

М 357291.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

НИКОЛАЕВ Юрий Львович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ
КРУГЛОСТЬЮ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КОЛЕЦ ПРИ ШЛИФОВАНИИ
НА ОПОРАХ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность темы. Поставленная XXV съездом КПСС задача повышения качества машиностроительной продукции определяет возрастающие требования к надежности и долговечности механизмов и машин. Большое влияние на долговечность и надежность оказывают отклонения формы сопрягаемых поверхностей деталей, и, в частности, отклонение формы в поперечном сечении деталей типа колец. Существующие требования к точности формы ответственных деталей типа колец чрезвычайно высоки и характеризуются допусками, не превышающими нескольких микрон.

В настоящее время обеспечение точностных требований к круглости деталей типа колец достигается за счет рационального построения технологического процесса изготовления, использования прогрессивных методов обработки и высокоточного оборудования на финишных операциях. При этом наибольшее распространение получил метод бесцентрового шлифования поверхностей вращения кольца на опорах, особенно широко применяемый в массовом производстве. Однако, точностные возможности этого метода ограничены влиянием ряда технологических факторов наследственного характера, причем с увеличением требований к точности формы значительно возрастает трудоемкость изготовления деталей. Таким образом, изыскание эффективных путей повышения точности формы деталей типа колец при их шлифовании на опорах является актуальной проблемой, что особенно важно в условиях высокопроизводительного, массового производства.

Как известно, повышению точности и производительности шлифовальных операций в значительной степени способствует применение технологических методов управления процессом обработки с использованием информации об отклонениях размерных параметров или режимов обработки. Однако, методы управления круглостью деталей в процессе обработки изучены явно недостаточно и до настоящего времени практического развития не получили.

Цель работы. Целью настоящих исследований является разработка эффективного метода повышения точности формы деталей типа колец при шлифовании на опорах посредством управления процессом формообразования.

Методы исследования. Теоретические задачи исследования решались на основе разработанной математической модели управляемого процесса формообразования с применением операторных методов Лапласа, аппарата теории случайных процессов, математических мето-

дов исследования систем автоматического регулирования. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных стендах, а также при шлифовании колец подшипников на станке модели "Siage-50" с использованием разработанных устройств и современной контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры. Обработка экспериментальных данных проводилась методами гармонического анализа и математической статистики с применением ЭВМ.

Научная новизна. Исследован новый, эффективный метод управления круглостью деталей типа колец при шлифовании на опорах, сущность которого заключается в том, что в процессе обработки осуществляется автоматическое регулирование глубины резания путем управляемого перемещения обрабатываемой заготовки относительно инструмента в зависимости от результатов измерения отклонений формы в поперечном сечении обрабатываемой поверхности. Разработана математическая модель управляемого процесса формообразования, на основе которой раскрыты закономерности изменения отклонения от круглости обрабатываемой поверхности в ходе технологической операции в зависимости от технологических факторов и параметров управления. Впервые решена задача управления в условиях накопления отклонений формы, образующихся на обрабатываемой поверхности от возмущающих воздействий. Предложена методика выбора значений параметров управления, исходя из технологических особенностей процесса обработки. Разработан новый способ формирования регулирующего движения, основанный на выделении информации об отклонениях формы обрабатываемой поверхности в виде непрерывного знакопеременного сигнала, используемого для управления микроперемещением опоры при помощи пьезокерамического исполнительного механизма. Разработана методика экспериментальных исследований процессов исправления и образования отклонений формы, а также точности и динамики управления на основе моделирования управляющих и возмущающих воздействий путем подачи на управляемую опору моделирующего сигнала с различной амплитудой и частотой.

Практическая полезность. В результате проведенных исследований разработан способ управления, позволяющий уменьшить отклонение от круглости обработанной поверхности кольца в 1,6 - 2,5 раза при одновременном сокращении времени исправления отклонений формы исходной поверхности более, чем в 3 раза. Предложен эффективный способ получения поверхностей деталей с требуемым отклонением формы поперечного сечения, заданной амплитуды и видом

