

ному. При увеличении силы статического прижима и уменьшении величины подачи наблюдается закономерность повышения микротвёрдости, остаточных сжимающих макронапряжений и глубины наклёпа. При этом в первом случае изменение носит параболический характер, во втором – экспоненциальный, а в третьем – линейный. Таким образом, внутренняя совместимость физико-механических характеристик имеет прямо пропорциональный нелинейный характер.

Управление качеством поверхностного слоя изделий предлагается осуществлять посредством использования полученных регрессионных уравнений для расчёта параметров шероховатости и прогнозировать соответствующие ей физико-механические характеристики на основе установленной корреляционной связи между ними после ультразвуковой обработки.

Литература

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Боровин Ю.М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГИУ, 2005.
3. Ким Чанг Сик. Технологические и структурные закономерности ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки конструкционных и инструментальных материалов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГИУ, 2005.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
5. Колеватов В.В. Повышение качества упрочнения деталей из титановых сплавов путём применения комбинированной обработки поверхностным пластическим деформированием и микродуговым оксидированием (на примере деталей центробежных насосов). Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МГТУ «МАМИ», 2003.

Сравнительная оценка погрешности при шлифовании колец подшипников

д.т.н. проф. Колтунов И.И.

МГТУ «МАМИ»

8 (495) 223-05-23, доб. 1506, iik@mami.ru

Аннотация. В статье рассмотрена методика выбора схемы шлифования на этапе проектирования операции. Разработана математическая модель процесса шлифования кольца подшипника. Получены численные значения величины погрешности обработки внутренних поверхностей колец подшипников для различных схем шлифования.

Ключевые слова: подшипники качения, кольца, шлифование, погрешности, математическая модель, графы, система координат, опорные точки, сравнительная оценка, элементы технологической системы.

Подшипники качения являются основным видом опор вращающихся и качающихся деталей машин и механизмов различного целевого назначения. Совершенствование машин - увеличение сроков службы, повышение скоростей и производительности, снижение габаритов и веса, а также повышение точности - требует дальнейшего улучшения конструкций подшипников качения и совершенствования технологических процессов их изготовления.

При чистовой обработке внутренних поверхностей деталей вращения наибольшее распространение имеет процесс шлифования. Применяют три схемы шлифования: внутреннее

патронное, бесцентровое методом поперечной подачи на роликах, бесцентровое на жестких опорах, каждая из которых отличается моделью станка, номенклатурой приспособлений, формой абразивного круга, режимами резания, а следовательно и погрешностью обработки.

Для выбора схемы шлифования на этапе проектирования операции необходимо установить такое взаимное расположение поверхностей контакта элементов технологической системы (станка, приспособления, инструмента и детали) и законов их относительного движения, которое обеспечивает заданную погрешность обработки.

Погрешность обработки произвольной точки поверхности кольца следует определять как разность радиус-векторов действительного положения точки контакта шлифовального круга и обрабатываемой поверхности кольца: $\{\delta\} = \{\rho_{шк}\} - \{\rho_д\}$ (рисунок 1).

Погрешность обработки $\{\delta\}$ может быть разложена на геометрическую и эксплуатационную составляющие. Геометрическую погрешность, образующуюся в результате проявления погрешностей размерных цепей, отклонений форм и положений поверхностей элементов технологической системы, для каждой схемы шлифования можно определить по классам точности используемого при выполнении операции оборудования, приспособления и инструмента. Эксплуатационную погрешность, образующуюся в результате проявления возмущений от собственных и контактных деформаций в элементах технологической системы шлифования, можно определить как разность взаимных перемещений элементов технологической системы от системы внешних воздействий в процессе шлифования, приведенную к точке контакта шлифовального круга и кольца.

