|d_{cj} - [d_c]|, \tag{4}$$

где из рисунка 4 $d_{cj} = \sqrt{x_{03}^2 + y_{03}^2} - \rho_{03}$, ρ_{03} – радиус окружности с центром O_3 .

На втором этапе целевая функция направляет процесс оптимизации на минимизацию выражения:

$$|Q_j - [Q]|, \quad (5)$$

где: Q_j - расчетный центральный угол профиля (рисунок 4),

$[Q]$ - заданный центральный угол профиля.

На третьем - на минимизацию выражения:

$$\left| \frac{Q_{1j}}{Q_{2j}} - \left[\frac{Q_1}{Q_2} \right] \right|. \quad (6)$$

Для определения углов Q_{1j} , Q_{2j} необходимо сначала установить положение центра O_i (рисунок 4) окружности аппроксимирующей полученный профиль, в секторе которой лежит отрезок, соединяющий центр этой окружности и ось детали. Для случая, приведенного на рисунке 4, это - окружность с центром O_3 .

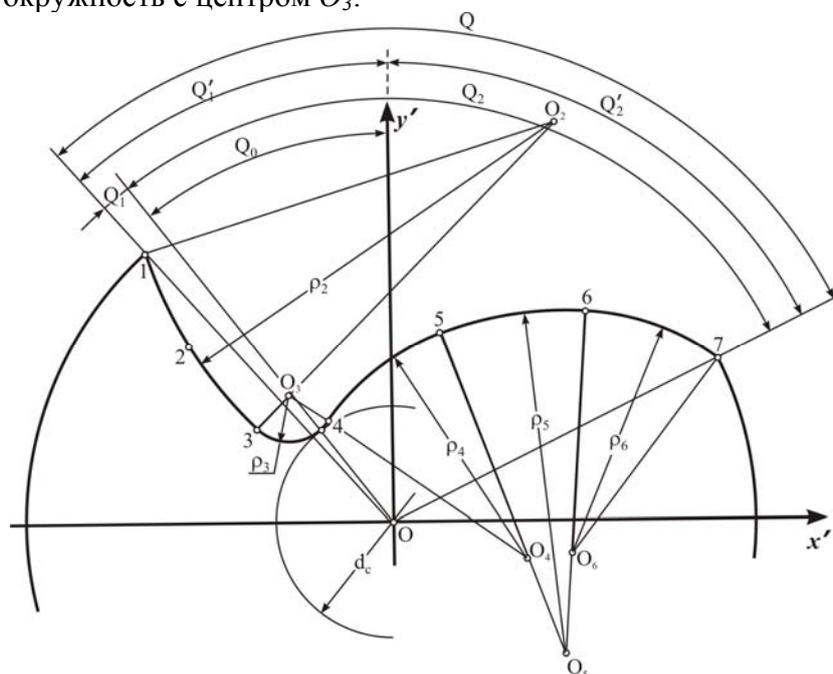


Рисунок 4 – К определению расчетных параметров dc , Q , Q_1/Q_2 торцевого сечения

Таким образом:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_1' - Q_{03}}{Q_2' - Q_{03}}, \quad tg = \frac{x'_{03}}{y'_{03}},$$

где: x'_{03} , y'_{03} – координаты центра O_3 .

На последнем, четвертом, этапе осуществляется переход к целевой функции, связанной с вычислением отклонения δ расчетного профиля от заданного и минимизацией этой величины.

Расчленение процесса оптимизации на четыре этапа и установка для каждого своего набора целевых функций позволили значительно ускорить достижение конечной цели оптимизации и сократить время расчета на ЭВМ.

Кроме того, поэтапная оптимизация позволяет получить удовлетворительные результаты в тех случаях, когда оптимизация в один этап по окончательной целевой функции удовлетворительных результатов не дает.