им. Н. Э. Баумана

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

гранности. Даны рекомендации по практическому использованию предложенных способов. Разработана и внедрена на ГПЗ-20 система управления круглостью, работающая совместно с индуктивными приборами активного контроля размеров. Даны рекомендации по конструированию, наладке и эксплуатации устройств для измерения и управления круглостью.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады на Московском семинаре "Новые средства контроля качества в массовом производстве", 1976 г., на научно-практических конференциях "Совершенствование технологии - необходимое условие повышения эффективности производства и качества продукции на предприятиях области в свете решений XXV съезда КПСС", г. Курск, 1978 г., "Прогрессивная технология - основа обеспечения высокого качества продукции", г. Курск, 1979 г. В решениях указанных конференций даны рекомендации о целесообразности применения разработанного метода и устройств для измерения и управления круглостью. Диссертационная работа неоднократно обсуждалась и получила одобрение на научных семинарах в МВТУ им. Баумана в 1976-1979 гг.

По материалам диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ, получено 2 авторских свидетельства и 2 положительных решения по заявкам на авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов, изложенных на 132 страницах машинописного текста. Содержит две таблицы, 80 рисунков, список литературы из 104 наименований, 8 страниц приложений.

В первой главе проанализированы существующие требования к точности изготовления ответственных деталей типа колец по параметрам круглости и технологические методы их обеспечения. Установлено, что наиболее прогрессивным методом финишной обработки поверхностей вращения кольца, обеспечивающим высокую точность и производительность, является бесцентровое врезное шлифование на опорах, широко применяемое в массовом производстве. На основании анализа литературных и производственных данных дана характеристика точности обработки деталей при шлифовании на опорах. Выявлено, что точность формы обработанной поверхности существенно зависит от отклонений формы поверхностей заготовки. В частности, при шлифовании с базированием по необрабатываемой поверхности доминирующее влияние оказывают отклонения формы

базовой поверхности. На примере технологического процесса изготовления колец подшипников показано, что повышение точности обработки неразрывно связано с увеличением трудоемкости изготовления деталей.

Проанализированы работы, раскрывающие закономерности наследования обработанной поверхностью детали отклонений формы обрабатываемой и базовой поверхностей заготовки. Установлено, что для количественной характеристики и анализа явлений наследования могут служить коэффициенты передачи, которые определяются на основании зависимостей между относительными колебаниями заготовки и инструмента и периодическими возмущающими силами. Однако, коэффициенты передачи не отражают характера изменения отклонения формы обрабатываемой поверхности в ходе технологической операции. Это определяет необходимость составления модели процесса формообразования, которая с учетом цели исследования включала управляющие факторы и измеряемые параметры.

Проведен анализ методов управления точностью размеров и формы деталей в процессе шлифования. Установлено, что эффективное управление точностью формы в поперечном сечении может быть достигнуто путем регулирования параметров относительного движения заготовки и инструмента. Показано, что известные решения задачи управления круглостью связывались, главным образом, с вопросами обеспечения ускоренного исправления отклонений формы исходной поверхности заготовки. Вопросы синтеза управления и точностного анализа процесса обработки в условиях воздействия возмущающих факторов, образующих отклонения формы на обрабатываемой поверхности, практически не рассматривались. Следует также отметить, что в известных на сегодня технических решениях устройств для управления точностью формы при врезном шлифовании управляющее воздействие осуществляется путем регулирования частоты вращения заготовки в пределах одного оборота, что вызывает необходимость переоснащения привода станка, создания сложных систем синхронизации, и не обеспечивает необходимого для управления круглостью деталей типа колец быстрого действия.

Поэтому в соответствии с целью исследований поставлены следующие задачи:

1. Разработка математической модели управляемого процесса формообразования и теоретическое исследование закономерностей формообразования в зависимости от технологических факторов и параметров управления.

2. Разработка способа и устройств формирования измерительной информации и регулирующего движения для практического осуществления метода управления круглостью при шлифовании на опорах.

3. Экспериментальное исследование точности формообразования в процессе врезного шлифования деталей типа колец на опорах с использованием системы управления круглостью.

4. Разработка рекомендаций по эффективному использованию результатов исследований и внедрению метода управления круглостью в условиях типового технологического процесса изготовления деталей типа колец.

Во второй главе проведено теоретическое исследование особенностей формообразования и точностных возможностей процесса обработки в зависимости от технологических факторов и параметров управления.

