

М302137

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи
КОЗИЕНКО Анатолия Николаевича

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НЕЖЕСТКИХ
В А Л О В

(05.02.08 - Технология машиностроения)

(Станкостроение и инструментальная
промышленность)

А в т о р е ф е р а т
д и с с е р т а ц и и на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва

1977

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи
КОЗИВЕНКО Анатолия Николаевича

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НЕЖЕСТКИХ
ВАЛОВ

(05.02.08 - Технология машиностроения)

(Станкостроение и инструментальная
промышленность)

А в т о р е ц е р а т
д и с с е р т а ц и и на соискание
ученой степени кандидата те.лических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1302137

Козивенко А. Н. Исследование

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени
Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ДАЛЬСКИЙ А.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор СИРОВАТЧЕНКО П.В.
кандидат технических наук,
доцент КОМАРОВ В.В.

Ведущее предприятие - Московский завод координатно-
расточных станков.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1977г.
на заседании специализированного Совета по технологии машино-
строения, шифр К-053.15.15. МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

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

Ваши отзывы и предложения на автореферат в двух экзем-
плях, заверенных печатью, просим направлять по указанному
адресу.

Автореферат разослан "___" _____ 1977 года

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
К.Т.Н., доцент

МЕШЕРЯКОВ Р.К.

Л 79326 Подп.к печ. 14/1-77г. Тип.МВТУ.Зак.180 Тир.100 экз.

● ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Актуальность проблемы. Перед отечественным машиностроением в десятой пятилетке поставлена задача повышения эффективности производства, улучшения качества выпускаемых машин и их надежности и долговечности на основе автоматизации и совершенствования технологии производства. Качество машин во многом зависит от точности их изготовления. Повышение точности сборки и функциональных свойств прецизионных изделий препятствуют погрешности формы деталей в различных сечениях, а также точность взаимного расположения поверхностей. Наблюдения показали, что требуемая точность формы и расположения поверхностей не всегда обеспечивается при обработке партии однотипных деталей на финишных операциях. Имеет место рассеяние погрешностей как по величине и взаимному расположению, так и по виду. Этим, в значительной мере, объясняется непостоянство эксплуатационных параметров функционирующих деталей. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что в настоящее время, несмотря на значительные научные разработки, выполненные многими учеными по вопросам повышения точности формы и расположения поверхностей, еще недостаточно изучены методы технологического воздействия на систему СНИД (Станок-приспособление - инструмент - деталь), которые обеспечивают стабильное получение погрешности формы. В значительной мере это относится к электрошпинделям, представляющим особую группу технологически маложестких деталей со специфическими условиями достижения точности формы при окончательной обработке и мало изучавшимися до настоящего времени. Возрастающие требования к качеству обрабатываемых поверхностей электрошпинделей, работающих в области высоких скоростей (48000÷120000 об/мин) и роста производительности ставят проблему совершенствования технологических методов обеспечения точности формы и положения поверхностей в число самых актуальных.

Цель работы. Исследование технологических возможностей повышения точности формы и взаимного расположения поверхностей при окончательном шлифовании чужестких валов на центрах в условиях использования баз нормальной точности.

Методы исследования. Теоретические исследования в работе проводились на базе основ технологии машиностроения, теории технологической наследственности и механических колеба-

