

шие значения работы выхода электрона и могли привести к некоторому снижению этой величины.

Необходимо отметить, что ни в одном случае не были отмечены значения работы выхода электрона меньшие, чем у компонентов сплава. В то же время известно, что образование на поверхности катода металлопленочной системы приводит к значительному снижению величины работы выхода электрона за счет прикатодного скачка потенциала [9].

В работе [5] жаропрочный сплав системы $Nb - Mo - Ti - Zr - C$ подвергали кратковременному нагреву в вакууме ($p=10^{-4} - 10^{-3}$ Па, $T = 2000^{\circ}C$, $\tau = 5$ мин) и резко охлаждали до $1100^{\circ}C$, в результате чего на поверхности катода образовалась моноатомная пленка циркония и работа выхода электрона металлопленочного катода становилась равной 3,20-3,24 эВ, что меньше ее значений не только для ниобия, но и для циркония.

Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность применения многокомпонентных сплавов на основе тугоплавких металлов взамен катодов ТЭП из чистых металлов или их малолегированных сплавов, не обладающих высокой жаропрочностью.

Литература

1. Мальцев М.В. Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. «Металлургия», М., 1971, 489 с. с илл.
2. Моргунова Н.Н., Клыпин Б.А. и др. Сплавы молибдена. «Металлургия», М., 1975, 392 с. с илл.
3. Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В. Металловедение вольфрама. «Металлургия», М., 1978, 224 с. с илл.
4. Справочник по конструкционным материалам. «МГТУ им. Н.Э. Баумана», М., 2005, 637 с. с илл.
5. Арзамасов В.Б., Смирнова Э.Е. Принцип жаропрочного легирования и термоэмиссионные свойства сплавов. В сб. «Металловедение, термическая и химикотермическая обработка сплавов». «МГТУ им. Н.Э. Баумана», М., 2003, 226-232.
6. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов «Наукова думка» К., 1981, 486 с. с илл.
7. Арзамасов В.Б., Смирнова Э.Е., Строев А.А., Полунов И.Л. Влияние легирования и структурного состояния на термоэмиссию и жаропрочность ниобия. Известия МГТУ «МАМИ», №2 (4), М., 2007, 136-140.
8. Буров И.В., Литвак Л.Н. Физико-химическое исследование термоэмиссионных свойств металлов и сплавов. В сб. «Физико-химия редких металлов», «Наука», М., 1972, 106-107
9. Физические методы исследования металлов. Справочник «Машиностроение», М., 1971, 552 с. с илл.

Улучшение геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности детали в процессе прошивания на основе усовершенствования конструкции режущего инструмента

к.т.н. Бекаев А.А., к.т.н. Щедрин А.В., к.т.н. Скоромнов В.М.
МГТУ «МАМИ»

Введение

Повышение производительности операций металлообработки и качества выпускаемой продукции с одновременным снижением ее себестоимости является одной из важнейших задач производства.

За последние годы в машиностроении были сделаны определенные шаги по обеспечению требуемого качества обрабатываемой поверхности детали. В то же время при повышении требований к получаемому качеству поверхностного слоя вопрос достижения этого качества остается одним из актуальнейших вопросов современного машиностроения.

Как установлено большинством исследователей [1...5 и др.], занимающимися вопросами повышения качества обрабатываемой поверхности в процессе протягивания (прошива-

ния), одной из основных причин, ухудшающих качество поверхности детали, являются механические колебания технологической системы. Возникающие колебания обусловлены действием ряда различных динамических факторов, протекающих в зоне резания при контакте режущего зуба инструмента с обрабатываемой поверхностью детали.

Так, в работах [2...4] Кочетковым Я.П. и Кочетковым Ю.А. была составлена система дифференциальных уравнений n_{-20} порядка, описывающих процесс протягивания. На основании полученных уравнений была построена методика расчета радиальных деформаций зубьев круглой протяжки по моментной теории оболочек вращения, основанной на гипотезе о неизменяемости нормального элемента в процессе нагружения.

В данных работах зуб протяжки рассматривается как часть конической оболочки линейно-переменной толщины, по напряженному состоянию которой составляются системы дифференциальных уравнений. Решением систем дифференциальных уравнений является определение величин радиальных деформаций в точках, лежащих на срединной плоскости зуба, которые практически соответствуют деформациям режущей кромки.

Однако, ввиду сложности вычислений (решение громоздких систем дифференциальных уравнений), а также значительного расхождения экспериментальных и расчетных величин, авторы данных работ смогли лишь сделать результирующий вывод о том, что предлагаемая методика расчета может быть использована для определения величин радиальных деформаций зубьев круглой протяжки в условиях протягивания, только очень близких к идеальным.