В этом методе итерации осуществляются по системе уравнений (7), записанной в соответствии с обозначениями, принятыми в теории математического программирования [84]:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{k+1} = x_k - \beta_k A_k \varphi'(x_k) \\ A_{k+1} = A_k + \frac{r_k r_k^T}{\langle r_k, q_k \rangle} - \frac{(A_k, q_k)(A_k, q_k)^T}{\langle A_k, q_k \rangle}, A_0 = E \\ r = x_{k+1} - x_k, q_k = \varphi'(x_{k-1}) - \varphi'(x_k) \\ \beta_k = \arg \min \{ \psi(\beta) = \varphi(x_k) - \beta A_k \varphi'(x_k) : \beta \geq 0 \\ k = 0, 1, \dots \end{array} \right. \quad (7)$$

На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма, который реализует данный метод.

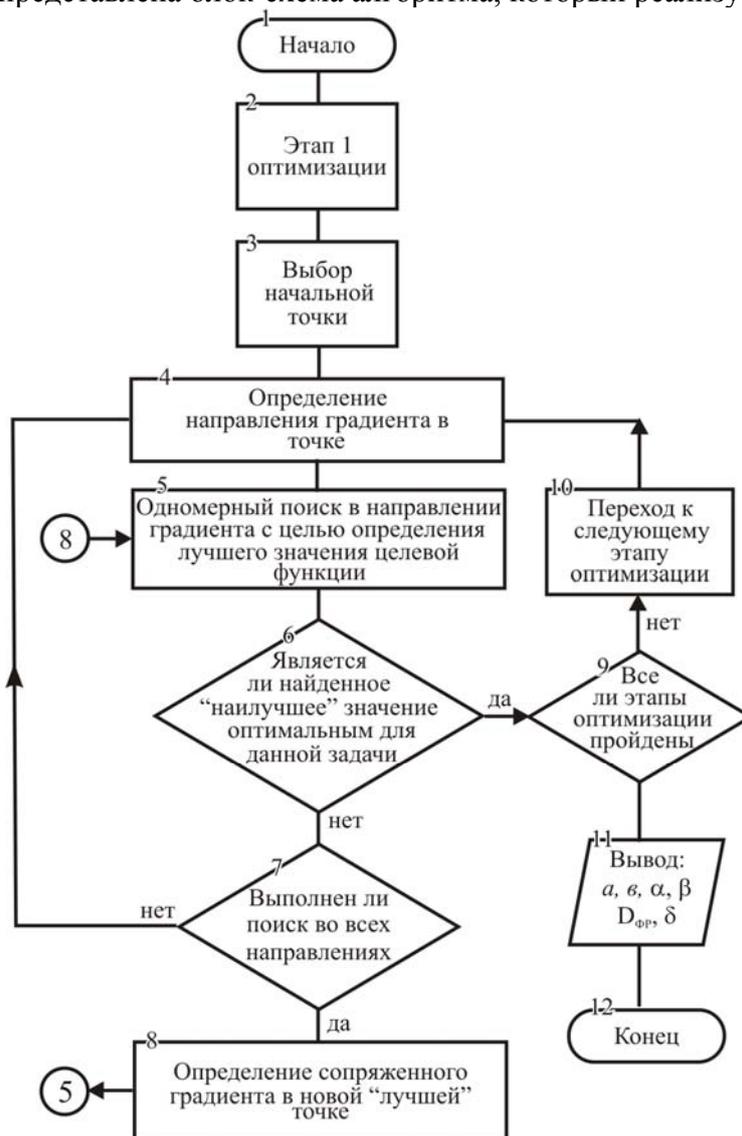


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма оптимизации методом Дэвидона-Флетчера-Пауэлла

Сначала в пространстве проектирования выбирают начальную точку, затем, вычисляя составляющие вектора градиента, определяют направление поиска. Поиск начинается вдоль линии наискорейшего спуска. Одновременно поиск ведется вдоль исходного направления в соответствии со схемой. Найдя одномерный минимум, проверяют результат на сходимость по выполнению условия (8):

$$(A) \cdot \langle \varphi'(x_k) - \varphi'(y_k), x - y \rangle > O \forall x, y \in E_n, x \neq y. \quad (8)$$

Если сходимость достигнута, поиск прекращают. В противном случае для дальнейшего поиска выбирают новое направление, используя новую матрицу A_k . Определив новое направление, проводят одномерный поиск и продолжают итерационный процесс.