Для решения теоретических задач была разработана математическая модель процесса формообразования. В разработанной модели процесс изменения отклонений формы в поперечном сечении обрабатываемой поверхности при врезном шлифовании описывался функциональной последовательностью $\Delta_{\varphi}(n)$, где $0 \leq n \leq N$ - номер оборота кольца в процессе обработки; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ - угловая координата профиля поперечного сечения. В основу построения математической модели было положено уравнение, устанавливающее взаимосвязь между отклонениями формы обрабатываемой поверхности на " n " - ом и " $n+1$ " - ом оборотах

$$\Delta_{\varphi}(n+1) = \Delta_{\varphi}(n) - \delta t_{\varphi}(n, a_r, v_m, u_s) \quad (1)$$

где δt_{φ} - приращение фактической глубины резания по координате φ в зависимости от управляющих u_s и возмущающих v_m воздействий; a_r - параметры технологической системы.

Зависимость приращения δt от воздействий v_m, u_s определялась в результате рассмотрения линейной модели замкнутой динамической системы станка. При этом в зависимости от возмущаемых переменных рассмотренной модели оказалось возможным разделить воздействия на две группы: координатные (u_1, v_1), связанные с непосредственным изменением относительного положения заготовки и инструмента, и параметрические (u_2, v_2), обусловленные вариацией параметров упругой системы и процесса резания. В результате расчета полученных динамических коэффициентов передачи было показано, что в низкочастотной области, по крайней мере, в пределах спектра 5 - 6 гармонических составляющих круглости, взаимодейст-

вия в системе носят квазистатистический характер. С учетом сказанного, выражение для определения амплитудного значения приращения глубины резания в пределах одного оборота представлено в виде

$$\delta t_{\varphi} = (1-k)(\Delta_{\varphi} + u_{1\varphi} + v_{1\varphi}) + kt_0 \cdot (u_{2\varphi} + v_{2\varphi}) \quad (2)$$

где $K = K_0 / (j_0 + K_0)$ — безразмерный коэффициент; j_0 — жесткость технологической системы; K_0 — параметр процесса резания, являющийся коэффициентом пропорциональности между фактической глубиной и силой резания; t_0 — установившееся значение средней глубины резания. На основании анализа полученного выражения (2), показана целесообразность выбора координатного канала управляющего воздействия для технологических систем с высокой жесткостью, что в частности, характерно для шлифования деталей типа колец с базированием на опорах по необрабатываемой поверхности.

В результате совместного решения (1) и (2) была получена математическая модель управляемого процесса формообразования.

$$\Delta_{\varphi}(n+1) - K \cdot \Delta_{\varphi}(n) = (1-k)(u_{1\varphi} + v_{1\varphi}) + kt_0 \cdot (u_{2\varphi} + v_{2\varphi}) \quad (3)$$

при $\Delta_{\varphi}(0) = \Delta_{0\varphi}$, где $\Delta_{0\varphi}$ — отклонения формы исходной поверхности заготовки. Решение этого уравнения описывает последовательное изменение отклонений формы обрабатываемой поверхности в ходе технологической операции и зависит от вида функций, стоящих в правой части уравнения. На основании анализа решения в общем виде было показано, что для неуправляемого процесса формообразования ($u_{\varphi} = 0$) отклонение формы обработанной поверхности определяется как долей исходных погрешностей, так и суммой накопленных отклонений, обусловленных возмущающими воздействиями $v_{1\varphi}, v_{2\varphi}$. При этом наибольшее накопление происходит в том случае, когда возмущающие функции $v_{1\varphi}$ и $v_{2\varphi}$ имеют период, кратный частоте вращения заготовки, что характерно для большинства случаев врезного шлифования высокоточных деталей, в том числе и деталей типа колец. В частности, этому условию отвечают воздействия, обусловленные отклонением формы базовых поверхностей заготовки. При этом процесс изменения отклонений формы описывается составляющими

$$\Delta_{\varphi}(n) = K^n \cdot \Delta_{0\varphi} + (1-K^n) \cdot u_{1\varphi} + \frac{K t_0}{1-K} \cdot (1-K^n) \cdot v_{2\varphi} \quad (4)$$

из анализа которых следует, что при реальных значениях параметра $K = 0,5 - 0,8$ наряду с достаточно быстрым исправлением исход-

ного отклонения от круглости $\Delta_{0\varphi}$ также происходит интенсивное накопление отклонений, обусловленное воздействиями $U_{1\varphi}$ и $U_{2\varphi}$ по экспоненциально-возрастающей зависимости. Аналогичный процесс будет иметь место при подаче гармонических управляющих воздействий с частотой, кратной частоте вращения заготовки. Такое управление предназначено для получения поверхности обработанной детали с требуемым отклонением формы поперечного сечения по амплитуде и виду гранности.