В работе [5] Крутяковой М.В. при использовании метода конечных элементов было проведено математическое моделирование поведения режущего зуба в процессе протягивания и получены соответствующие результаты, на основании которых даны рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров режущих зубьев круглых и шлицевых протяжек. Однако, вследствие отсутствия экспериментальной проверки (адекватности) полученных математических моделей, возможно лишь констатировать, что полученные результаты расчета и приводимые на их основе рекомендации являются исключительно теоретическими, а значит, недостаточно точно могут отражать реально протекающие процессы.

В работе [1] Бекаевым А.А. были проведены исследования по изучению механизма совместного влияния динамических процессов, возникающих в технологической системе при протягивании (прошивании), на качество обрабатываемой поверхности детали. С этой целью Бекаевым А.А. была разработана обобщенная математическая модель процесса протягивания (прошивания), состоящая из математической модели процесса формообразования обрабатываемой поверхности детали и математической модели динамических процессов, протекающих в типовом гидроприводе протяжного оборудования. Полученные математические модели были экспериментально проверены, что подтверждает их адекватность [1].

На основании полученных результатов исследований обобщенной математической модели в работе [1] были разработаны соответствующие рекомендации по снижению негативного воздействия различных динамических факторов (ударная нагрузка, непостоянные геометрические параметры качества поверхности заготовки, нестабильная скорость привода) на получаемые геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности детали в процессе протягивания (прошивания). При этом, в соответствии с поставленной целью указанной работы, основное внимание было уделено рекомендации, связанной со стабилизацией скорости движения привода протяжного оборудования на процессах врезания/выбега режущих зубьев в/из обрабатываемого отверстия детали за счет установки дроссельного регулятора расхода на выходе из штоковой полости силового гидроцилиндра.

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод о том, что в рассмотренной работе основное внимание уделялось исследованиям, связанным с совместным влиянием различных динамических факторов, возникающих как в зоне резания при контакте режущего зуба инструмента с обрабатываемой поверхностью, так и в приводе протяжного оборудования. На основе полученных результатов автором работы [1] были даны соответ-

вующие рекомендации, связанные с модернизацией прошивочного пресса.

Однако ввиду того, что за рамки поставленной в работы [1] цели выходили вопросы, связанные с исследованиями влияния параметров режущего инструмента на качество обработанной поверхности детали, появляется необходимость в проведении дополнительных исследований по расширенному изучению влияния геометрических параметров режущего инструмента на получаемое качество обрабатываемой поверхности детали на основе ранее разработанной и экспериментально проверенной в работе [1] математической модели процесса формообразования.

Результаты подобных исследований позволят расширить представления о влиянии геометрических параметров режущего зуба на качество получаемой поверхности детали и дать соответствующие рекомендации по улучшению геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности отверстия детали.

В соответствии с вышеуказанным, целью настоящей работы является улучшение геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности детали на основе усовершенствования (модернизации) конструкции режущего инструмента.

Анализ возникновения неровностей на обрабатываемой поверхности детали при постоянной скорости привода и идеальной поверхности заготовки

Для достижения поставленной в настоящей работе цели проведем анализ возникновения неровностей на обрабатываемой поверхности при постоянной скорости привода и идеальной исходной поверхности заготовки. Другими словами, не учитывая влияние геометрических параметров качества поверхностного слоя заготовки и нестабильность скорости движения привода, проведем исследования влияния геометрических параметров режущего зуба инструмента на получаемые параметры качества обрабатываемых поверхностей деталей, изготовленных из углеродистой стали 45.

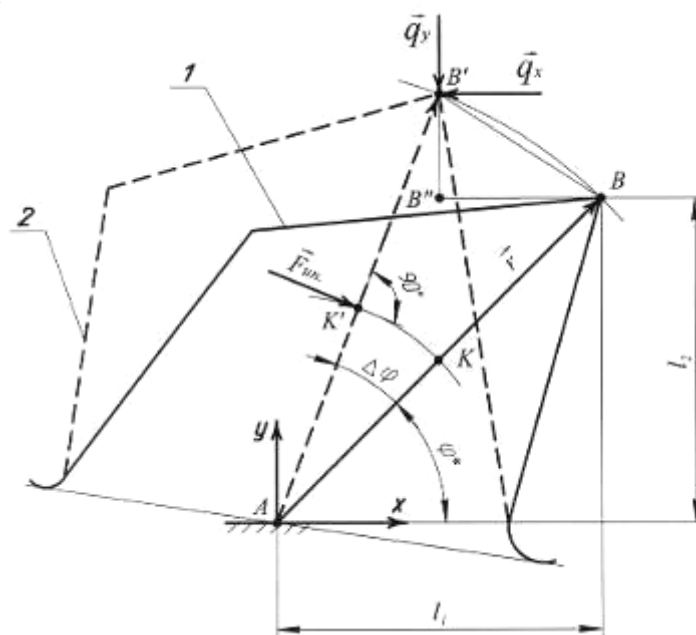


Рис. 1. Расчетная схема нагружения режущего шлица шлицевой прошивки силами, возникающими в процессе резания:

- 1 – равновесное положение режущего зуба инструмента (до процесса врезания или после выбега вершины режущей кромки из обрабатываемого отверстия детали);**
- 2 – отклонение вершины режущей кромки от равновесного положения под действием сил, возникающих в процессе резания.**

Для проведения этих исследований, как было отмечено ранее (см. введение), удобно воспользоваться математической моделью процесса формообразования, полученной в работе

[1]. Данная математическая модель была разработана на основе принципа Даламбера (согласно расчетной схеме, приведенной на рисунке 1), а при ее создании были приняты следующие допущения [1]:

- Считаем тело инструмента (без учета зубьев прошивки) – как абсолютно жесткий стержень;
- Считаем зубья прошивки абсолютно упругими (не учитываем пластическую деформацию зубьев в процессе резания);
- Не учитываем внутреннее (молекулярное) трение в материале зубьев;
- Считаем износ зубьев прошивки в процессе обработки равным нулю;
- Не учитываем влияние остаточных напряжений на упругую усадку обрабатываемого отверстия;
- Пренебрегаем температурными колебаниями, возникающими при резании.

Согласно работе [1] система уравнений, описывающих поведение вершины режущей кромки зуба инструмента в процессе резания, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{2 \cdot \left[q_{x_i} \cdot r \cdot \sin(\varphi^* + \varphi_i) - q_{y_i} \cdot r \cdot \cos(\varphi^* + \varphi_i) - \frac{E \cdot b \cdot s^3}{12 \cdot r} \cdot \varphi_i \right]}{m \cdot r^2} \\ \frac{d\varphi_i}{dt} = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

где: m – масса шлица зуба инструмента, равномерно распределенная по длине r рассматриваемой балки;

r – длина радиуса – вектора AB ;

E – модуль упругости первого рода, учитывающий материал режущего зуба;

b – ширина шлица;

s – приведенная толщина зуба (среднее значение толщины зуба);

$q_{x_i} \cdot r \cdot \sin(\varphi^* + \varphi_i) - q_{y_i} \cdot r \cdot \cos(\varphi^* + \varphi_i)$ – изгибающие моменты, возникающие от сил резания,

$q_{x_i}; q_{y_i}$ – соответственно осевая и радиальная составляющие суммарной силы резания:

$$q_{x_i} = 1,15 \cdot \sum b \cdot (C_1 \cdot a_{Z_i}^{0,85} + C_2 \cdot k - C_3 \cdot \gamma^\circ - C_4 \cdot \alpha^\circ) \cdot g, \quad (2)$$

$$q_{y_i} = 1,15 \cdot \sum b \cdot (C_5 \cdot a_{Z_i}^{1,2} - C_6 \cdot \gamma^\circ - C_7 \cdot \alpha^\circ) \cdot g, \quad (3)$$

здесь: $\sum b$ – суммарный периметр резания рассматриваемого шлица;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

k – количество стружкоразделительных канавок, расположенных на рассматриваемом шлице зуба;

$\gamma^\circ; \alpha^\circ$ – соответственно передний и задний углы зуба инструмента;

$C_1 \dots C_7$ – коэффициенты, отражающие влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на силы резания;

a_{Z_i} – толщина срезаемого слоя в i_{-oi} точке отверстия детали:

$$a_{Z_i} = S_z - h_i + H_{i-1}, \quad (4)$$

где: S_z – подъем на зуб, заложенный конструктивно в схему резания инструмента;

h_i – суммарная высота неровностей заготовки в i_{-oi} точке отверстия детали;

H_{i-1} – суммарная высота неровностей в $i-1$ -ой точке обрабатываемого отверстия.

На основании вышеизложенного проведем с помощью представленной математической модели исследование процесса формообразования на примере чернового и чистового прошивания прямобочного шлицевого профиля паза в обрабатываемом отверстии детали втулки карданного вала.

Начальными данными (входные параметры для моделирования) для процесса расчета являются следующие величины:

Черновое прошивание.

Параметры чернового режущего шлицевого зуба прошивки:

- Инструментальный материал – быстрорежущая сталь P6M5;
- Модуль упругости материала зуба $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;
- Геометрические параметры:
 - Расстояние от точки A до точки B (рисунок 1):
 - в осевом направлении $l_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 - в радиальном направлении $l_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 - Радиус – вектор $r = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 - Ширина шлица $b = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 - Приведенная (средняя) толщина зуба $s = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 - Угловые параметры:
 - Передний угол $\gamma^\circ = 20^\circ$;
 - Задний угол $\alpha^\circ = 3^\circ$;
 - Нормативный угол наклона зуба к оси инструмента $\varphi^* = 45^\circ$;
 - Начальная угловая скорость отклонения вершины зуба $\omega = 0$;
 - Начальное угловое отклонение вершины зуба инструмента $\varphi = 0$;
 - Количество стружкоразделительных канавок шлица $k = 0$;
 - Масса одного режущего шлица $m = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$;
 - Число режущих шлицев одного зуба $z = 8$.

