

М 448148

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ССРС
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

НА ДОМ
НЕ ВДАЕТСЯ

На правах рукописи

ХОБОТОВ Александр Ильич

УДК 621.824-192:621.923.045

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ВАЛОВ С ТОРЦОВЫМИ ОПОРИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Дальский А.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Нишета В.В.

- кандидат технических наук, доцент Богатырев Э.Г.

Ведущее предприятие - Московский завод скоростных прецизионных электроприводов

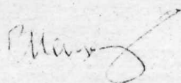
Защита состоится "16" февраля 1987 г. на заседании специализированного совета К053.15.15 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "7" января 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доцент



Р.К.Мещеряков

Л-63409

Подп. к печ. 31.12.86 Заказ 1474 Объем I п.л. Тираж 100 экз.
Типография МВТУ, 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., 5

Актуальность проблемы. На XXVII съезде КПСС указывалось, что эффективность реконструкции, темпы экономического роста в решающей мере зависят от машиностроения. Перед машиностроительным комплексом поставлена задача уже к концу двенадцатой пятилетки резко повысить технико-экономический уровень и качество машин, оборудования и приборов.

Решение проблемы повышения надежности машин самым тесным образом связано с технологическим обеспечением высокой точности формы и расположения ответственных поверхностей. Это в полной мере относится к таким машинам, как турбодетандеры, гироскопы, турбокомпрессоры, электро- и пневмошпиндели шлифовальных станков, шпиндельные узлы прецизионных станков и др., валы которых вращаются с большими частотами (до 400 тыс. оборотов в минуту) в жидкой или газовой среде. Для обеспечения безаварийной работы в течение всего периода эксплуатации, торцовые опорные поверхности валов должны иметь малые отклонения формы и расположения — допуск плоскостности и перпендикулярности устанавливают в пределах 1 мкм. Превышение допустимых значений ведет к возникновению вибрации, повышенному изнашиванию, что снижает надежность узла и машины в целом, а в экстремальных условиях может явиться причиной аварии.

В настоящее время точность прецизионных машин достигается путем доводки (притирки) деталей и ручной пригонки, требующих огромных затрат труда и времени. Причем качество полученных изделий зависит от квалификации, навыков, интуиции рабочего. Такое положение сейчас нельзя назвать удовлетворительным. Развитие производства требует устранения малопроизводительных методов обработки, слабо поддающихся автоматизации, таких как доводка и пригонка, замене их высокопроизводительными методами, гарантирующими достижение требуемой точности.

Современные круглошлифовальные станки позволяют изготавливать детали с допуском на размер 1 мкм, а точность формы и расположения поверхностей обеспечивать в пределах микрометра. Однако, стабильное получение высокой точности формы и расположения торцовых поверхностей представляет пока значительные трудности. Такое положение вызвано тем, что существуют не раскрытые причины возникновения погрешностей при обработке торцовых поверхностей в центре круглошлифовального станка. Изучение этих причин, разработка ме-

тодов их устранения, будет способствовать решению проблемы повышения точности.

Учитывая сказанное, проблема стабильного обеспечения долемикрометрической точности формы и расположения поверхностей валов с торцовыми опорами является актуальной, решение которой позволит повысить надежность работы высокоточных, высокооборотных устройств.

Цель работы. Исследование процесса формообразования при обработке торцовых поверхностей высокоточных валов шлифованием в центрах станка, анализ влияния параметров технологической системы СПИД и процесса резания на возникновение отклонений от плоскостности и перпендикулярности, изучение действия технологической наследственности на финишной операции и в ходе всего технологического процесса с целью обеспечения оптимальных отклонений формы и расположения торцовых поверхностей.

Методы исследования. Поставленные в работе теоретические задачи решались с применением методов теоретической механики, теории колебаний, теории упругости, теории технологической наследственности и теории резания с использованием ЭВМ. Экспериментальные исследования влияния факторов на отклонения формы и расположения торцовых поверхностей проводили на высокоточном оборудовании и приспособлениях, оснащенных современной измерительно-регистрирующей аппаратурой. Применяли тензоизмерительную аппаратуру с тензодатчиками, электронно-измерительную систему мод. 214. Величины отклонений от плоскостности и перпендикулярности определяли с помощью кругломера мод. К-290. При проведении исследований влияния факторов на надежность по критерию износа применяли специально сконструированные и изготовленные приспособления. Применение планируемых многофакторных экспериментов позволило получить результаты в виде соответствующих математических моделей. Обработку экспериментальных данных проводили с помощью ЭВМ.