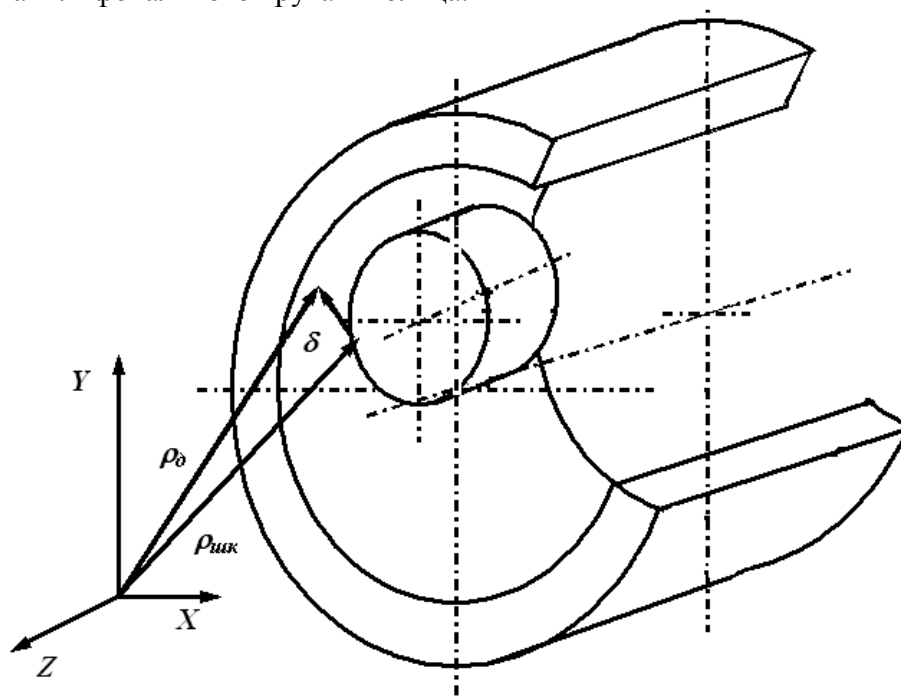


Рисунок 1 – Схема образования погрешности шлифования

Для определения составляющих погрешности сформирован граф расчета взаимного расположения элементов технологической системы. Каждой из вершин графа соответствует локальная трехмерная система координат какого-либо элемента технологической системы, а дуги графа определяют матрицы перехода между этими системами координат (рисунок 2).

На графе определены следующие системы координат – вершины графа: XYZ_c – система координат шлифовального станка (глобальная система координат); $XYZ_{бшк}$ – система координат бабки шлифовального круга; $XYZ_{сбд}$ – система координат суппорта бабки детали; $XYZ_{бвк}$ – система координат бабки ведущего круга; $XYZ_{шшк}$ – система координат шпинделя шлифовального круга; $XYZ_{шд}$ – система координат шпинделя детали; $XYZ_{швк}$ – система координат

шпинделя ведущего круга; XYZ_n – система координат патрона; XYZ_{nl} – система координат планшайбы; XYZ_{pol} – система координат первой радиальной опоры; XYZ_{pon} – система координат n -ой радиальной опоры; XYZ_{ool} – система координат первой осевой опоры; XYZ_{oot} – система координат m -ой осевой опоры; XYZ_n – система координат ножа; $XYZ_{шк}$ – система координат шлифовального круга; XYZ_d – система координат детали; $XYZ_{вк}$ – система координат ведущего круга; $tnb_{шк}$ – сопровождающий трехгранник точки контакта шлифовального круга; tnb_d – сопровождающий трехгранник точки контакта кольца; $tnb_{вк}$ – сопровождающий трехгранник точки контакта ведущего круга.