Параметры обрабатываемого отверстия:

- Обрабатываемый материал – Сталь 45;
- Твердость $\left(HB = 220 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right)$;
- Номинальный диаметр отверстия заготовки $D_{\text{заг.}} = 62 \text{ мм}$;
- Номинальный диаметр отверстия детали $D_{\text{дет.}} = 62,3 \text{ мм}$;
- Исходная неровность детали (для первоначального значения a_z) $H = 0$;
- Длина обрабатываемого отверстия втулки $L = 155 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

Параметры процесса резания:

- Подъем на зуб $S_z = 0,15 \text{ мм}$;
- Суммарный периметр резания $\sum b = 4,3 \text{ мм}$;
- Величина подвода инструмента $L_{\text{подвода}} = 0$.

Параметры расчета:

- Начальное время расчета $t = 0$;
- Общее время расчета $t_{\text{общ.}} = 10$ с;
- Шаг расчета $\Delta t = 10^{-6}$ с;
- Число дифференциальных уравнений $n = 2$.

Чистовое прошивание.

Параметры чистового режущего илищевого зуба прошивки:

- Инструментальный материал – быстрорежущая сталь P6M5;
- Модуль упругости материала зуба $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- Геометрические параметры:
 - Расстояние от точки A до точки B (рисунок 1):
 - в осевом направлении $l_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м;
 - в радиальном направлении $l_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м.
 - Радиус – вектор $r = 7 \cdot 10^{-3}$ м;
 - Ширина шлица $b = 4 \cdot 10^{-3}$ м;
 - Приведенная (средняя) толщина зуба $s = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м;
 - Угловые параметры:
 - Передний угол $\gamma^\circ = 10^\circ$;
 - Задний угол $\alpha^\circ = 1^\circ$;
 - Нормативный угол наклона зуба к оси инструмента $\varphi^* = 45^\circ$;
 - Начальная угловая скорость отклонения вершины зуба $\omega = 0$;
 - Начальное угловое отклонение вершины зуба инструмента $\varphi = 0$;
 - Количество стружкоразделительных канавок шлица $k = 0$;
 - Масса одного режущего шлица $m = 1,6 \cdot 10^{-3}$ кг;
 - Число режущих шлицев одного зуба $z = 8$.

Параметры обрабатываемого отверстия:

- Обрабатываемый материал – Сталь 45;
 - Твердость $\left(HB = 220 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right)$;
- Номинальный диаметр отверстия заготовки $D_{\text{заг.}} = 62$ мм;
- Номинальный диаметр отверстия детали $D_{\text{дет.}} = 62,1$ мм;
- Исходная неровность детали (для первоначального значения a_z) $H = 0$;
- Длина обрабатываемого отверстия втулки $L = 155 \cdot 10^{-3}$ м;

Параметры процесса резания:

- Подъем на зуб $S_z = 0,05$ мм;
- Суммарный периметр резания $\sum b = 4,1$ мм;
- Величина подвода инструмента $L_{\text{подвода}} = 0$.

Параметры расчета:

- Начальное время расчета $t = 0$;

- Общее время расчета $t_{общ.} = 10$ с;
- Шаг расчета $\Delta t = 10^{-6}$ с;
- Число дифференциальных уравнений $n = 2$.

В результате математического моделирования чернового и чистового процессов шлифования, протекающих при постоянной скорости привода (для данного примера величина скорости выбиралась по нормативному справочнику режимов резания [6] и составляла $V = 3,5 \text{ м/мин}$) и идеальной исходной поверхности заготовки (высота неровностей поверхности заготовки – отклонения от номинального диаметра заготовки – соответствовала $h_i = 0$), были получены данные, представленные графически на рисунках 3 и 4.

При анализе полученных результатов выявлено влияние на получаемое качество обрабатываемой поверхности тех же процессов, что и в работе [1], а именно – в начальный момент процесса врезания режущего зуба в поверхность детали вследствие упругих свойств инструментального материала режущего зуба происходит некоторое отклонение (упругая деформация) радиуса – вектора $\vec{r}$ (рисунок 2) от его положения равновесия, т.е. от положения, которое занимал зуб до врезания.