Математические модели процесса технологического наследования и процесса изнашивания, их анализ и количественная оценка базировались на основных положениях теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна. Получена математическая модель процесса формообразования при обработке торцовых поверхностей высокоточных валов в центрах круглошлифовального станка. Рассмотрены два случая возникновения погрешностей - в результате действия пере-

менных и постоянных составляющих возмущающих сил, результатом которого являются отклонения от плоскостности в виде радиально и концентрически расположенных неровностей. Теоретический анализ разработанной математической модели позволил определить влияние на погрешность обработки параметров технологической системы СПИД, параметров процесса резания и технологической наследственности.

Практическая ценность. Проведенный анализ полученной математической модели процесса формообразования торцовых поверхностей, с учетом экспериментальных уточнений и дополнений, позволяет прогнозировать величину ожидаемой погрешности обработки и целенаправленно воздействовать на получение требуемой точности. На основе метода расчета деформации бурта малой жесткости разработаны рекомендации по определению допускаемой величины осевой составляющей силы резания в зависимости от установленного допуска плоскостности. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса обработки высокоточных валов с торцовыми опорами, выявление действия технологической наследственности позволили установить оптимальные значения режимов резания на операциях технологического процесса.

Разработанные технологические рекомендации позволяют обеспечивать отклонения формы и расположения торцовых поверхностей в пределах 1 мкм, повысить надежность работы высокоточных валов.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на Республиканской научно-практической конференции "Повышение эффективности обработки конструкционных материалов" (г. Улан-Удэ, 1985 г.), Всесоюзной конференции "Современные проблемы технологии машиностроения" (г. Москва, 1986 г.), Научно-техническом семинаре "Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов" (г. Москва, 1986 г.), научных семинарах кафедры "Технология металлов" МВУ им. Н.Э.Баумана.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы, приложений. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков, 26 таблиц, список литературы из 108 наименований и приложений на 23 страницах. Общий объем работы составляет 212 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ проблемы технологического

обеспечения надежности высокоточных валов с торцовыми опорами.

Установлено, что большинство исследовательских работ направлено на повышение эксплуатационных характеристик цилиндрических поверхностей валов и совершенно не рассматривают торцовых опор. В работах же, где торцовым опорам уделяется внимание, эти сведения крайне скудны и не вскрывают проблемы обеспечения точности формы и расположения торцовых поверхностей. Отсутствуют аналитические или эмпирические зависимости для определения величин отклонений формы и расположения. Нет сведений о влиянии на погрешность обработки отклонений формы торцовых поверхностей заготовок, погрешностей шлифовального круга и установочных баз (отклонений формы центров станка и центровых отверстий заготовки), неуравновешенности инструмента, силы закрепления заготовки и угла поворота оси шпинделя шлифовального круга. Отсутствует комплексное исследование по выбору технологических методов обработки, назначению режимов резания и технологических параметров с учетом действия технологической наследственности. Нет метода расчета деформации бурта малой жесткости, удовлетворяющего требованиям высокоточной обработки. Проведено крайне мало исследований по влиянию погрешностей обработки торцовых поверхностей на надежность валов (по критерию износа).

На основании проведенного анализа и в соответствии с целью работы поставлены следующие основные задачи:

1. Разработать аналитическую модель процесса формообразования торцовых поверхностей высокоточных валов при финишной обработке.

2. Теоретически и экспериментально исследовать характер влияния параметров технологической системы СПИД и режимов резания на величину отклонения от плоскостности при обработке торцовых поверхностей на круглошлифовальных станках.

3. Теоретически и экспериментально определить влияние жесткости бурта на отклонение формы торцовой поверхности и разработать метод расчета деформации бурта, удовлетворяющий условиям высокоточной обработки.

4. Теоретически и экспериментально изучить действие технологической наследственности на финишной операции и в ходе всего технологического процесса на величину отклонения от плоскостности.