При выполнении данного алгоритма поиск после первой попытки ведется в тех направлениях, в которых целевая функция в ближайшей окрестности имеет значения, приближающиеся к оптимальным.

Указанное качество метода Дэвидона-Флетчера-Пауэлла позволяет обходить трудности, связанные с разрывами в производных пространствах проектирования.

По данным [8], этот метод является наиболее эффективным из всех градиентных методов и, кроме того, в отличие от них, дает полную информацию о кривизне поверхности целевой функции в точке минимума. Эти обстоятельства обусловили целесообразность его использования для решения данной задачи.

На рисунках *ба*, *б*, *в*, *г* приведены результаты компьютерного моделирования обработки винтовой канавки на заготовке концевой фрезы с использованием в качестве инструмента стандартной концевой фрезы.

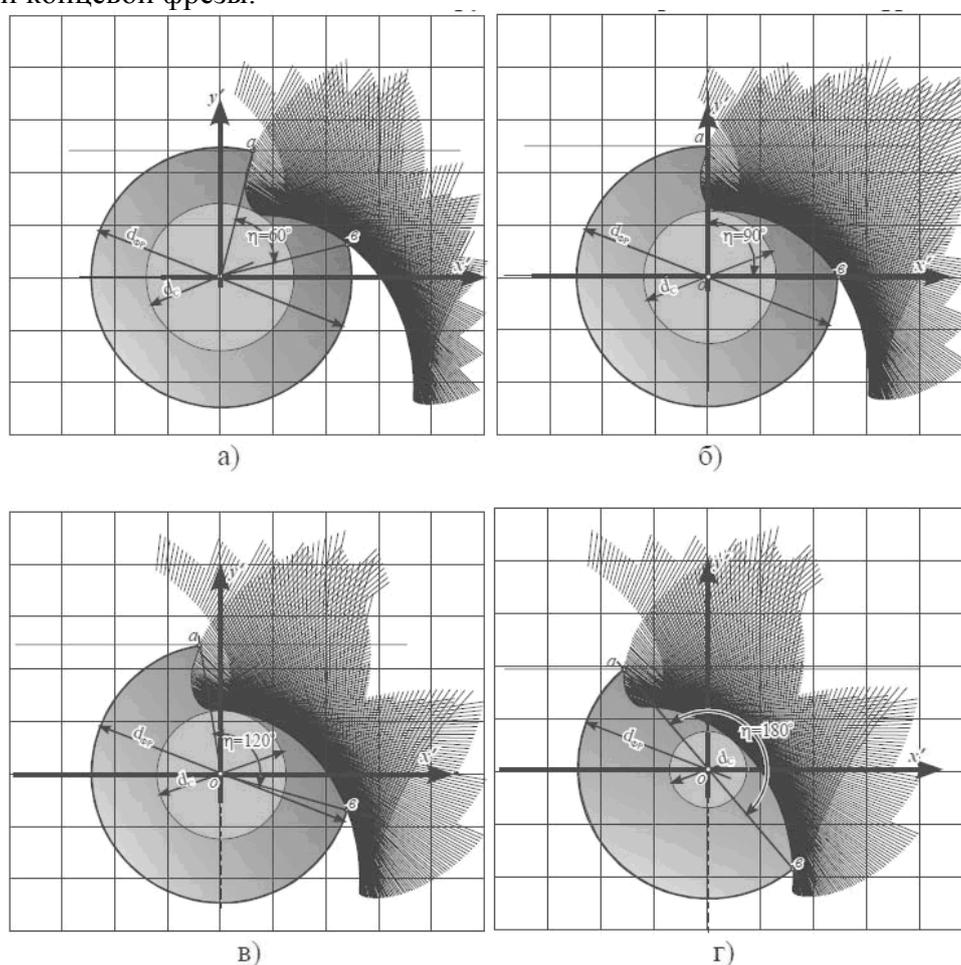


Рисунок 6 – Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки концевой фрезы с числом зубьев $Z=6$ (а); с $Z=4$ (б); с $Z=3$ (в) ; с $Z=2$ (г)

Профиль винтовой канавки – *ав* – получается как огибающая проекций прямолинейных режущих кромок инструмента на плоскость торцевого сечения в системе координат, приведенной на рисунке 3.