ний. Экспериментальные исследования технологических методов обеспечения точности формы и расположения поверхностей при окончательном шлифовании выполнялись на высокоточном оборудовании, оснащенном современной контрольно-измерительной аппаратурой и специально сконструированными устройствами, расширяющими технологические возможности станка. Производственные исследования включали получение фактических данных по точности обработки с последующим анализом на основе теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна. В результате проведенного теоретического анализа процесса формообразования при шлифовании нежестких валов на неподвижных центрах выявлено влияние основных технологических параметров системы СПИД на точность формы и расположения поверхностей. Доказана принципиальная возможность уменьшения технологическими методами наследственного переноса погрешности формы с центровых отверстий и наружной поверхности заготовки на обработанную поверхность. Разработана методика определения приведенных масс заготовки и круга, а также коэффициента трения в системе "деталь-центры", что позволяет определить значения коэффициентов передачи погрешности формы при выполнении любой операции обработки электрошпинделя. Разработаны устройства, обеспечивающие уменьшение рассеяния погрешности формы поперечного сечения обрабатываемых деталей. Впервые проведено исследование точности формообразования при круглом шлифовании нежестких валов на текстолитовых центрах.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований получены практические рекомендации по исправлению погрешности формы в поперечном сечении и достижения точности расположения поверхностей за счет: 1) регулирования жесткости в сопряжении "центры-центровые отверстия" (изменением натяга технологической системы и использованием специальных центров малой жесткости); 2) регулирования угловой частоты вращения заготовки. Предложена методика выравнивания жесткости системы "деталь-центры" за счет использования специальных центров и люнета с регулируемым усилием поджатия кулачков, повышающих точность формы в продольном сечении детали. Рекомендации предназначены для станкостроительных и инструментальных заводов, изготавливающих высокоточные изделия.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады на научных семинарах кафедры "Технология конструктивных материалов" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1973-1975 г., на кафедре "Технология машиностроения" Иркутского политехнического института в 1976 г., а также опубликованы 4 статьи в журналах. Разработанные методы обеспечения точности формы вошли в отчет по хозяйственной теме: "Технологическое обеспечение надежности производства электро- и пневмошпинделей" и апробированы при изготовлении нескольких партий электрошпинделей.

Объем работы. Диссертация изложена на 112 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе и содержит 59 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 82 наименований.

В первой главе диссертации дается обзор литературы и анализ производственных достижений по теме исследования, отражены современные технологические методы обеспечения точности формы при изготовлении нежестких валов, обоснованы цель и задачи исследования. Показано, что одной из причин снижения технологической надежности высокоточных узлов является наличие погрешности формы наиболее ответственных деталей. Так, пониженная точность обработки деталей электрошпинделя шлифовального станка обуславливает низкую точность сборки его, что ведет к понижению жесткости и виброустойчивости и, в конечном итоге, к снижению надежности самого станка. Для нежестких деталей погрешности формы достигают при чистовом шлифовании 60-65% от общей погрешности обработки и имеют большее значение для работы в машине, чем отклонения от их размеров. Образованию погрешностей формы при обработке нежестких валов, связанной с рассеянием размеров по длине детали, упругими деформациями системы СПИД, с износом круга, колебанием величины радиальной составляющей усилия резания посвящены работы А.П.Соколовского, В.Г.Подпоркина, В.В.Чебоксарова и др. Вопросам обеспечения точности формы прецизионных деталей, обрабатываемых на круглошлифовальных станках, посвящен цикл работ, выполненных на кафедре "Технология конструктивных материалов" МВТУ имени Н.Э.Баумана. Окончательная обработка наружных поверхностей нежестких валов выполняется при базировании их на неподвижных центрах с дополнительным использованием 4 люнетов, которые

повышают жесткость системы СПИД. При такой схеме установки детали точность формы шлифуемых поверхностей зависит как от точности формы центровых отверстий, так и от точности формы наружной цилиндрической поверхности, а также степени совпадения их осей с осью центров станка. Наличие геометрических неточностей базовых поверхностей приводит к тому, что заготовка осуществляет сложное движение и положение ее оси все время меняется по отношению к оси центров станка. Непостоянство относительного перемещения детали вызывает в установившемся режиме шлифования искажение формы обрабатываемой поверхности, на которой в подавляющем большинстве случаев наследуется некруглость базовых поверхностей. Несмотря на существенное повышение точности обработки опорных центров станка и центровых отверстий не всегда возможно обеспечить отклонение формы обрабатываемых поверхностей в пределах десятых долей микрометра. Более того, с уменьшением некруглости центровых отверстий возникают трудности заметного повышения точности формы деталей, т.к. при отклонениях формы центровых отверстий в пределах 1 мкм коэффициент наследования близок к единице.

Обзор опубликованных работ и анализ производственного опыта показал, что в настоящее время отсутствуют научно-обоснованные методы технологического воздействия на систему СПИД с целью обеспечения заданной точности формы, нет данных по исследованию процесса шлифования прецизионных деталей на центровых отверстиях нормальной точности, отсутствуют исследования по вопросу уменьшения рассеяния погрешности формы при отделочном шлифовании нежестких валов. В этих направлениях и необходимо проводить дальнейшие исследования для разработки методов, повышающих точность процесса формообразования при шлифовании на центрах. Поэтому в соответствии с целью исследований в диссертации поставлены следующие задачи:

1. Исследование изменения величины жесткости в сопряжении "центры-центровые отверстия" по углу поворота на точность формообразования при шлифовании нежестких валов.
2. Изучение и анализ влияния частоты изменений некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовки на точность обработки при круглом шлифовании.
3. Экспериментальное исследование влияния материала цен-

тров и осевой силы закрепления заготовки на рассеяние погрешности формы в поперечном сечении и точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей деталей.