Уменьшение отклонения от круглости обработанной поверхности детали достигается при введении управляющих воздействий по возмущению и отклонению.

При регулировании по возмущению решение задачи управления заключалось в определении параметров закона регулирования $U_{\varphi}(n) = F\{U_{\varphi}(n)\}$ из условия компенсации возмущающих факторов, в результате чего были получены соответствующие расчетные соотношения как для координатного, так и для параметрического каналов управления. Установлено, что в условиях компенсации точностные возможности управления ограничены влиянием исходных отклонений формы, а также существенно зависят от погрешностей измерительно-управляющего устройства, так как последние по своему действию эквивалентны возмущениям. Приведены соотношения, позволяющие оценить влияние систематической и случайной составляющей погрешности компенсации на точность обработки.

При регулировании по отклонению управляющее воздействие формируется в функции от результатов измерения отклонений формы обрабатываемой поверхности $U_{\varphi}(n) = -C \cdot \Delta_{\varphi}(n)$, где C — коэффициент усиления. С учетом (3) процесс изменения отклонений формы обрабатываемой поверхности при регулировании описывается составляющими

$$\Delta_{\varphi}(n) = q^n \cdot \Delta_{0\varphi} + \frac{1-K}{1-q} (1-q^n) \cdot U_{1\varphi} + \frac{K t_0}{1-q} \cdot (1-q^n) U_{2\varphi} \quad (5)$$

где q — параметр управления, численное значение которого устанавливается выбором коэффициента усиления C в пределах области устойчивости $|q| < 1$.

На основании сравнительного анализа составляющих процессов (4) и (5) показано, что в условиях регулирования по отклонению при значениях параметра управления $|q| < K$ на каждом „ n “-ом обороте заготовки в процессе шлифования $1 < n \leq N$ доля исходных и накопленных отклонений формы обрабатываемой поверхности всегда меньше соответствующей доли отклонений при шлифовании без регу-

лирования. При этом доля накопленного отклонения от круглости обработанной поверхности уменьшается в $(1-Q)/(1-K)$ раз.

Проанализированы характерные особенности процесса формообразования в зависимости от установленного значения параметра управления Q и показаны примеры эффективного выбора его значений.

Показано, что наиболее интенсивное исправление отклонений формы исходной поверхности заготовки достигается при значениях Q , близких к нулю. При этом влияние технологических факторов, образующих накопленное отклонение формы обработанной поверхности, уменьшается в 2 - 5 раз. Выбор параметра управления в области значений, близких к нулю, целесообразен при доминирующем влиянии на точность обработки исходных отклонений формы обрабатываемой поверхности заготовки, в частности, при невысокой жесткости технологической системы.

Установлено, что наибольшее уменьшение влияния технологических факторов, процесс переноса которых на обрабатываемую поверхность носит закономерный характер, достигается при перерегулировании, то есть в области отрицательных значений параметра Q . С учетом требований по быстродействию исправления и ограничений на перерегулирование предельное отрицательное значение параметра Q для операций чистового шлифования не должно превышать 0,3 - 0,6. В данном случае влияние возмущений уменьшается в 2,5 - 8 раз. Выбор параметра управления в области отрицательных значений является наиболее приемлемым для операций чистового шлифования деталей типа колец с базированием по необрабатываемой поверхности, так как в этом случае наряду с ускоренным исправлением исходных отклонений формы достигается существенное уменьшение влияния базовой поверхности кольца на точность обработки.

Показано, что выбор параметра управления в области положительных значений целесообразен при ограничениях на управление и должен осуществляться по наименьшему допустимому значению.

Проведено исследование влияния погрешностей измерительно-управляющего устройства на точность формообразования при шлифовании с регулированием. Для этого были определены составляющие процесса формообразования, обусловленные их влиянием. Установлено, что степень влияния зависит от численного значения параметра управления Q , причем различным образом для погрешностей измерительной части устройства и погрешностей регулятора. В част-

ност..., для систематических погрешностей амплитуда соответствующих установившихся ошибок при формообразовании всегда меньше амплитудного значения этих погрешностей. Получены формулы для расчета среднеквадратического значения установившихся ошибок при случайном характере проявления погрешностей измерительного и регулирующего устройства.