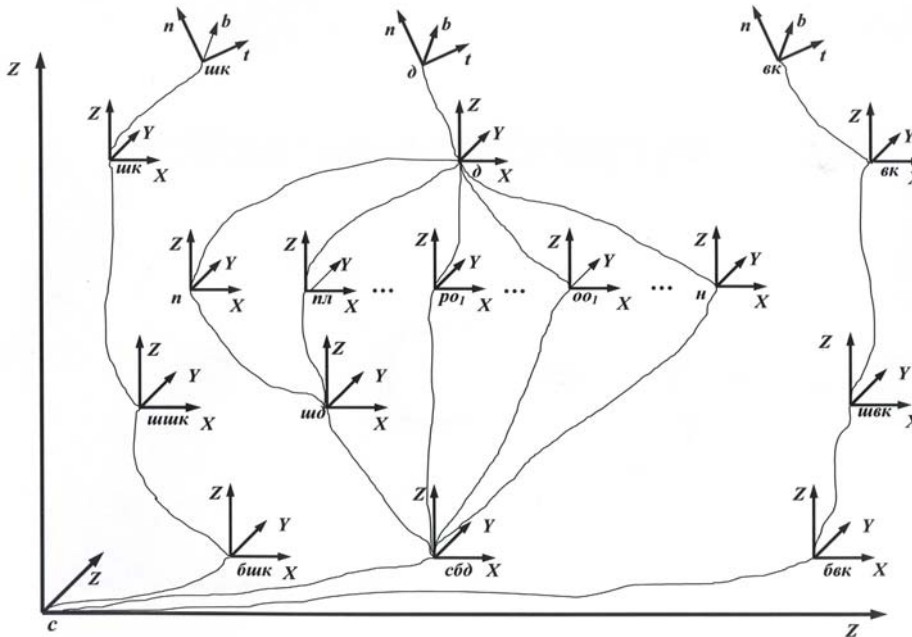


Рисунок 2 – Граф координатных систем технологической системы шлифования

Дуги графа описывают связи между перечисленными системами координат с использованием матриц перехода. Положение каждой локальной системы координат XYZ_k в глобальной системе координат XYZ определяется через положение начала координат O_k k -го звена $\{a\} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ и углы поворота $\{\varphi\} = [\varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T$ относительно координатных осей XYZ . Переход из одной системы координат XYZ_i (“старой”) в другую XYZ_{i+1} (“новую”) осуществляется перемножением трех матриц относительных поворотов “старой” системы координат относительно осей “новой” на соответствующие углы и матрицы поступательных перемещений начала координат [1]:

$$[M]_{XYZ_i - XYZ_{i+1}} = [M_x] \cdot [M_y] \cdot [M_z] \cdot [M_u] = [w_x(\varphi_x)] \cdot [w_y(\varphi_y)] \cdot [w_z(\varphi_z)] \cdot [a]$$

где: $[M_x], [M_y], [M_z]$ – матрицы вращения координатной системы XYZ_{i+1} относительно осей X, Y, Z системы координат XYZ_i ;

$[M_u]$ – матрица перемещений начала координат системы XYZ_{i+1} относительно начала координат XYZ_i .

Положение точек контакта шлифовального и ведущего кругов, шлифовального круга и обрабатываемого кольца описано подвижными системами координат, связанными с трехгранниками Френе (далее сопровождающими трехгранниками) [2]. Для этого контактирующие поверхности кольца, шлифовального и ведущего кругов были представлены в виде произвольных криволинейных поверхностей, однозначно описанных семейством образующих $G(x,y,z)$ и направляющих $F(x,y,z)$ кривых. Сопровождающий трехгранник точки контакта кольца, шлифовального или ведущего круга определен единичными векторами главной нор-

мали n_o , бинормали b_o и касательной t_o кривой в точке контакта M_o .

Поверхности обрабатываемого кольца и шлифовального круга могут быть описаны матрицами координат опорных точек x_i, y_i, z_i . Перемещение от одной опорной точки к другой может быть задано как перемещение по траектории с заданными радиусами кривизны и кручения.

Положение сопровождающего трехгранника tnb относительно оси шлифовального круга $M_{шк}$ или кольца M_k задается элементами матрицы:

$$M_{шк,к} = \begin{pmatrix} \cos(t_{шк,к}X) & \cos(n_{шк,к}X) & \cos(b_{шк,к}X) & x_{шк,к} \\ \cos(t_{шк,к}Y) & \cos(n_{шк,к}Y) & \cos(b_{шк,к}Y) & y_{шк,к} \\ \cos(t_{шк,к}Z) & \cos(n_{шк,к}Z) & \cos(b_{шк,к}Z) & z_{шк,к} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где: $\cos(tX), \cos(nX), \cos(bX), \dots, \cos(bZ)$ - косинус угла между осями t и X, n и X, b и X, \dots, b и Z соответственно;

x, y, z – положение начала координат сопровождающего трехгранника в системе координат шлифовального круга или кольца

Моделирование процесса шлифования кольца осуществляется перемещением подвижного трехгранника $tnb_{шк}$, связанного с инструментом, относительно трехгранника tnb_k , связанного с обрабатываемой поверхностью. Взаимное расположение данных трехгранников определяет погрешность операции шлифования обрабатываемой поверхности в опорных точках.