5. Экспериментально исследовать влияние отклонений формы и расположения торцовой поверхности на износ сопряжения вал-подпятник.

6. Разработать технологические рекомендации по обеспечению высокой точности формы и расположения торцовых поверхностей высокоточных валов.

Во второй главе рассмотрены теоретические предпосылки повышения надежности на основе обеспечения высокой точности формы торцовых поверхностей.

С целью определения закономерностей формообразования при обработке торцовых поверхностей валов в центрах круглошлифовального станка, выявления действия технологической наследственности, установления влияния параметров технологической системы и параметров процесса резания на отклонение от плоскостности, разработана математическая модель процесса. При разработке модели, с целью упрощения вывода и решения уравнений, приняли обоснованные допущения, касающиеся жесткости шпинделя инструмента, кинематической точности станка, влияния тепловых деформаций и др.

Анализ движения системы "заготовка-инструмент" позволил выявить смещения, влияющие на отклонение формы торцовой поверхности вала: x_I, y_{II}, y_{I2} — смещения заготовки вдоль осей $O_I X_I$ и $O_I Y_I$; x_2, y_{2I}, y_{22} — смещения шлифовального шпинделя вдоль осей $O_2 X_2$ и $O_2 Y_2$ (рис. 1). Для нахождения неизвестных смещений имеем уравнения движения центров масс заготовки и инструмента вдоль осей OX и OY , и уравнения моментов, действующих относительно оси OZ :

- 1 $m_1 \ddot{x}_1 + m_{x1} \dot{x}_1 + J_{x1} \cdot x_1 = P_x + P_n \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega_2 \cdot \tau$;
- 2 $m_1 [(1 - l_{c1}/l_1) \ddot{y}_{11} + (l_{c1}/l_1) \ddot{y}_{12}] + m_{y11} \ddot{y}_{11} + J_{y11} \cdot y_{11} + m_{y12} \ddot{y}_{12} + J_{y12} \cdot y_{12} = P_y + P_n \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega_2 \cdot \tau$;
- 3 $m_2 \ddot{x}_2 + m_{x2} \dot{x}_2 + J_{x2} \cdot x_2 = -P_x \cdot \cos \alpha + P_y \cdot \sin \alpha$;
- 4 $m_2 [(1 - l_{c2}/l_2) \ddot{y}_{21} + (l_{c2}/l_2) \ddot{y}_{22}] + m_{y21} \ddot{y}_{21} + J_{y21} \cdot y_{21} + m_{y22} \ddot{y}_{22} + J_{y22} \cdot y_{22} = -P_x \cdot \sin \alpha - P_y \cdot \cos \alpha - P_n \cdot \cos \omega_2 \cdot \tau$;
- 5 $J_1 (\ddot{y}_{11} - \ddot{y}_{12})/l_1 + m_{y11} \ddot{y}_{11} \cdot l_{c1} + J_{y11} \cdot y_{11} \cdot l_{c1} - m_{y12} \ddot{y}_{12} \cdot (l_1 - l_{c1}) - J_{y12} \cdot y_{12} \cdot (l_1 - l_{c1}) = P_y \cdot l_{c1} + P_x \cdot z_1 + P_n \cdot \sqrt{z_1^2 + l_{c1}^2} \cdot \cos \omega_2 \cdot \tau$;
- 6 $J_2 (\ddot{y}_{21} - \ddot{y}_{22})/l_2 + m_{y21} \ddot{y}_{21} \cdot l_{c2} + J_{y21} \cdot y_{21} \cdot l_{c2} - m_{y22} \ddot{y}_{22} \cdot (l_2 - l_{c2}) - J_{y22} \cdot y_{22} \cdot (l_2 - l_{c2}) = P_x \cdot (z_2 \cdot \cos \alpha - l_{c2} \cdot \sin \alpha) - P_y \cdot (z_2 \cdot \sin \alpha + l_{c2} \cdot \cos \alpha) + P_n \cdot \cos \omega_2 \cdot \tau$,