Приведенные в работе зависимости по влиянию основных факторов на точность формообразования в условиях регулирования позволяют в каждом конкретном случае оценить точностные возможности процесса обработки и выбрать оптимальное значение параметра управления.

Третья глава посвящена разработке системы управления круглостью деталей типа колец и экспериментальному исследованию ее передаточных характеристик.

Разработка системы управления проводилась на основании результатов теоретических исследований. При этом был реализован аналоговый способ формирования регулирующего движения, сущность которого состоит в следующем. В процессе врезной обработки осуществляется непрерывное измерение отклонения размера обрабатываемой поверхности в радиальном направлении под углом 90° к зоне обработки. Измерительное устройство системы управления выделяет только ту составляющую контролируемого процесса, которая характеризует отклонения формы обрабатываемой поверхности. В результате на выходе измерительного устройства присутствует непрерывный знакопеременный сигнал, пропорциональный отклонениям формы в пределах установленного спектра гармонических составляющих круглости. Этот сигнал используется для формирования управления, для чего с помощью синхронизирующего устройства осуществляется его непрерывная задержка на время, необходимое для перемещения контролируемого участка поверхности в зону обработки. Смещенный таким образом сигнал подается на управляемую опору, обеспечивающую дополнительное микроперемещение кольца относительно инструмента пропорционально измеренному отклонению формы обрабатываемой поверхности.

Теоретическое исследование описанного процесса формирования управления показало, что для обеспечения точности формирования регулирующего движения необходимо, чтобы передаточные характеристики системы управления обладали определенными частотными свойствами в пределах спектра частот контролируемого процесса.

На основании расчета были определены основные требования к амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) измерительного устройства, выделяющего требуемое количество гармонических составляющих, а также к АЧХ синхронизирующего устройства, осуществляющего непрерывную задержку измерительного сигнала на заданное время. Результаты расчета были использованы при разработке электронного измерительно-управляющего блока системы управления круглостью с первичным измерительным преобразователем индуктивного типа.

В результате экспериментальных исследований передаточных характеристик типовых индуктивных измерительных приспособлений и разработанных устройств системы управления были определены их точностные возможности и установлены амплитудный и частотный диапазоны для практического использования.

Исследование коэффициентов передачи типовых измерительных приспособлений для контроля размеров в процессе обработки проводилось в динамическом режиме путем задания входного квазигармонического воздействия от вращающейся оправки с регулируемой амплитудой и видом гранности. Обработка круглограмм контролируемой поверхности и осцилограмм выходного сигнала измерительного приспособления проводилась с применением гармонического анализа. При этом были определены систематические и случайные составляющие погрешности передачи в зависимости от частоты вращения, а также спектры динамической погрешности. Исследование влияния параметров контролируемого процесса на точность формирования управления проводилось путем задания на входе измерительно-управляющего блока сигнала, моделирующего контролируемый при обработке

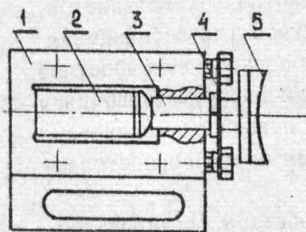


Рис. 1.

- 1 - корпус; 2 - пьезопакет;
- 3 - цилиндрический шток;
- 4 - упругий элемент;
- 5 - изностойкий башмак.

размер. Результаты исследований показали возможность использования одноконтных и двухконтных индуктивных измерительных приспособлений совместно с разработанным блоком для реализации предложенного способа формирования управления круглостью (для двухконтного измерительного приспособления по четным гармоникам) в пределах 5 - 6 гармонических составляющих.