Перемещение между опорными точками шлифовального круга и внутренней поверхности кольца подшипника может быть описано матрицей $M_t(t)$, определяющей текущее положение сопровождающего трехгранника шлифовального круга в системе координат обрабатываемого кольца. Элементы матрицы $M_t(t)$ являются функциями времени t :

$$M_t(t) = \begin{pmatrix} L_t(t) & R_t(t) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где: $L_t(t)$ - матрица направляющих косинусов преобразования системы координат шлифовального круга $tnb_{шк}$ в координаты системы внутренней поверхности кольца tnb_n ;

$R_t(t) = [t_t, n_t, b_t]$ - вектор, определяющий положение центра трехгранника шлифовального круга $tnb_{шк}$ в системе координат внутренней поверхности кольца tnb_n .

По выражению (1) определяются текущие координаты поверхности обрабатываемого кольца с учетом геометрических погрешностей технологической системы шлифования.

Погрешность шлифования с учетом геометрических и эксплуатационных факторов следует определять в глобальной системе координат с учетом малых поворотов и малых смещений, образующихся в элементах технологической системы от собственных и контактных деформаций:

$$\{\delta\} = \left(\prod_{k=1}^{n_k} [M']_{k-1,k} - \prod_{k=1}^{n_k} [M]_{k-1,k} \right) \{\rho_k\}. \quad (2)$$

Здесь:

$$[M]_{k,k-1} = \begin{bmatrix} & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ & & & & & & & & & & & ! \\ 0 & & & & 0 & & & & 0 & & & ! \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$\{\rho_k\}$ - радиус-вектор произвольной точки поверхности k -го элемента технологической системы в собственной системе координат;

$\{\psi_1\} = [\psi_{1x}, \psi_{1y}, \psi_{1z}]^T$, $\{P_{\delta 1}\} = [P_{\delta 1x}, P_{\delta 1y}, P_{\delta 1z}]^T$; $\{\psi_2\} = [\psi_{2x}, \psi_{2y}, \psi_{2z}]^T$, $\{P_{\delta 2}\} = [P_{\delta 2x}, P_{\delta 2y}, P_{\delta 2z}]^T$ - вектор-столбцы, соответственно, малых поворотов и малых смещений, образующиеся в результате проявления погрешностей размерных цепей, отклонений форм и положений поверхностей; проявления возмущений от собственных и контактных деформаций;

$\psi_{1x}, \psi_{1y}, \psi_{1z}, \dots, P_{\delta 1x}, P_{\delta 1y}, P_{\delta 1z}, \dots$ - соответственно, составляющие малых вращений «новых» осей координат относительно старых осей координат и проекции на «старые» оси смещений «нового» начала координат;

$[M']$ - матрица, получаемая из матрицы $[M]$ при $\{\psi_1\} = \{P_{\delta 1}\} = \{\psi_2\} = \{P_{\delta 2}\} = 0$ и характеризующая заданное положение опорных точек внутренней поверхности кольца.

Первая составляющая выражения (2) описывает идеальное, а вторая - реальное положение обработанной поверхности кольца.

Реализация разработанной модели сводится к установлению функциональных зависимостей между относительными поворотами и перемещениями координатных систем элементов технологической системы шлифования.

Адекватность разработанной модели производилась путем численной и экспериментальной оценки влияния схемы шлифования внутренней цилиндрической поверхности на погрешность формы.

Для исследований было выбрано кольцо подшипника с номинальным внешним диаметром кольца $D = 210$ мм, внутренним диаметром $d = 177$ мм, шириной - 152 мм. Материал кольца - сталь ШХ15, $\sigma_B = 740$ МПа, $\sigma_T = 420$ МПа, НВ=185. Материал кольца считался изотропным, подчиняющимся обобщенному закону Гука. Температурные напряжения при расчетах не учитывались.

Перемещения опорных точек внутренней поверхности кольца рассчитывались по матричному уравнению метода конечных элементов [3]:

$$\{U\} = [K]^{-1} \{F\},$$

где: $\{F\}$ - вектор-столбец внешних сил в опорных точках; $[K]^{-1}$ - матрица податливости кольца.

Варьируемыми факторами при исследовании являлись сила закрепления заготовки Q и сила резания F . По результатам расчетов для разных схем шлифования получены численные значения величины погрешности формы по профилю внутренней поверхности кольца (рисунок 3). Наибольшие значения погрешности получены при патронном шлифовании внутренней поверхности кольца. Меньшие значения погрешности соответствуют схеме шлифования на жестких опорах. Результаты численных экспериментов сопоставимы с экспериментальными исследованиями погрешности бесцентрового шлифования [4, 5].