где m_1, m_2 — масса заготовки и инструмента со шпинделем; $m_{x1}, m_{x2}, m_{y11}, m_{y12}, m_{y21}, m_{y22}$ — коэффициенты демпфирования опор заготовки и шпинделя в направлении осей $O_I X_I, O_2 X_2$ и $O_I Y_I, O_2 Y_2$; $J_{x1}, J_{x2}, J_{y11}, J_{y12}, J_{y21}, J_{y22}$ — составляющие жесткости опор заготовки и шпинделя

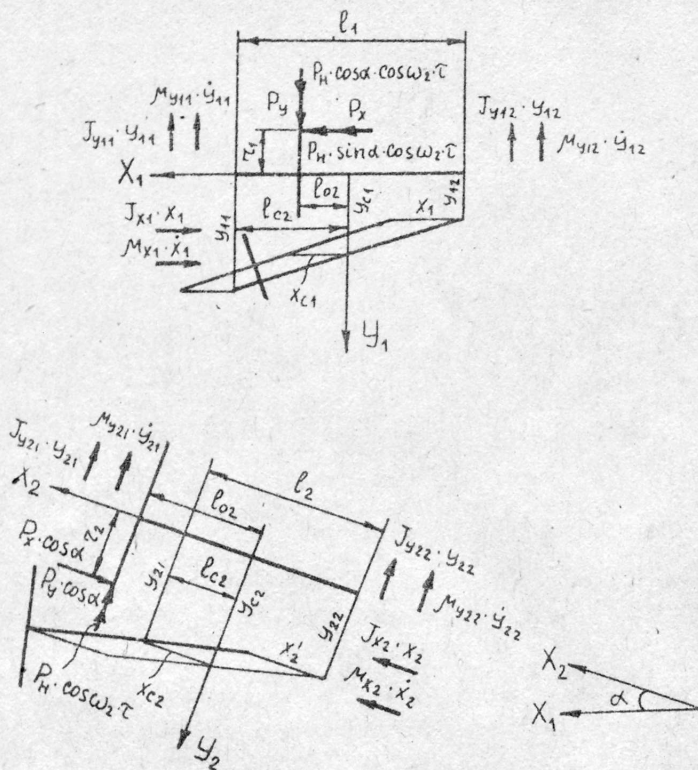


Рис. I. Схемы для определения сил и моментов, действующих на заготовку и инструмент

в направлении O_1X_1 , O_2X_2 и O_1Y_1 , O_2Y_2 ; P_x , P_y - составляющие силы резания; P_n - силовая неуравновешенность системы "инструмент":

$$P_n = m_n \cdot \tau_n \cdot \omega_2^2; \quad (2)$$

M_n - моментная неуравновешенность системы "инструмент":

$$M_n = m_n \cdot \tau_n \cdot \rho_n \cdot \omega_2^2, \quad (3)$$

где m_n - неуравновешенная масса; τ_n - расстояние от неуравновешенной массы до оси шпинделя; ρ_n - осевое смещение неуравновешенной массы относительно центра масс системы "инструмент"; ω_n - частота вращения инструмента; τ - время.

Величины жесткости в левой и правой опорах заготовки не остаются постоянными по углу поворота:

$$J_{x1} = J'_{x1} + a_{x1} \cdot \cos(K_1 \cdot K'_1 \cdot \omega_1 \cdot \tau - \Psi_1); J_{y11} = J'_{y11} + a_{y11} \cdot \cos(K_1 \cdot \omega_1 \cdot \tau - \Psi_1); J_{y12} = J'_{y12} + a_{y12} \cdot \cos(K_2 \cdot \omega_1 \cdot \tau - \Psi_2), \quad (4)$$

где J'_{x1} , J'_{y11} , J'_{y12} - постоянные составляющие; a_{x1} , a_{y11} , a_{y12} - амплитуды изменения жесткости; K_1 , K_2 - количество "выступов" на центровых отверстиях; K_I - количество выступов на центре станка; Ψ_1 , Ψ_2 - углы сдвига.