4. Установление необходимой величины предварительного натяга кулачков лунета, с целью повышения точности формы продольного сечения, при условии непрерывно изменяющегося размера детали.

5. Разработка мероприятий по технологическому обеспечению точности формообразования в процессе окончательного шлифования нежестких валов при использовании баз нормальной точности.

Во второй главе проводится анализ технологических факторов, влияющих на точность процесса формообразования при отделочном шлифовании. Погрешность формы поперечного сечения обработанной детали определяется относительным перемещением заготовки и шлифовального круга. В результате решения уравнения движения системы СПИД получены зависимости изменения величины погрешности формы, вызываемые некруглостью центровых отверстий ($\Delta\phi_j$) и некруглостью наружной поверхности заготовки ($\Delta\phi_r$).

$$\Delta\phi_j = \frac{\Delta j_1}{j_1} \mathcal{K}(t_{cp}) |A| ; \quad \Delta\phi_r = \mathcal{E} N |B| , \quad (1)$$

где j_1 - жесткость в сопряжении "центр-центровое отверстие"; Δj_1 - переменная составляющая жесткости ($\Delta j_1 = \frac{j_{\max} - j_{\min}}{2}$); $\mathcal{K}$ - величина, характеризующая усилие резания; t_{cp} - средняя глубина резания; N - амплитуда некруглости наружной поверхности заготовки; $|A|$ и $|B|$ - комплексные числа, которые характеризуют наследственный перенос некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовки на обрабатываемую поверхность.

Несмотря на одинаковые конструктивные параметры обрабатываемых деталей, последние имеют различную погрешность формы в продольном и поперечном сечениях. Рассеяние этих погрешностей определяется в основном технологическими причинами, среди которых доминирующее место занимают при отделочном шлифовании погрешности наследственного характера. Приведенная в диссертации схема наследования погрешности формы показывает, что снижение $\Delta\phi$ в процессе шлифования может быть достигнуто, при прочих равных условиях, за счет уменьшения коэффициентов $|A|$ и $|B|$. Для определения технологических путей снижения погрешности формы анализируются значения передаточных коэффициентов,

найденных из решения уравнения движения системы, которые без учета трения имеют вид:

$$A = \frac{j_2 - m_2 \omega_j^2}{(j_1 - m_1 \omega_j^2)(j_2 - m_2 \omega_j^2) + 2\ell[j_1 + j_2 - \omega_j^2(m_1 + m_2)]} \quad (2)$$

$$B = \frac{-(j_1 - m_1 \omega_p^2) - (j_2 - m_2 \omega_p^2)}{(j_1 - m_1 \omega_p^2)(j_2 - m_2 \omega_p^2) + 2\ell[j_1 + j_2 - \omega_p^2(m_1 + m_2)]} \quad (3)$$

где j_2 — жесткость в сопряжении "шпиндель-опора"; m_1 и m_2 — соответственно приведенные массы заготовки и круга; $\omega_j = K_j \frac{\pi n}{30}$ и $\omega_p = K_p \frac{\pi n}{30}$ — циклические частоты изменения жесткости и текущего радиуса заготовки; K_j и K_p — число "волн" на центровом отверстии и наружной поверхности заготовки; n — угловая частота вращения заготовки.