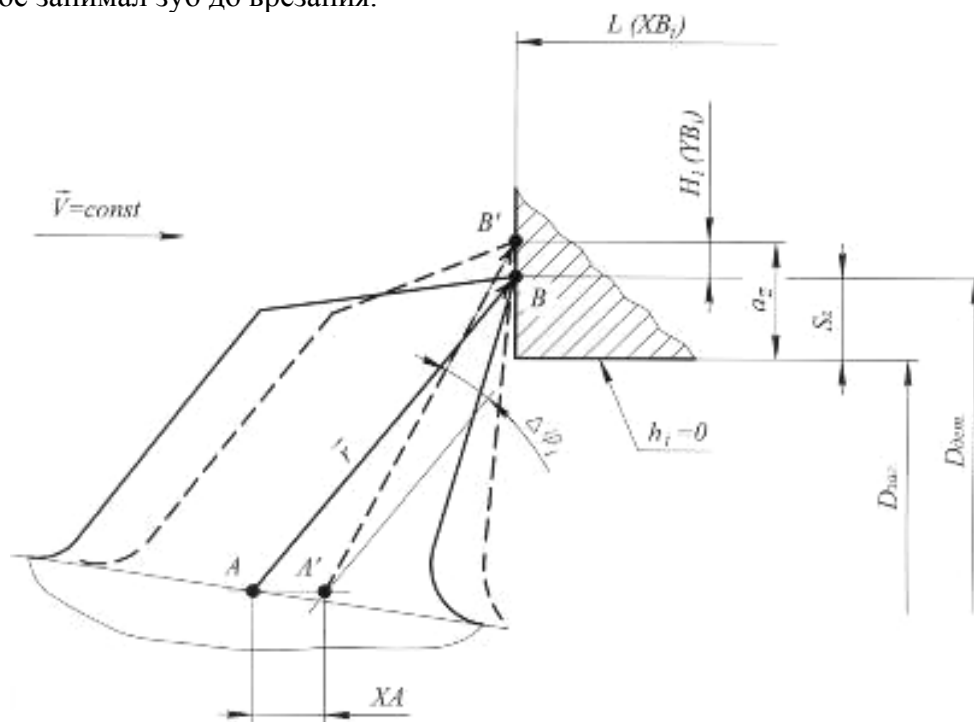


Рис. 2. Эскиз процесса обработки при врезании режущего зуба инструмента в обрабатываемое отверстие с исходной высотой неровностей $h_i = 0$ и постоянной скоростью движения привода $V = 3,5 \text{ м/мин}$.

Это деформация вызвана тем, что силы межмолекулярного взаимодействия между молекулами обрабатываемого материала оказываются больше, чем силы, действующие на деталь со стороны режущего зуба (силы резания q_x и q_y). В этот момент, за счет упругой деформации режущего зуба, происходит некоторое изменение толщины срезаемого слоя ($a_z > S_z$) до тех пор, пока напряжение, возникающее внутри режущего зуба не создаст достаточные усилия, необходимые для разрыва межмолекулярных связей в обрабатываемом материале [2...4].