Кроме того, неровности существуют и на торцовой поверхности заготовки и на режущей поверхности шлифовального круга, в результате чего фактическая глубина шлифования также состоит из постоянной и переменной составляющих:

$$t_{\varphi} = t_1 + t_a \cdot \cos K \cdot \omega_1 \cdot \tau - t_b \cdot \cos K_b \cdot \omega_2 \cdot \tau - t_{упр} - [x_1 - x_2 \cdot \cos \alpha + y_{11} \cdot (\tau_1 / \rho_1) - y_{12} \cdot (\tau_1 / \rho_1) - y_{21} \cdot (\sin \alpha + \frac{\rho_{o2} - \rho_{c2}}{\rho_2} \cdot \sin \alpha - \tau_2 \cdot \cos \alpha / \rho_2) + y_{22} \cdot (\frac{\rho_{o2} - \rho_{c2}}{\rho_2} \cdot \sin \alpha - \tau_2 \cdot \cos \alpha / \rho_2)] \quad (5)$$

где t_1 - постоянная составляющая глубины шлифования; t_a , t_b - амплитуды неровностей заготовки и шлифовального круга; K , K_b - количество неровностей; ω_1 - частота вращения заготовки; $t_{упр}$ - упругие деформации бурта.

При вращении заготовки и шпинделя инструмента смещения по осям состоят из постоянных и переменных составляющих, так как на них воздействуют постоянные и переменные составляющие возмущающих сил:

$$X_1 = X_{10} + \xi_{x1}; y_{11} = y'_{11} + \xi_{y11}; y_{12} = y'_{12} + \xi_{y12}; \\ X_2 = X_{20} + \xi_{x2}; y_{21} = y'_{21} + \xi_{y21}; y_{22} = y'_{22} + \xi_{y22}. \quad (6)$$

Переменные составляющие определяют отклонение от плоскостности торцевой поверхности, изменяющегося по закону $\Delta_{\varphi p} = f(\varphi)$, то есть неровности располагаются радиально, а постоянные составляющие смещений – по закону $\Delta_{\varphi k} = f(R)$, то есть неровности располагаются концентрически.

Подставив в уравнение (I) значения жесткости и силы резания, получим две системы уравнений, описывающих движения системы "заготовка-инструмент" от действия постоянных и переменных возмущающих сил. Величины отклонений от плоскостности в виде радиальных и концентрических неровностей определяются:

$$\Delta_{\varphi p} = \xi_{x1} - \xi_{x2} \cdot \cos \alpha + (\tau_1 / \ell_1) \cdot \xi_{y11} - (\tau_1 / \ell_1) \cdot \xi_{y12} - (\sin \alpha + \frac{\ell_{01} - \ell_{c1}}{\ell_2} \cdot \sin \alpha - \frac{\tau_2}{\ell_2} \cdot \cos \alpha) \cdot \xi_{y21} + (\frac{\ell_{02} - \ell_{c2}}{\ell_2} \cdot \sin \alpha - \frac{\tau_2}{\ell_2} \cdot \cos \alpha) \cdot \xi_{y22}; \quad (7)$$

$$\Delta_{\varphi k} = (\tau_1 / \ell_1) \cdot y'_{11} - (\tau_1 / \ell_1) \cdot y'_{12} - (\sin \alpha + \frac{\ell_{02} - \ell_{c2}}{\ell_2} \cdot \sin \alpha - \frac{\tau_2}{\ell_2} \cdot \cos \alpha) \cdot y'_{21} + (\frac{\ell_{02} - \ell_{c2}}{\ell_2} \cdot \sin \alpha - \frac{\tau_2}{\ell_2} \cdot \cos \alpha) \cdot y'_{22} + t_{ypr}.$$

Анализ полученной математической модели (с помощью ЭВМ) позволил установить связи и зависимости между выходной величиной (отклонением формы) и входными факторами (параметрами технологической системы и процесса резания) и определить условия и методы воздействия на факторы с целью уменьшения величины отклонения от плоскостности.

При обработке валов с буртами пониженной жесткости, под действием осевой составляющей силы резания происходит деформация бурта, в результате чего возникает дополнительная погрешность. Существующие методы расчета деформации бурта дают большие ошибки в случае высокоточной обработки, поэтому возникла необходимость в более точном расчете. Он основывается на теории тонких пластинок, когда прогибы могут быть найдены с помощью известного выражения:

$$t_{ypr} = R_0 + \sum_{m=1}^{\infty} R_m \cdot \cos m \cdot \theta. \quad (8)$$

Подставляя данное выражение в граничные условия, получим системы для нахождения неизвестных коэффициентов R_0, R_1, R_m .