Для обеспечения дополнительных управляемых микроперемещений при-

менительно к внутреннему шлифованию деталей типа колец была разработана конструкция управляемой опоры со встроенным пьезокерамическим пакетом, принцип устройства которой показан на рис.1. Конструктивно пьезопакет жестко связывается с башмаком опоры. При подаче на пьезопакет управляющего электрического напряжения происходит изменение его размеров в осевом направлении, что приводит к соответствующему перемещению башмака опоры. В зависимости от типоразмера пьезопакета и прикладываемого напряжения управляемая опора позволяет обеспечить высокоточные перемещения в диапазоне до 0,04 мм с частотой до 100 гц. При этом относительное изменение амплитуды управляемого перемещения в частотном диапазоне 0 - 100 гц не превышает 5%. Предельная погрешность от нелинейности амплитудной характеристики в динамическом диапазоне перемещений до 20 мкм составляет 10%.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования эффективности разработанного метода управления круглостью.

Исследования проводились на базе внутришлифовального станка "Siage -50" при шлифовании дорожки качения колец подшипников 209/01 на принятых режимах обработки, а также при увеличенных режимах черновой и чистовой подачи до 3,0 и 0,6 мм/мин соответственно.

В результате исследования неуправляемого процесса формообразования были подтверждены теоретические выводы об основных закономерностях изменения отклонений формы в условиях влияния одного из факторов - исходного отклонения от круглости или отклонения формы наружной (базовой) поверхности кольца; в условиях их одновременного влияния; определено влияние исследуемых факторов на конечный результат обработки.

Показано, что процесс изменения отклонения от круглости обрабатываемой поверхности зависит от соотношения параметров круглости обрабатываемой и базовой поверхностей заготовки. Точность формы обработанной поверхности для принятых режимов обработки и исходных погрешностях $\Delta_0 = 6,0 - 20$ мкм определяется, главным образом, накопленным отклонением, обусловленным переносом отклонений формы базовой поверхности на обрабатываемую. Показано, что с увеличением поперечной подачи коэффициент переноса базовых погрешностей ($\Delta_n = 2-6$ мкм) возрастает до единицы.

Экспериментальное исследование динамики управления процессом

формообразования проводилось путем подачи на управляемую опору гармонического сигнала с калиброванной амплитудой и частотой, кратной частоте вращения кольца ($n_g = 280 - 355$ об/мин), с одновременной регистрацией процесса формообразования. Проведенные эксперименты показали, что после окончания переходного процесса, аналогичного процессу накопления, т.е. спустя 8-10 оборотов после включения моделирующего сигнала, на обрабатываемой поверхности устанавливается вполне определенная амплитуда отклонения формы заданного вида, которая зависит от амплитуды управляющего воздействия и принятого режима обработки. Таким образом получены детали с различным по амплитуде и виду граничности отклонением формы поперечного сечения обработанной поверхности. При этом относительное изменение амплитуды образованного отклонения формы в зависимости от частоты подаваемого воздействия (до 10-к кратного увеличения частоты включительно) не превышает $\pm 10\%$, что соизмеримо со случайной составляющей погрешности передачи, определенной по ряду опытов в диапазоне управления до 20 мкм. В результате проведенных исследований были определены числовые значения параметров процесса накопления и процесса исправления, параметров установившегося режима передачи на различных этапах обработки, проведена оценка погрешности измерения. Установлено, что образованная при управлении амплитуда отклонения формы зависит от соотношения между амплитудой перемещения опоры и глубиной слоя, срезаемого за один оборот детали.

Полученные в результате экспериментов числовые значения параметров исследуемых процессов, были использованы при расчете и выборе значений параметров замкнутой системы управления круглостью. Установленный диапазон управляемых перемещений составлял 10-12 мкм и ограничивался низкочастотным спектром гармонических составляющих круглости. При этом была предусмотрена необходимая регулировка коэффициента усиления системы и времени задержки измерительного сигнала.

В результате исследования точности формообразования при шлифовании с регулированием были определены особенности процессов исправления исходных отклонений формы, особенности формообразования на различных этапах обработки, точностные возможности в зависимости от влияющих факторов и параметров настройки системы. При этом получили подтверждение основные теоретические выводы. Доказано, что наиболее интенсивное уменьшение отклонения от

круглости исходной поверхности происходит при значениях параметра управления Q , близких к нулю (коэффициент усиления $C=2$). Как следует из представленных на рис.2 примеров процессов исправления, при регулировании на черновом этапе шлифования за 5 оборотов кольца 4-х вершинная огранка $\Delta_0 = 18-20$ мкм уменьшается до 2 мкм, в то время как без регулирования до 8 мкм. При этом к началу чистового шлифования амплитуда отклонения формы