При анализе выражения (2) отмечается зависимость величины A от постоянной составляющей жесткости сопряжения "центр — центровое отверстие". С увеличением ее коэффициент A наследственной передачи погрешности с поверхности центровых отверстий на поверхность обработанной детали имеет экстремальную зависимость. Максимум значения A находится при условии:

$$\frac{1}{m_1 \omega_j^2} = -\frac{1}{2\ell} + \frac{1}{j_2 - m_2 \omega_j^2} \quad (4)$$

В выражении (3) характер зависимости $B = f(j_1)$ определяется, кроме того, влиянием величины жесткости шлифовальной бабки. При этом возможны четыре варианта изменения $|B|$, для которых граничные условия запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \text{а) } j_1^{(a)} < 0 < j_1^{(b)}; j_2 < m_2 \omega_p^2 - 2\ell; B_{ac} > 0; \\ \text{б) } 0 < j_1^{(a)} < j_1^{(b)}; m_2 \omega_p^2 - 2\ell < j_2 < (m_1 + m_2) \omega_p^2; B_{ac} < 0; \\ \text{в) } j_1^{(a)} < 0 < j_1^{(b)}; (m_1 + m_2) \omega_p^2 < j_2 < j_2^{(a)}; B_{ac} < 0; \\ \text{г) } j_1^{(a)} < j_1^{(b)} < 0; j_2 > j_2^{(a)}; B_{ac} > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Произведенный анализ свидетельствует о нелинейности наследственной передачи погрешности формы наружной поверхности заготовки и с центровых отверстий на поверхность обработанной детали. Он дает возможность определить тенденцию зависимости $A = f(j_1)$, $B = f(j_1)$ и показывает, что повышение жесткости не всегда влечет за собой уменьшение переноса погрешностей. Наиболее опасной, с точки зрения роста A и B зоной регулирования являются условия изменения жесткости $j_1 = 1200 \text{ кгс/мм} \div 1600 \text{ кгс/мм}$ при $n = 300 \text{ об/мин}$. В этом слу-

чае наблюдается увеличение передаточной функции в 5-7 раз. С увеличением массы детали и огранки центрального отверстия ($m_1 = 1 \text{ кгс.с}^2/\text{см}$; $k_j = 3$). границы регулирования жесткостью смещаются в сторону ее уменьшения.

Практика эксплуатации круглошлифовальных станков показывает, что некруглость поверхностей обработанных деталей в значительной мере зависит от частоты вращения заготовки. При этом амплитуды погрешностей формы, переносимые с центральных отверстий и с наружной поверхности заготовки на поверхность детали, пропорциональны модулям комплексных чисел $|A| = |A|(\omega_j)$ и $|B| = |B|(\omega_p)$. Анализ зависимостей (2) и (3) с учетом изменения угловой частоты вращения заготовки свидетельствует о следующем.

1. Наследственный перенос погрешности формы центральных отверстий заготовки и ее наружной поверхности на поверхность обработанной детали оказываются максимальными на частотах

$$\omega_j = \omega_p = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (6)$$

где $b = -[j_1 m_2 + j_2 m_1 - 2\mathcal{H}(m_1 + m_2)]$;

$a = m_1 m_2$; $c = j_1 j_2 + 2\mathcal{H}(j_1 + j_2)$

2. Минимальный перенос погрешности формы центральных отверстий происходит на частоте

$$\omega_j = \sqrt{\frac{j_1}{m_2}} \quad (7)$$

3. Минимальному переносу погрешности формы наружной поверхности заготовки соответствует частота

$$\omega_p = \sqrt{\frac{j_1 + j_2}{m_1 + m_2}} \quad (8)$$

Результатом теоретических исследований данной главы явилось определение граничных условий обеспечения минимальной погрешности форм при шлифовании нежестких валов за счет регулирования частоты вращения заготовки и жесткости в сопряжении "центр-центрковое отверстие".

В третьей главе приведено описание экспериментальных установок, методики проведения специальных измерений и исследований, объектов исследования. Одним из методов решения поставленных в работе задач являлось экспериментальное исследование влияния материала центров и осевой силы закрепления заготовки (P_0) на рассеяние погрешности формы в поперечном сечении и

точности расположения поверхностей детали. Необходимость проверки теоретических исследований предопределила изготовление специального устройства для определения приведенных масс заготовки и круга (m_1 и m_2) и коэффициентов демпфирования в узлах "деталь-центры" (μ_1) и "шпиндель-опоры" (μ_2), а также разработку методики их расчета. Определение указанных величин производилось после расшифровки осциллограмм по следующим формулам:

$$m_1 = \frac{j_1 T_1^2}{4\pi^2} ; \quad \mu_1 = \frac{j_1 T_1 \Delta a_{m1}}{2\pi^2 \cdot a_{m1}} ; \quad (9)$$

$$m_2 = \frac{j_2 T_2^2}{4\pi^2} ; \quad \mu_2 = \frac{j_2 T_2 \Delta a_{m2}}{2\pi^2 a_{m2}} ,$$

где T_1 и T_2 - период колебания соответственно для заготовки и шпинделя; a_{m1} и a_{m2} - амплитуды записи колебаний.