Вычисление величин прогибов буртов различных размеров, в любой точке деформируемой торцевой поверхности производится по разрабатываемой программе на ЭВМ "Искра-1256".

Для практического применения удобнее использовать податливость $V = t_{ypr} / P_x$ в данной точке, которая не зависит от силовых

факторов, связанных с режимами обработки.

Метод определения деформации бурта позволяет уже на стадии проектирования устанавливать допустимые величины силы резания в зависимости от требуемой точности. Предельные значения осевой составляющей силы резания определяются:

$$[P_x] \leq \delta \cdot h^3 / 1,1 \cdot K_d \cdot W, \quad (9)$$

где δ – допуск плоскостности; h – толщина бурта; W – податливость, определенная расчетным путем; $I, I; K_d$ – коэффициенты, учитывающие ошибку расчета, процессы, протекающие при резании, упругие свойства материалов и др., определенные опытным путем.

Третья глава посвящена экспериментальному подтверждению адекватности разработанной математической модели процесса шлифования торцовых поверхностей реальному процессу обработки. При выводе аналитических зависимостей был принят ряд допущений и положений, правомерность которых необходимо доказать. Кроме того, в результате проведения экспериментальных исследований необходимо определить зависимости, которые теоретическим путем получить затруднительно. В частности, это позволит изучить действие технологической наследственности в ходе операций процесса обработки резанием и определить влияние эксплуатационных и технологических факторов на надежность работы подвижных устройств.

Изложены основные методические положения выполнения экспериментальных исследований. Дано описание экспериментального стенда, измерительно – регистрирующей аппаратуры и методов измерения. Измерения величин отклонений формы и расположения торцовых поверхностей валов, отклонений формы центров станка и центровых отверстий заготовки производили с помощью кругломера мод. К-290. Измерение величин отклонения формы заготовок в виде концентрически расположенных неровностей и погрешностей круга – с помощью электронно – измерительной системы мод. 214. Осевую силу закрепления заготовки контролировали с помощью тензоизмерительной аппаратуры и тензодатчиков, встроенных в заднюю бабку станка.

Экспериментальные исследования механизма формирования отклонения формы торцовых поверхностей в ходе процесса финишной обработки проводили при соблюдении постоянства параметров, не подлежащих варьированию.

Проведенные эксперименты подтвердили наследственный перенос погрешности торцовой поверхности заготовки на обработанную де-

таль. Коэффициент наследственности при экспериментах составил $K_a = 3,0 \dots 3,5$ (расчетный $K_a = 2,95$). Установлено, что с увеличением количества неровностей K на поверхности заготовки отклонение формы снижается, причем наиболее неблагоприятным является условие $K=2$.

Подтверждены теоретические выводы о переносе погрешностей шлифовального круга на обработанную торцовую поверхность. С ростом высоты неровностей на режущей поверхности инструмента величина отклонения формы детали возрастает: $\Delta\varphi_1 = 1,19$ мкм и $\Delta\varphi_2 = 1,6$ мкм (погрешности кругов были соответственно $\Delta_{K1} = 2,8$ мкм, $\Delta_{K2} = 3,3$ мкм). Кроме того, в ходе экспериментальных исследований замечено некоторое уменьшение отклонения формы детали при обработке кругами, имеющими на своей режущей поверхности преобладающие гармоники более высокого порядка.

В результате проведенных исследований были подтверждены теоретические данные о влиянии силовой и моментной неуравновешенности на величину отклонения формы торцовой поверхности: с увеличением P_n в 10 раз погрешность возрастает с 0,7 мкм до 2,8 мкм (в 3,9 раза). Было экспериментально подтверждено, что моментная неуравновешенность оказывает незначительное воздействие на точность формы.