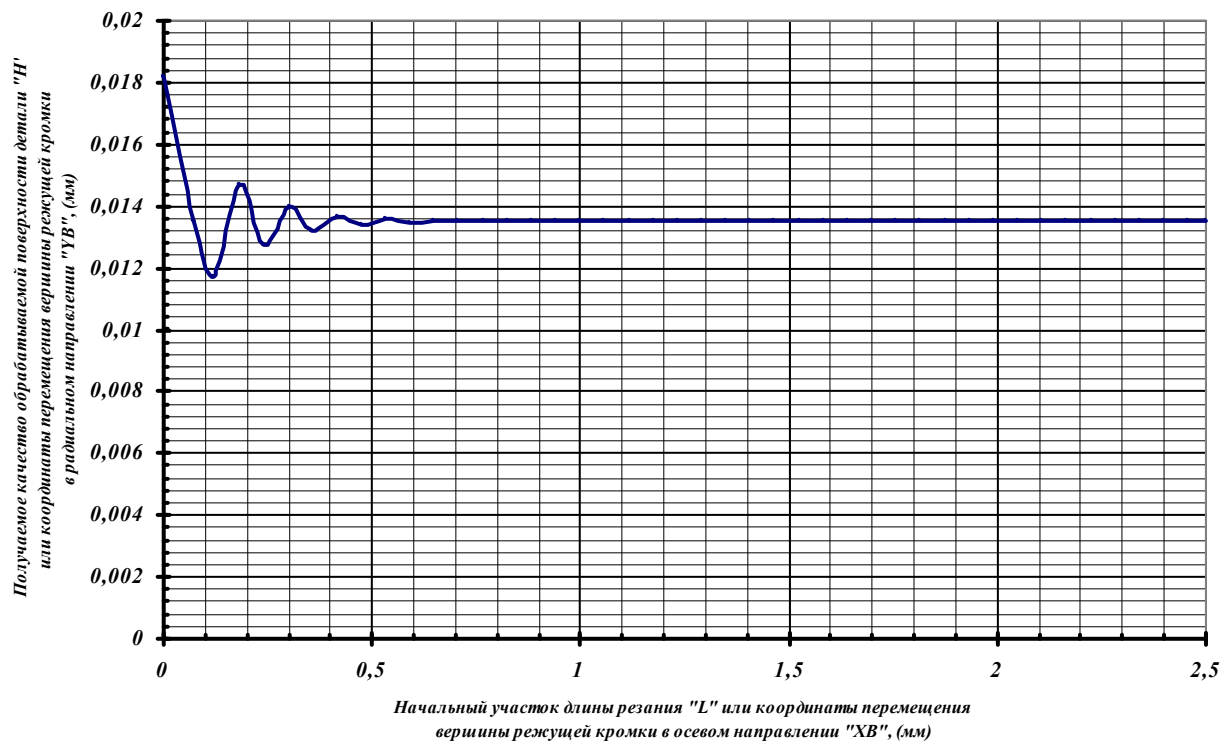


Рис. 3 – Формообразование обрабатываемой поверхности детали при наличии ударной нагрузки в начале процесса резания (режим чернового прошивания).

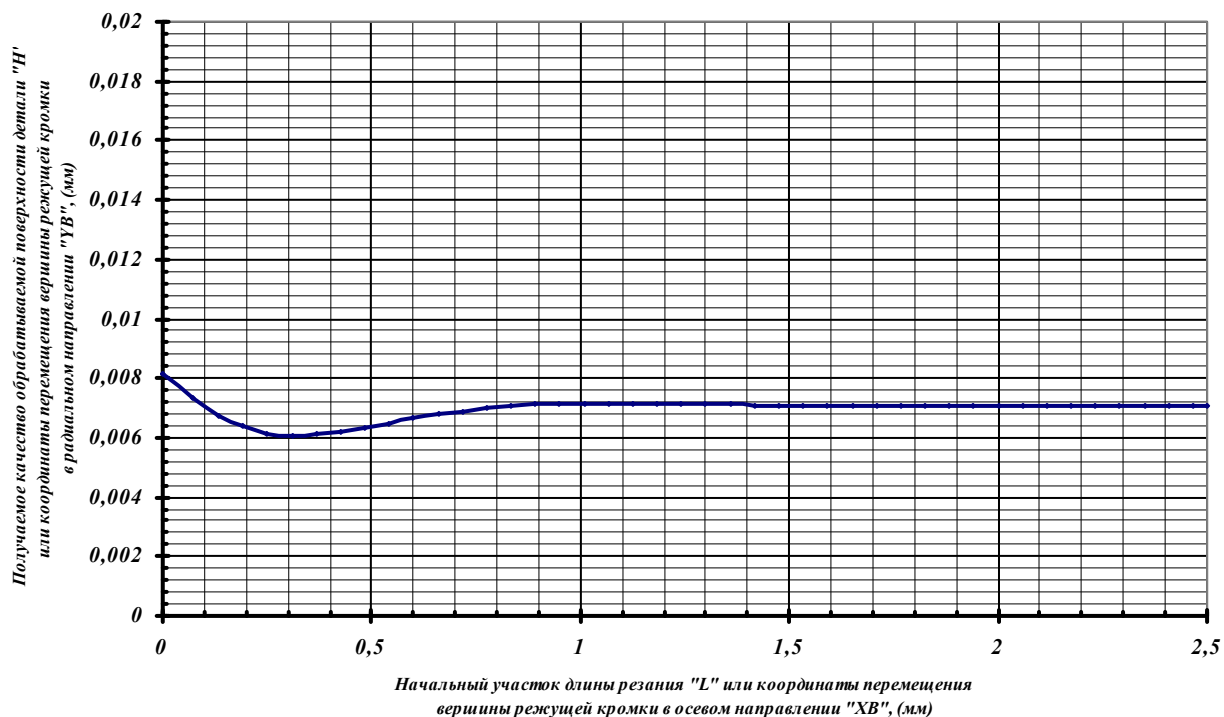


Рис. 4 – Формообразование обрабатываемой поверхности детали при наличии ударной нагрузки в начале процесса резания (режим чистового прошивания).

В результате изменения толщины срезаемого слоя величина сил резания будет также изменяться (с увеличением толщины срезаемого слоя усилия резания будут возрастать). Под

действием возросших сил резания происходит процесс снятия припуска (процесс стружкообразования).

По мере продвижения режущего зуба поверхность детали упруго-пластически деформируется в радиальном и осевом направлениях. Так, с удалением режущей кромки зуба от входного торца деформация детали уменьшается, что связано с увеличением сил упругости обрабатываемого материала (возрастает упругое сопротивление). Это вызывает затухание колебаний в технологической системе, обусловленных врезанием режущего зуба инструмента в обрабатываемое отверстие детали.

Как видно из рисунков 3 и 4, процесс врезания завершается тогда, когда устанавливается относительное равновесие между силами резания и силами упругости обрабатываемого материала. Другими словами, в результате неравенства усилий резания и сил упругости обрабатываемого материала, возникают вынужденные колебания технологической системы. Возникшие колебания с течением времени динамически уравниваются.