В диссертации дано описание конструкций и принципа действия каждого устройства, позволившего проверить влияние на точность формообразования таких факторов как осевое усилие закрепления детали, материал центров, скорость вращения заготовки.

При определении условий, обеспечивающих стабилизацию жесткости по углу поворота, были использованы зависимости ее изменения от величины силы закрепления заготовки и материала центров. Одновременно рассматривалось влияние на изменение жесткости сопряжения пагаметров центровых отверстий (диаметра и длины образующей). Методикой исследования предусматривалось определение податливости стыка "центр-центровое отверстие" как для неподвижной, так и для вращающейся заготовок. Это позволило наглядно показать, что качественное изменение жесткости по углу поворота (снижение Δj_1) имеет место как при увеличении P_0 , так и при изменении твердости материала центра. Последнее достигалось применением специальных текстолитовых центров. Отмечалось количественное изменение величины j_1 . Так, в случае стальных центров, при $P_0 = 15$ кгс, $j_1 = 3980$ кгс/мм; $j_2 = 5630$ кгс/мм; а для текстолитовых центров $j_1 = 630$ кгс/мм, $j_2 = 695$ кгс/мм (при $K_j = 2$). Вместе с тем, известно, что колебания заготовки при вращении на центрах, вызваны не столько величиной составляющей жесткости, сколько непостоянством этой величины по углу поворота. Для рассматриваемого случая Δj_1 для стальных центров составило 1650 кгс/мм

или 29%, для текстолитовых - 65 кгс/мм или 3% от среднего значения жесткости в сопряжении "центр-центровое отверстие" при некруглости центрального отверстия $\Delta c.o. = 8$ мкм. Характерно, что увеличение P_0 наиболее эффективно влияет на уменьшение радиального биения заготовок устанавливаемых на стальные центры, у которых центровые отверстия по форме приближаются к овалу ($K_j = 2$). При этом снижение амплитуды происходит в 2-3,5 раза, в зависимости от величины погрешности центрального отверстия. При $P_0 > 20$ кгс его влияние на изменение амплитуды заметно снижается, что объясняется увеличением числа контактирующих поверхностей. Наличие различной огранки центровых отверстий вызывает различный по амплитуде и частоте характер движения концов вала на стальных центрах. Так, при $n = 100$ об/мин и $K_j = 2$ частота колебания конца вала составляет 200 гц, при $K_j = 3 - 600$ гц. Максимальное смещение концов вала при этом на стальных центрах, с учетом взаимного расположения поперечных сечений центровых отверстий и их погрешности, достигнет от 0,8 мкм до 3,5 мкм. Использование текстолитовых центров в тех же условиях обеспечивает смещение концов вала в пределах $0 \pm 0,3$ мкм. Кроме того, начиная с 80 об/мин, характер движения концов вала и всей системы в целом в этом случае представляет собой колебания с одной частотой, пропорциональной частоте вращения заготовки.

В диссертации приводится анализ осциллограмм и полученных на основе графических зависимостей данных, достоверно отражающих динамику выполняемых процессов. По результатам записи характера износа центров следует отметить, что текстолитовые центры изнашиваются в 3-3,5 раза быстрее стальных. Однако на точность обработки это явление не сказывается, так как воледействие упругости материала центра, последний компенсирует образующиеся угловые неточности между центром и центровым отверстием.

В главе четвертой исследовалось исправление технологическими методами погрешности формы при отделочном шлифовании нежестких валов. Производственные исследования выявили влияние изменения севои силы закрепления заготовок на рассеяние погрешности формы. Колебания этой силы от номинального значения