Доказано, что погрешности установочных баз наследуются переносятся на обработанную торцовую поверхность. Причем, имеет значение не только отклонение формы центрального отверстия, но и центра. Важно, чтобы количество выступов на поверхностях центров K_c и центральных отверстий $K_{c.o}$ было $K_c \neq K_{c.o}$. В противном случае, когда $K_c = K_{c.o}$ неровности суммируются из-за равенства фазовых углов. Например, при обработке заготовок на центрах с количеством неровностей $K_{c1} = 10$ и $K_{c2} = 2$ ($\Delta_{c,1} = 1,2$ мкм; $\Delta_{c,2} = 1,1$ мкм) отклонение формы торцовой поверхности составило: $\Delta\varphi_1 = 0,2$ мкм; $\Delta\varphi_2 = 0,7$ мкм. Центровые отверстия имели в осевом сечении овал с величиной отклонения формы $\Delta_{c.o} = 0,8 \dots 1,0$ мкм. При совпадении количества выступов на поверхностях центра и центрального отверстия резко возрастает гармоника, равная количеству выступов, в нашем случае - 2^H . Отмечено также уменьшение величины отклонения формы обработанной торцовой поверхности вала с возрастанием номеров преобладающих гармоник неровностей центров и центральных отверстий заготовки.

Экспериментальные исследования влияния осевой силы закрепле-

ния P_0 заготовки и угла наклона α оси инструмента позволили установить оптимальные значения этих величин: $200 \text{ Н} < P_0 < 400 \text{ Н}$, $\pi/4 < \alpha < \pi/3$.

Определение влияния технологических факторов на наследование отклонений формы и расположения торцовых поверхностей в ходе операций механической обработки резанием проводили с использованием методики математического планирования и обработки экспериментальных данных.

Влияние исследуемых факторов на отклонение формы и отклонение расположения описывали с помощью эмпирических формул:

$$\begin{aligned}\Delta_{fq} &= C_q \cdot \Delta_{fq-1}^{B_q} \cdot V_{nq}^{m_q} \cdot S_q^{n_q} \cdot t_q^{k_q}; \\ \Delta_{nq} &= C'_q \cdot \Delta_{nq-1}^{B'_q} \cdot V_{nq}^{m'_q} \cdot S_q^{n'_q} \cdot t_q^{k'_q},\end{aligned}\quad (10)$$

где Δ_{fq-1} — отклонение формы заготовки; Δ_{nq-1} — отклонение расположения заготовки; B — коэффициент наследуемости; m, n, k — факторные коэффициенты; C — коэффициенты неучтенных факторов.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили наследование отклонения формы и отклонения расположения от операции к операции. Подтверждены теоретические выводы о влиянии режимов резания на отклонение от плоскостности торцовой поверхности вала. Установлено, что точность расположения определяется точностью станка и величиной погрешности заготовки. Величина же отклонения формы во многом зависит от режимов обработки, особенно на предварительных операциях, где необходимо стремиться к увеличению коэффициента наследственности K_n .

Экспериментальные исследования влияния погрешностей обработки и финишной операции на надежность валов с торцовыми опорами (по критерию износа) проводили на специально сконструированной и изготовленной установке. Она состоит из двух устройств: устройство для моделирования отклонения от плоскостности с различным количеством выступов и устройства для создания отклонения от перпендикулярности.

В качестве математической модели, описывающей связь выходного параметра (износа) с условиями процесса, была зависимость вида:

$$U = C \cdot \Delta_{\varphi}^m \cdot \Delta_n^n \cdot K^P \cdot P^q \cdot V^S, \quad (11)$$

где K — количество выступов на поверхности образца; P — давление

на поверхности трения; V – скорость относительного движения.

Для получения данной зависимости использовали методику математического планирования. Финишную обработку образцов проводили тремя методами: плоским шлифованием, тонким точением и круглым шлифованием. Математическую обработку результатов экспериментов проводили на ЭВМ.

В результате исследований было определено влияние условий работы узла трения скольжения, погрешностей обработки и финишной операции на износ. В частности, установлено, что обработка рабочих поверхностей сопрягаемых деталей вала и подпятника на круглошлифовальном станке повышает надежность узла трения по сравнению с другими рассмотренными методами. Кроме того, наиболее износостойки те валы, торцовые опоры которых имеют меньшие погрешности и высокие номера гармонических составляющих неровностей.