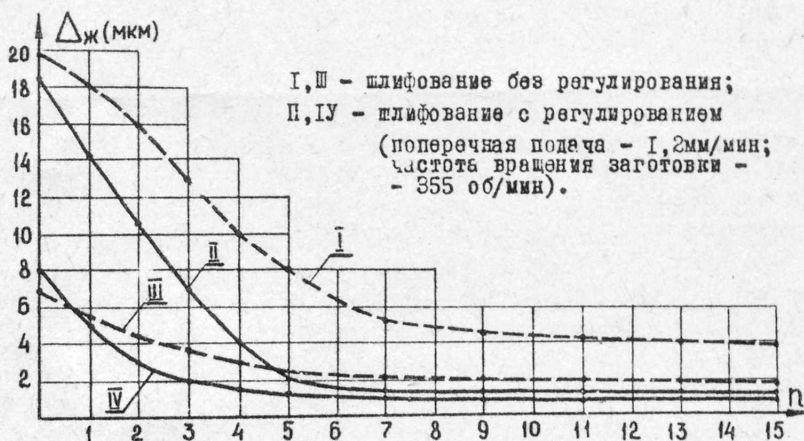


Рис.2. Изменение отклонения от круглости в процессе обработки

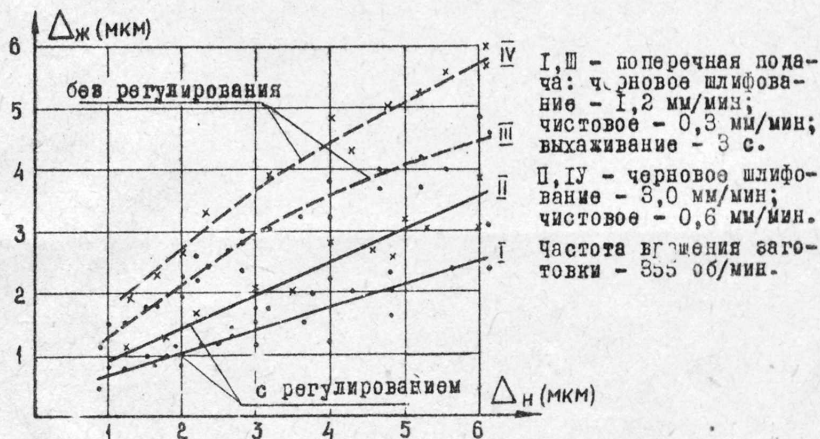


Рис.3. Влияние отклонения формы наружной поверхности кольца

обрабатываемой поверхности при регулировании не превышает 1,0-1,5 мкм, в то время как без регулирования остаточный уровень исходных погрешностей ($\Delta_0 = 6,0-20$ мкм) может составлять от 2 до 4 мкм. Доказано, что с увеличением коэффициента усиления установившееся после завершения процесса исправления амплитудное значение отклонения формы обрабатываемой поверхности уменьшается. В частности, при шлифовании колец с отклонением формы наружной поверхности $\Delta_n = 1-2$ мкм, установившаяся амплитуда отклонения формы обрабатываемой поверхности поддерживается на уровне, не превышающем 1 мкм. На рис. 3 представлены результаты исследования влияния отклонения формы наружной поверхности кольца на отклонение от круглости обработанной дорожки качения при шлифовании с регулированием и без регулирования. Сравнительный анализ точности обработки показал, что при шлифовании с регулированием в области значений отклонения формы наружной поверхности кольца $\Delta_n = 1-2$ мкм отклонение от круглости обработанной дорожки качения уменьшается в 1,6-2 раза. При отклонении формы наружной поверхности кольца в пределах 2-6 мкм точность обработки повышается в 1,6 - 2,5 раза в зависимости от амплитуды и вида граничности наружной поверхности кольца.