Разработанная модель может быть использована для сравнительной оценки погрешности обработки внутренних поверхностей наружных колец подшипников в зависимости от свойств элементов технологической системы на этапе проектирования операции шлифования.

Литература

1. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ.- М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
2. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник.- Л.:Машиностроение, 1985. – 263 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. - 392с.
4. Филькин В.П., Колтунов И.Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М.: Машиностроение, 1971. –204с.

5. Колтунов И.И. Динамическая модель процесса шлифования сферических поверхностей колец подшипников // Автомобильная промышленность, №2, 2001 г.

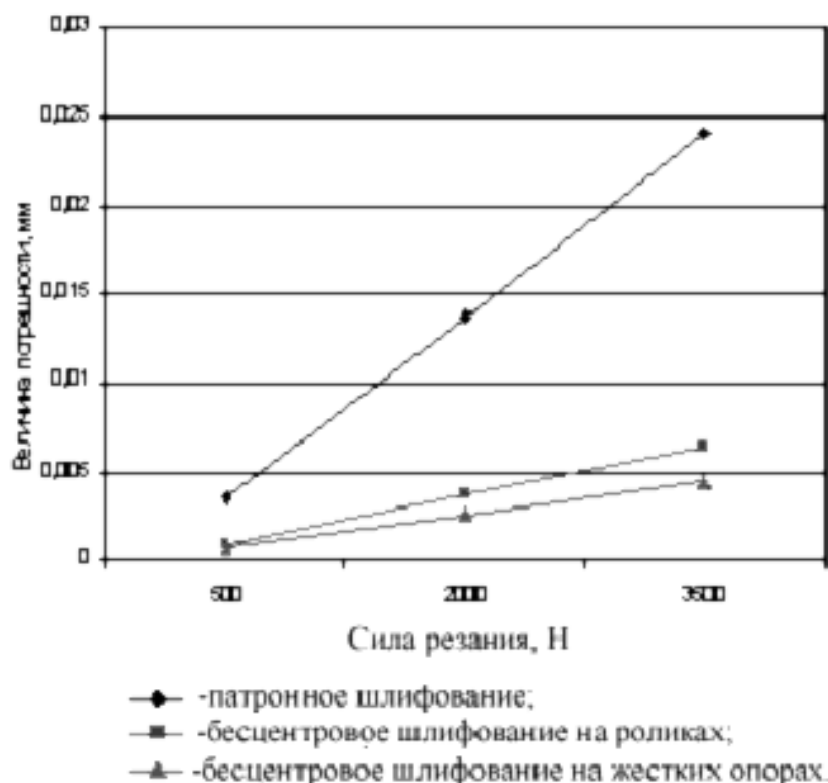


Рисунок 3 – Погрешность формы внутренней цилиндрической поверхности кольца в зависимости от силы резания

Зависимость точности шлифования от параметров наладки

д.т.н. проф. Колтунов И.И., к.т.н. проф. Лобанов А.С.

МГТУ «МАМИ»

8 (495) 223-05-23, доб. 1506, iik@mami.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования и подробный анализ зависимости точности формы дорожки качения наружного кольца двухрядного роликового подшипника от наладочных параметров при обработке шлифованием чашечными кругами на врезание.

Ключевые слова: точность, шлифование, параметры наладки, математическая модель.

Одной из наиболее сложных проблем при обработке дорожек качения колец является обеспечение заданной точности формы обрабатываемых поверхностей. К дорожкам качения наружных колец двухрядных роликовых подшипников предъявляются такие требования, как достижение наименьшего отклонения от сферической формы поверхности и симметричное расположение ее по высоте кольца.

Конечная точность формы обрабатываемой поверхности в значительной степени определяется заключительной операцией механической обработки.

Операция шлифования дорожек качения наружных колец двухрядных роликовых подшипников чашечными кругами на врезание позволяет обеспечивать высокое качество обрабатываемой поверхности. Однако отсутствие данных о влиянии наладочных параметров на точность формы дорожек качения при шлифовании этим методом затрудняет получение фа-