На рисунке *ба* приведено формирование профиля концевой фрезы с числом зубьев $Z=6$ (центральный угол $\eta=60^\circ$); на рисунке *бб* приведено формирование профиля концевой фрезы с числом зубьев $Z=4$ (центральный угол $\eta=90^\circ$); на рисунке *бв* приведено формирование про-

филя концевой фрезы с числом зубьев $Z=3$ (центральный угол $\eta=120^\circ$); на рисунке 6г приведено формирование профиля концевой фрезы с числом зубьев $Z=2$ (центральный угол $\eta=180^\circ$).

С использованием разработанного алгоритма были получены параметры установки и диаметр концевой фрезы для обработки винтовых поверхностей: зенкеров, метчиков и концевых фрез.

На рисунке 7 приведена фотография обработки винтовой поверхности заготовки концевой фрезой с помощью концевой фрезы.

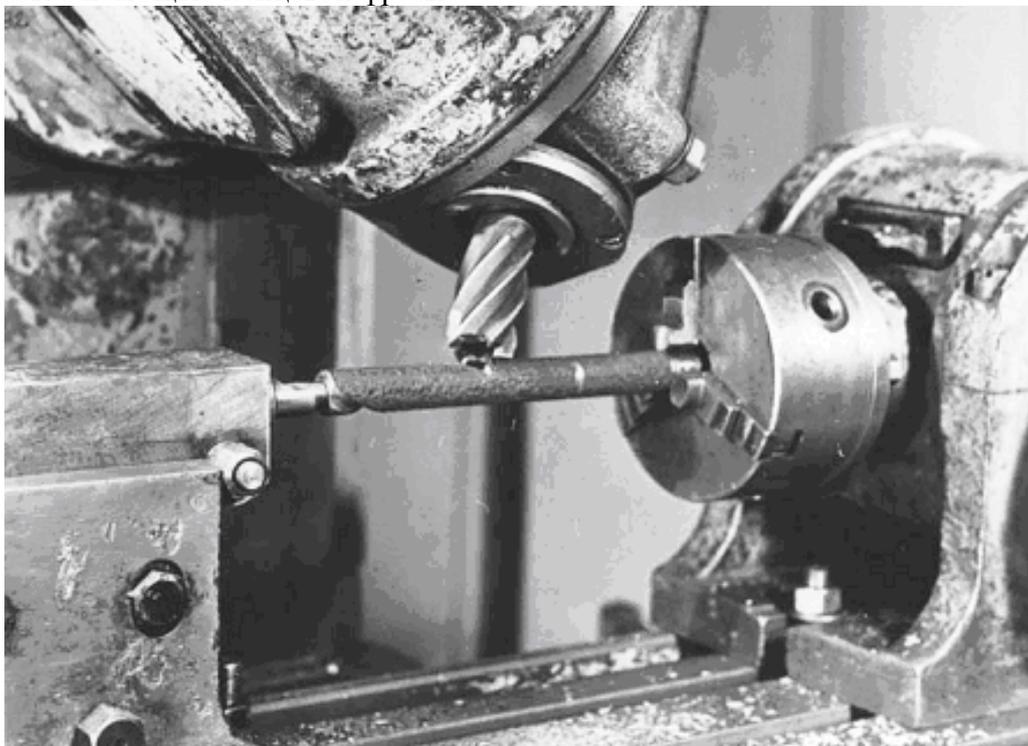


Рисунок 7 – Обработка фасонной винтовой поверхности концевой фрезой

Литература

1. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ. ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – 542с.: ил.
2. Петухов Ю.Е. Проектирование инструментов для обработки резанием деталей с фасонной винтовой поверхностью на стадии технологической подготовки производства. /Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/. - М.: МГТУ «Станкин», 2004.-393с.
3. Петухов Ю.Е. Формообразование численными методами. – М.: «Янус-К», 2004. – 200 с.
4. Истоцкий В. В. Принципы современного проектирования режущей части фасонных инструментов с учетом особенностей их изготовления на заточных станках с ЧПУ. Известия ТулГУ. Сер. Технология машиностроения. Вып. 2. - Тула:
5. Щегольков Н.Н. Итерационное профилирование винтовой поверхности изделия по заданному профилю инструмента // СТИН. - 2001. - №3.-С. 21 -24.
6. Емельянов С.Г., Куц В.В. Корректировка положения сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез // СТИН.–2000. – №4. – с.11–12
7. Фельдштейн Е.Э. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора/ Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039с. : ил.
8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство. Пер. с англ. – А. :Мир, 1982. – 238с.