$P_0 = 15$ кгс составляло от 2,4 кгс до 7,5 кгс, что явилось ре-

результатом погрешности изготовления центровых отверстий (величина допуска на размер L изменяется от 0,4 мм до 1,5 мм в зависимости от типа электрошпинделя, а на диаметры центровых гнезд от 0,2 мм до 0,5 мм). Анализ зависимости $j_1 = f(\rho_0)$ заставляет обращать особое внимание на необходимость поддерживать постоянным значение ρ_0 при изготовлении партии высокоточных деталей. Учитывая это обстоятельство, было изготовлено специальное устройство, позволяющее контролировать постоянство ρ_0 в сопряжении "центр-центровое отверстие". Процесс шлифования нежестких валов на стальных центрах в условиях, когда $\rho_0 = \text{const}$ и $\rho_0 \neq \text{const}$, а также на текстолитовых центрах осуществлялся на следующих режимах: $V_k = 35$ м/с, $S_{kr} = (0,002-0,004)$ мм/об, $V_{ст} = (5-8)$ м/мин. Припуск на обработку (0,08-0,12) мм на диаметр. Рассеяние погрешности формы центровых отверстий в партии деталей составляло от 4 мкм до 16 мкм. При этом рассматривалось исправление погрешности формы, которая была обусловлена как погрешностью исходной наружной поверхности заготовки, так и погрешностью центровых отверстий. Считалось, что $K_j = K_p$, т.к. в области низких гармонических составляющих имеет место равенство по форме некруглостей профиля указанных поверхностей.

При стабилизации жесткости в сопряжении "деталь-центры" за счет постоянства ρ_0 имеет место снижение не только величины, но и поля рассеяния погрешности формы. Использование текстолитовых центров значительно больше повышает качество обработки за счет лучшего выравнивания жесткости по углу поворота. Для оценки точности изготовления деталей по каждому способу использовался показатель рассеяния погрешности формы K_p (ГОСТ 16306-74), значение которого должно быть меньше единицы. Результаты оценки записи погрешности формы поперечных сечений по круглограммам показали, что при

$\rho_0 = \text{от } 12 \text{ кгс до } 19 \text{ кгс,}$	$K_p = 1,24 > 1$	центры
$\rho_0 = 15 \text{ кгс} = \text{const}$	$K_p = 0,985 < 1$	стальные
$\rho_0 = 10 \text{ кгс} = \text{const}$	$K_p = 0,541 < 1$	центры
		текстолитовые

Отмечено, что зависимость изменения погрешности формы от частоты вращения заготовки имеет явно выраженный экстремум в области $n = 200 - 300$ об/мин при $K_j = K_p = 2$ и $n = 150 - 12$

250 об/мин при $K_j = K_p = 3$. Наилучшие результаты были получены при шлифовании с частотой вращения равной 100 об/мин. В этом случае наблюдалось исправление погрешности формы на 25 - 30% при $K_j = K_p = 2$ и на 40-50% - при $K_j = K_p = 3$ по сравнению с рекомендуемой при отделочном шлифовании частотой вращения $n = 140$ об/мин. Время выхаживания в обоих случаях составляло 10 с, поперечная подача - 0,004 об/мин, снимаемый припуск на сторону - 0,08 мм. При обработке нежестких валов по схеме попутного резания имеет место резкое ухудшение шероховатости поверхности ($0,16 \sqrt{\text{мкм}}$ место $0,04 \sqrt{\text{мкм}}$), что связано с увеличением частоты установившихся колебаний системы "деталь-центры". Приведены исследования повышения точности формы продольного сечения детали за счет выравнивания упругих перемещений и стабилизации их в процессе шлифования. В результате выравнивания жесткости за счет использования специальных центров имело место минимальная погрешность формы продольного сечения 0,5 - 1,5 мкм. Более эффективным является процесс шлифования нежестких валов при использовании лонета, кулачкам которого задавался предварительный натяг. Разгрузка детали от изгибающих сил позволила при сохранении производительности устранить погрешности формы в продольном сечении. Анализ результатов контроля образующих валов при использовании специальных центров показал, что для получения наименьшей погрешности формы величина предварительного натяга должна устанавливаться ^{0,5-8 мкм} при обработке на стальных центрах; 2-4 мкм - на текстолитовых; 1-3 мкм - на комбинированных центрах.

Теоретический анализ, подтвержденный экспериментом, показал уменьшение несоосности двух цилиндрических поверхностей детали при условии, когда в сопряжениях "центры-центровые отверстия" было минимальное колебание жесткости по углу поворота относительно ее среднего значения. При шлифовании нежестких валов на текстолитовых центрах, когда погрешность формы центровых отверстий составляла от 4 мкм до 16 мкм, обеспечивалась несоосность в пределах $0 \div 2$ мкм. При этом погрешность формы поперечного сечения обработанных поверхностей составляла $0,2 \div 0,6$ мкм.