В пятой главе даны практические рекомендации по эффективному применению метода управления круглостью деталей типа колец в зависимости от технологических особенностей процесса обработки. Показана методика выбора значений параметров управления. Даны рекомендации по выбору режимов и припусков на обработку, обеспечивающих эффективное применение системы управления при шлифовании. Приведены результаты производственных испытаний системы управления на операции окончательного желобошлифования наружных колец подшипников 209/01. Даны рекомендации по конструированию, наладке и эксплуатации разработанных устройств. Проанализированы факторы, определяющие экономическую эффективность внедрения в условиях типового технологического процесса.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально показано, что закономерности изменения отклонений формы обрабатываемой поверхности детали в процессе врезного шлифования определяются суперпозицией процесса исправления отклонений формы исходной поверхности заготовки и процесса накопления отклонений, возникающих на обрабатываемой поверхности от возмущающих воздействий. При периодическом харак-

тере возмущения процесс накопления подчиняется экспоненциально-возрастающей зависимости.

2. Теоретически показано, что уменьшение составляющих погрешности обработки по отклонению от круглости достигается при использовании метода управления, основанного на регулировании глубины резания по результатам измерения отклонений формы обрабатываемой поверхности детали. Установлено, что в условиях врезного шлифования деталей типа колец на опорах эффективно управление путем дополнительного микроперемещения заготовки относительно инструмента, осуществляемого автоматически при помощи управляемой опоры.

3. Обоснована теоретически и подтверждена экспериментально возможность сокращения времени исправления отклонений формы исходной поверхности заготовки. В частности, показано, что в условиях типовой технологической операции внутреннего шлифования колец подшипников на опорах время исправления исходного отклонения от круглости сокращается более, чем в 3 раза.

4. Экспериментально установлено, что при регулировании достигается уменьшение влияния отклонений формы исходной поверхности заготовки на точность формы детали при увеличенных режимах поперечной подачи. Например, на черновых этапах шлифования исходные погрешности в пределах 6,0-20 мкм и правятся без регулирования до 2-4 мкм, в то время как с регулированием суммарное отклонение от круглости обрабатываемой поверхности не превышает 1,0 - 1,5 мкм.

5. Теоретически и экспериментально доказана возможность уменьшения накопленных отклонений, обусловленных переносом отклонений формы базовой поверхности кольца на обрабатываемую, например, по овальности в 2,5 раза. Это положение распространяется и на ряд других технологических факторов, процесс переноса которых на обрабатываемую поверхность носит закономерный характер.

6. Обоснована теоретически и доказана экспериментально возможность реализации аналоговых способов выделения информации об отклонениях формы обрабатываемой поверхности при врезном характере обработки в виде, используемом непосредственно для регулирования.

7. Экспериментально доказана эффективность применения управляемых опор со встроенными пьезокерамическими преобразователями

для реализации регулирующего движения при шлифовании. При этом диапазон управляемых перемещений может составлять до 0,04 мм с частотой до 100 гц.

8. Экспериментально обоснована возможность получения поверхностей деталей типа колец с заданной формой поперечного сечения с амплитудным значением до нескольких сотых миллиметра в пределах спектра 10-и гармонических составляющих круглости с погрешностью, не превышающей $\pm 10\%$. На этой основе показана возможность применения новой методики исследования процессов исправления и образования отклонений формы, а также динамики управления при врезном шлифовании.

9. В результате внедрения разработанной системы управления круглостью на операции окончательного шлифования дорожки качения наружных колец подшипников достигнуто повышение точности формы в поперечном сечении в 2 раза при обеспечении требований к другим показателям качества обработанной поверхности.

10. Расчетами и результатами производственной эксплуатации доказана экономическая целесообразность применения разработанного метода управления в условиях типового технологического процесса изготовления колец подшипников. В частности, в условиях 20 ПЗ экономический эффект от внедрения системы управления при внутреннем желобшлифовании колец подшипников № 212/01 6 класса точности составляет 6245 руб. в год из расчета на один станок.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Николаев Ю.Л. Определение отклонений формы цилиндрических деталей при управляющем контроле в процессе обработки. - Известия ВУЗов, Машиностроение, 1976, № 6.

2. Щачнев Ю.А., Николаев Ю.Л. Устройство для активного контроля размеров и выявления неточностей формы обрабатываемых изделий. Авт.свид.СССР № 526498.

3. Николаев Ю.Л. Повышение точности обработки при автоматическом регулировании в процессе врезного шлифования. - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1977, № 12.

4. Щачнев Ю.А., Парфенов Б.Г., Николаев Ю.Л., Смирнов В.А. Автоматическое управление точностью обработки при помощи пьезокерамических исполнительных механизмов. - Технология производства, научная организация труда и управления. 1979, выпуск 6.