9. Колесов Н.В., Петухов Ю.Е. Система контроля сложных кромок режущих инструментов.

Технология упрочнения поверхности путем создания неоднородной структуры при азотировании в тлеющем разряде

к.т.н. Рамазанов К. Н., к.т.н. доц. Агзамов Р.Д.
Уфимский государственный авиационный технический университет
+73472730763

Аннотация. Рассматривается способ упрочнения поверхности путем создания регулярной неоднородной структуры при азотировании в тлеющем разряде. Представлены экспериментальные результаты влияния эффекта полого катода на структуру и микротвердость в различных зонах обрабатываемой поверхности при импульсном режиме обработки.

Ключевые слова: упрочнение поверхности, ионно-плазменное азотирование, полый электрод

Актуальность работы

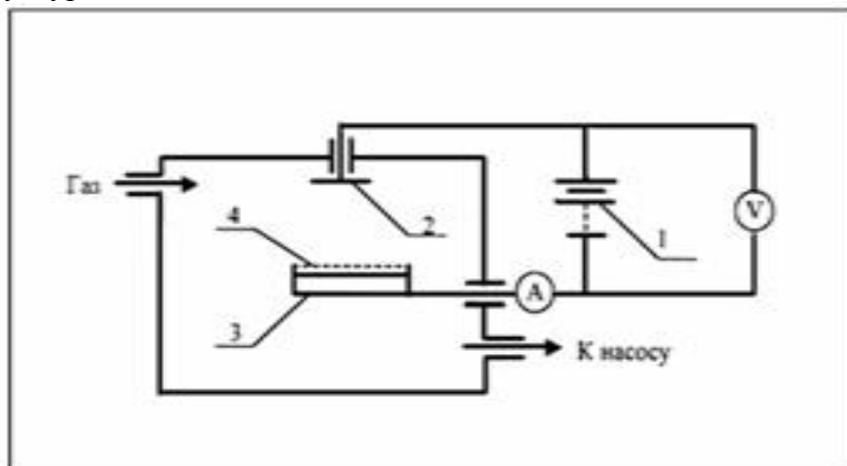
На современном этапе развития машиностроения актуальным является разработка наукоемких и ресурсосберегающих технологий, позволяющих в одном материале сочетать различные физические свойства (высокая прочность, высокая коррозионная и износостойкость, высокие антифрикционные свойства и др.).

Перспективным направлением является создание регулярных макроскопических градиентов структурно - фазового состояния в результате применения дифференцированных обработок, позволяющих получать чередование в заданной последовательности прочных и пластичных объемов металла. Это достигается воздействием механических, тепловых, энергетических и других полей, локализуемых в отдельных участках или слоях по объему металла [1-5].

Целью данной работы является упрочнение поверхности различных сталей и сплавов, путем создания регулярной неоднородной структуры при азотировании в тлеющем разряде.

Методика проведения исследований

Эксперименты проводились на модернизированной установке ЭЛУ-5 (рисунок 1), которая была переоборудована в установку для проведения процессов создания регулярной неоднородной структуры.



**Рисунок 1 – Устройство для реализации способа получения неоднородной структуры:
1 – источник питания; 2 – анод; 3 – катод (деталь); 4 – экран**