В четвертой главе даны практические рекомендации по повышению надежности высокоточных валов на базе обеспечения долеметрической точности формы и расположения торцовых опор. Предлагаемые мероприятия основываются на установленных математических зависимостях, описывающих связь погрешностей обработки с факторами. Использование предложенных рекомендаций позволяет стабильно обеспечивать точность формы и расположения торцовых поверхностей валов в пределах 1 мкм и исключить трудоемкий и дорогостоящий метод – доводку (притирку).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически исследован процесс формообразования при обработке торцовых поверхностей высокоточных валов в центрах круглошлифовального станка. Разработана математическая модель процесса. Рассмотрены два случая возникновения отклонения от плоскостности – в результате воздействия переменных и постоянных возмущающих сил. Получены математические зависимости, используя которые, можно с помощью ЭВМ прогнозировать величину и вид погрешности обработки.

2. Анализ математической модели позволил определить влияние на получение точности параметров технологической системы и процесса резания. Теоретически показана возможность и намечены пути управления процессом обработки торцовых поверхностей высокоточных валов.

3. Исследования экспериментальной части показали адекват-

ность разработанной модели реальному процессу шлифования. Доказаны теоретические выводы об оптимальных значениях параметров технологической системы и процесса резания, при которых обеспечивается высокая точность формы торцовых поверхностей валов.

4. Установлен наследственный перенос погрешностей торцовой поверхности заготовки, режущей поверхности шлифовального круга и установочных баз на обработанную деталь. Показано, что для достижения высокой точности необходимо соблюдать условие $K_{ц} \neq K_{ц.о} \neq 2$. Выявлено влияние на погрешность обработки силы закрепления заготовки и угла наклона шпинделя круга. Определены оптимальные значения этих параметров: $200 \text{ Н} < P_0 < 400 \text{ Н}$, $\pi/4 < \alpha < \pi/3$. Установлено, что при расчетах точности необходимо, в первую очередь, учитывать силовую неуравновешенность инструмента.

5. Разработан аналитический метод определения деформации бурта, позволяющий с высокой точностью определять (с помощью ЭВМ) величину прогиба под действием осевой составляющей силы резания. С помощью предложенного метода расчета можно на стадии проектирования, исходя из геометрических размеров вала и допуска плоскостности, назначать допустимые силы резания, обеспечивающие достижение высокой точности. Экспериментально доказана высокая точность метода расчета деформации бурта, определена ошибка расчета и коэффициент динамичности.

6. Экспериментально установлено наличие явления технологической наследственности в ходе операций процесса обработки торцовых поверхностей высокоточных валов. Получены математические модели, описывающие влияние на отклонение формы и расположения торцовых поверхностей режимов обработки, а также раскрывающие механизм наследования погрешностей в ходе операций механической обработки.

7. Экспериментально определен оптимальный метод финишной обработки торцовых поверхностей – круглое шлифование, позволяющий получать требуемую точность формы и расположения поверхностей и обеспечивать надежность (по критерию износа) работы трущихся поверхностей.

8. Экспериментально получены математические модели процесса изнашивания торцовых опор валов в зависимости от вида финишной обработки, условий эксплуатации и геометрических погрешностей, что позволяет прогнозировать работоспособность узла трения. Показана возможность повышения износостойкости за счет варьирования методов обработки и геометрических погрешностей.

9. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации, позволяющие обеспечивать точность формы и расположения торцовых поверхностей (менее 1 мкм) и исключить трудоемкий и дорогостоящий метод - доводку (притирку).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хоботов А.И. Приспособление для моделирования волнистости // Информационный листок ЦНТИ. - Чита, - 1982.

2. Хоботов А.И. Установка для исследования технологических факторов на износ // Информационный листок ЦНТИ. - Чита, - 1983.

3. Хоботов А.И. К вопросу о надежности торцовых пар трения // Динамика, прочность и надежность в машиностроении: Сб. научных трудов. - Чита, 1983. - С. 101 - 103.

4. Хоботов А.И. К вопросу обеспечения точности обработки валов с нежесткими буртами // Повышение эффективности обработки конструкционных материалов. Тез. докл. Республиканской конф. - Улан-Удэ, 1985. - С. 39 - 40.

5. Хоботов А.И. Повышение точности обработки валов с нежесткими буртами // Известия ВУЗов. Машиностроение, - 1985. - № II. - С. 104 - 107.

А.И. Хоботов