Для рассмотренных примеров процесс резания можно считать стабилизированным (установившимся), если:

- При черновом прошивании деталей (рисунок 3) соблюдается условие $H_{уст.(черн.)} = 0,0135 \text{ мм}$ и $XB \geq 0,64 \text{ мм}$;
- При чистовом прошивании деталей (рисунок 4) соблюдается условие $H_{уст.(чист.)} = 0,00707 \text{ мм}$ и $XB \geq 1 \text{ мм}$.

Таким образом, рассмотренный процесс прошивания можно представить как неустойчивый процесс резания, обусловленный возникновением вынужденных колебаний технологической системы, вследствие действия ударной нагрузки в начале процесса врезания, что приводит к ухудшению обрабатываемой поверхности вблизи входного торца отверстия детали.

Рекомендации по улучшению геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности детали при прошивании

Проведенный анализ полученных результатов расчета математической модели процесса формообразования (при идеальной исходной поверхности заготовки и постоянной скорости привода) показал, что процесс возникновения вынужденных колебаний технологической системы, обусловленный действием ударной нагрузки в начале процесса резания и свойствами технологической системы (физико-механическими свойствами инструментального и обрабатываемого материалов, геометрическими и угловыми параметрами режущего зуба), приводит к ухудшению качества обрабатываемой поверхности на начальном участке длины резания (образование сколов, задиров и др. вблизи входного торца отверстия детали).

На основании результатов проведенных исследований можно дать следующие рекомендации, связанные с усовершенствованием (модернизацией) конструкции режущего инструмента. Основными из них являются:

- Для уменьшения колебаний вершины режущего зуба инструмента, целесообразно в качестве инструментального материала использовать более твердый режущий материал (материал с большим модулем упругости);
- Для получения требуемого номинального диаметра детали $D_{дет.}$, целесообразно уменьшить (занизить) в процессе резания диаметр режущего зуба $D_{зуба}$ на удвоенную величину отклонения его режущей кромки $H_{уст.}$ (рисунок 5).

Так, для обеспечения получения номинального диаметра отверстия детали после чернового прошивания номинальный диаметр черновых режущих зубьев инструмента должен быть равен $D_{зуба(черн.)} = D_{дет.} - 2 \cdot H_{уст.(черн.)}$, а для получения номинального диаметра отверстия детали после чистового прошивания номинальный диаметр чистовых режущих зубьев инст-

румента должен быть равен $D_{\text{зуба(чист.)}} = D_{\text{дет.}} - 2 \cdot H_{\text{уст.(чист.)}}$.

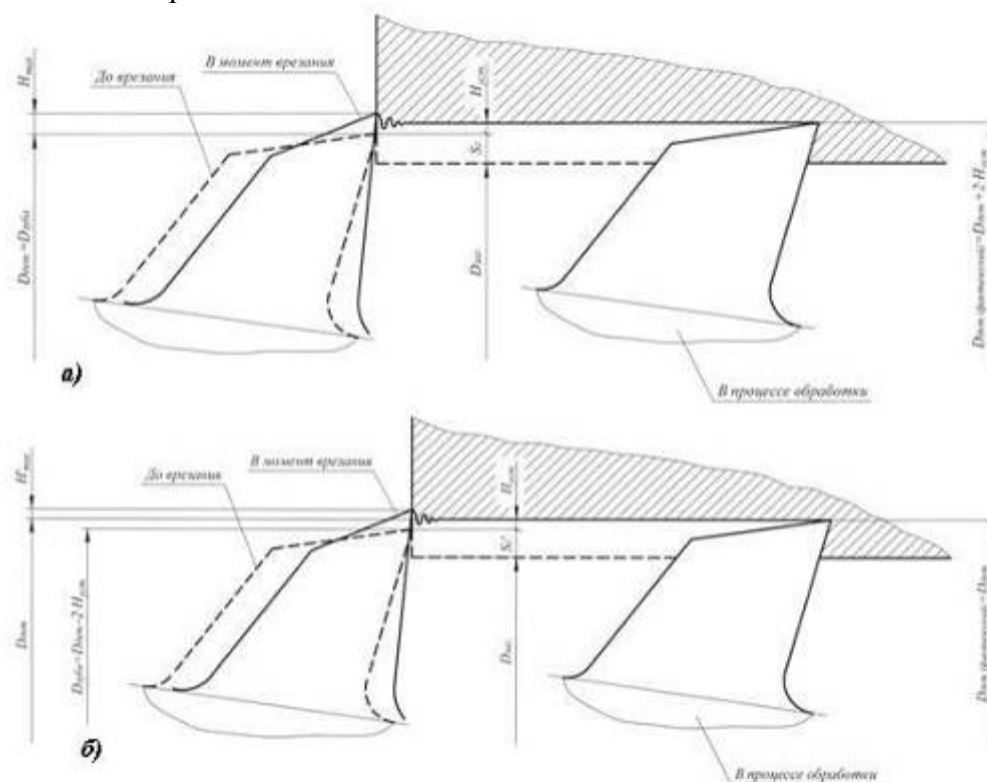


Рис. 5 – Эскиз процесса обработки:

а) без модернизации режущего инструмента;

б) после модернизации (занижения вершины зуба) режущего инструмента.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Обзор научно-технических источников выявил, что одной из основных причин, ухудшающих качество обрабатываемой поверхности детали при прерывистом резании, являются механические колебания технологической системы. Возникающие колебания обусловлены действием ряда факторов, возникающих в зоне резания при контакте режущего зуба инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Основным из этих факторов является ударная нагрузка, возникающая в момент врезания режущего зуба в обрабатываемую деталь.

В результате математического моделирования процесса формообразования обрабатываемых поверхностей деталей, изготовленных из углеродистой стали 45, подтверждено существенное влияние указанного фактора на получаемые геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности детали.

На основании результатов исследований математической модели процесса формообразования даны следующие рекомендации по снижению негативного воздействия вышеуказанного явления на получаемые геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности детали при прошивании:

- Для уменьшения колебаний вершины режущего зуба инструмента целесообразно в качестве инструментального материала использовать более твердый режущий материал (материал с большим модулем упругости);
- Для получения требуемого номинального диаметра детали $D_{\text{дет.}}$ целесообразно уменьшить (занизить) диаметр режущего зуба $D_{\text{зуба}}$ на удвоенную величину отклонения его режущей кромки $H_{\text{уст.}}$ в процессе резания.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены рекомендации по повышению качества обрабатываемой поверхности детали в процессе прошивания за счет усовершенствования (модернизации) конструкции режущего инструмента.

Литература

1. Бекаев А.А. Повышение геометрических параметров качества обрабатываемой поверхности детали в процессе протягивания (прошивания) на основе совершенствования динамических характеристик привода оборудования: Диссерт. канд. техн. наук. Москва. 2006 – 274 с.
2. Кочетков Я.П., Кочетков Ю.А. Осевые деформации зубьев круглой протяжки при врезании в заготовку // Станки и инструмент. – 1971. №4 – с. 28-30.
3. Кочетков Я.П., Кочетков Ю.А. Деформации зубьев круглой протяжки в радиальном направлении // Станки и инструмент. – 1972. №10 – с. 20-23.
4. Кочетков Я.П., Кочетков Ю.А. Взаимосвязь осевых и радиальных деформаций зубьев круглой протяжки // Рукопись деп. в РЖ ВИНТИ 10.12.75. №128-75 – 12 с.
5. Крутякова М.В. Повышение эффективности протягивания на основе оптимизации конструкции инструмента путем математического моделирования: Диссерт. канд. техн. наук. Москва. 2004 – 260 с.
6. Режимы резания металлов: Справочник /Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.Д. Корчемкин и др./ Под. ред. А.Д. Корчемкина. – М.: НИИТавтопром, 1995 – 456 с.

Биполярный электрод как инструмент реализации синергетических принципов управления процессом электрохимической обработки деталей машин

д.т.н., проф. Вячеслава О.Ф., Потапов В.Н.
МГТУ «МАМИ», ФГУП НПО «Техномаш»

Введение

Электрохимическая размерная обработка занимает особое место в технологических процессах деталей машин, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов, таких как титановые, нержавеющие жаропрочные сплавы. Она находит широкое применение в обработке деталей двигателей аэрокосмической техники, транспорта, химическом машиностроении и др.

Управление процессом электрохимической обработки (ЭХО) с целью обеспечения заданных выходных параметров деталей представляет собой в техническом отношении сложную и трудоемкую задачу. В последнее время в технологии ЭХО для обеспечения деталей заданными эксплуатационными характеристиками начинают применять принципы синергетики [1]. При этом между эксплуатационными свойствами деталей и технологическими параметрами процесса устанавливается взаимосвязь через некие интегральные критерии технологической системы. К ним можно отнести такие критерии, как гидродинамический критерий ЭХО $H_{\text{эхо}}$, критерий диффузионного потока D_i , миграционного потока M_i , конвективного потока C_{oi} .

Размерная электрохимическая обработка протекает в условиях температурной, химической, кинематической неоднородностей, следствием чего является самоорганизация различных потоков энергии: электрической, тепловой, массы, химической и т.п. Как показал анализ подсистем, влияющих на протекание процесса ЭХО [2,3], каждая из них находится во взаимодействии друг с другом, формируя «выходные» технологические характеристики размерной ЭХО: точность процесса, его производительность и шероховатость поверхности деталей. Сложную задачу увязки всех подсистем дает возможность существенно упростить синергетический подход, позволяющий из всех «переменных» процесса вычленив лишь одну, а все остальные выражать через так называемый параметр порядка [4-6]. Таким параметром по-