В пятой главе показана эффективность использования технологических методов обеспечения точности формы и даются драг-

тические рекомендации по их реализации. Оценка путей повышения надежности технологических процессов производства электрошпинделей производилась на основе теории и методов определения экономической эффективности от внедрения новой техники. Приведен расчет ожидаемой экономической эффективности применения разработанных устройств и методов, позволяющих на центрах обычной точности $\Delta_{ц.о} > 1$ мкм, получать высокую точность формы. Внедрение устройства для регулирования P_0 , а также текстолитовых центров позволило исключить операцию доводки центровых отверстий. Повышение надежности электрошпинделей за счет уменьшения погрешности формы учтено в экономическом анализе как рост производительности, т.к. означает не только дополнительный выпуск изделий, но и сокращение количества переборок (ремонтов) шпинделя. Применение предлагаемых методов повышения точности обработки жестких валов обеспечивает стабилизацию выходных параметров деталей по форме, т.к. уменьшается коэффициент рассеяния погрешности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований показана возможность и специфика уменьшения коэффициентов наследственной передачи погрешности формы при отделочном шлифовании жестких валов за счет регулирования таких технологических параметров системы СПИД как жесткость в сопряжении "центр-центровые отверстия", скорость вращения заготовки, величина предварительного натяга кулачков люнета.

2. В результате анализа технологической системы установлено, что регулирование жесткости сопряжения "деталь-центры" является эффективным средством повышения точности формы и расположения поверхностей.

3. Разработана простая методика определения величины приведенной массы заготовки и коэффициента трения в системе "деталь-центры", которая облегчает нахождение численной величины коэффициентов передачи погрешности формы. Таким образом, становится возможной не только качественная, но и количественная оценка точности механической обработки деталей на различных этапах технологического процесса.

4. Для исправления погрешности формы при шлифовании и уменьшения ее рассеяния разработаны специальные устройства. Приведены условия их проектирования, расчета и эксплуатации.

5. При расчете погрешности формы, с учетом динамики процесса формообразования, следует рассматривать динамическую систему круглошлифовального станка, принимая во внимание непостоянство жесткости по углу поворота и наличие демпфирования в системе "деталь-центры".

6. Установлено, что при использовании текстолитовых центров и регулировании R_0 повышается точность формы до 0,2 - 0,4 мкм и уменьшается поле рассеяния этой погрешности на 25 - 30%.

7. Выявлено, что наиболее эффективным является применение текстолитовых центров при отделочном шлифовании деталей, вес которых не превышает 5 кг в условиях эксперимента.

8. Для повышения точности формы в продольном сечении необходима разгрузка детали от изгибающих сил за счет предварительного натяга кулачков люнета в сочетании с текстолитовыми центрами.

9. Установлено, что для обеспечения несоосности опорных шеек электрошпинделя в пределах менее 1 мкм целесообразно применение текстолитовых центров.

10. Использование в промышленности рассматриваемых технологических методов обеспечения точности формы при шлифовании нежестких валов позволяет значительно повысить качество выпускаемой продукции. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения указанных методов в производство прецизионных электрошпинделей составляет 90 тыс.руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Камсюк М.С., Козленко А.И. Анализ влияния жесткости сопряжения "центр-заготовка" на точность обработки при круглом шлифовании, "Известия ВУЗов". Машиностроение", М., №5, 1976.

2. Камсюк М.С., Козиенко А.Н. К вопросу о расчете точности формы поперечных сечений валов при шлифовании на неподвижных центрах. Труды МВТУ №202. Прогрессивная технология конструктивных материалов, М., 1976, с.129-136.

3. Камсюк М.С. Козиенко А.Н. Качественный анализ влияния частоты изменений некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовок на точность обработки при круглом шлифовании, Труды Читинского политехнического института, Я.П., Чита, 1975, с.118-124.

4. Козиенко А.Н., Камсюк М.С., Селиванов А.М., Особенности отделочного шлифования высокоточных валов, В сб. "Технология производства, научная организация труда и управления", М., МТ, 1976, с.25-27.

5. Технический отчет о научно-исследовательской теме: "Технологическое обеспечение надежности производства электро- и пневмошпинделей", М., МВТУ, 1975, 233с.