

М228530

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

Валерий Тимофеевич НИКИТИЧ

На правах рукописи

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ТИПА ВАЛОВ С ДОЛЕМИКРОННОЙ ТОЧНОСТЬЮ
ФОРМЫ**

(Специальность 05.02.08 — Технология машиностроения)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор Дальский А. М.

Научный консультант —
кандидат технических наук, доцент Камсюк М. С.

Официальные оппоненты:
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор Корсаков В. С.,
кандидат технических наук Колтунов И. Б.

Ведущее предприятие —
Московский завод координатно-расточных станков.

Автореферат разослан * *

1974 г.

Защита диссертации состоится * *

1974 г.

на заседании Совета фа-
культета производства М
Трудового Красного З
имени Н. Э. Баумана п
ская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х
просим высылать по у

С диссертацией мо-
лища.

Ученый секретарь С
кандидат технических

4228530

На современном этапе развития машиностроения одно из ведущих мест занимает проблема повышения надежности выпускаемой продукции, решение которой неразрывно связано с вопросами увеличения точности обработки и сборки. Функциональные свойства деталей, определяющие работоспособность изделий, в значительной степени зависят от параметров качества поверхностного слоя, среди которых ведущее место занимают отклонения формы в поперечном сечении. Последнее приобретает исключительно важное значение для прецизионных электро- и пневмошпинделей, работающих в области высоких скоростей (18000 - 300000 об/мин), поэтому основные детали их должны изготавливаться с точностью формы до 0,5 мкм.

В этих условиях на передний край борьбы за повышение точности продукции по праву выдвигается станкостроение. Увеличение выпуска точных и совершенных станков представляет собой одно из основных направлений развития отечественного машиностроения. В этой связи изыскание эффективных методов обработки прецизионных деталей, обеспечивающих экономичное и стабильное получение высокой точности формы, является важнейшей задачей прецизионного станкостроения.

М228530

Одним из основных методов финишной обработки деталей типа валов является круглое шлифование на неподвижных центрах с использованием в качестве установочных баз центровых отверстий. Известно, что отклонения формы центровых отверстий в поперечном сечении оказывают существенное влияние на достижение точности формы детали и, особенно, в области выше 1 мкм. Поэтому вопросы обеспечения долемикронной точности формы при использовании установочных баз нормальной точности имеют актуальное значение для прецизионного станкостроения. Решению этих вопросов, которые в настоящее время являются недостаточно изученными, посвящена настоящая работа.

Глава I. Проблема обеспечения точности формы высокоточных деталей. Постановка задачи.

Одной из причин недостаточной технологической надежности отдельных типов станков является наличие отклонений формы наиболее ответственных деталей. Так волнистость поверхности контактируемых поверхностей уменьшает площадь фактического кон-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



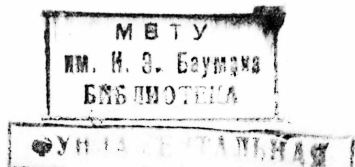
1228530

Никитич В.Т. Исследование

I

такта, что снижает контактную жесткость реальных стыков, особенно в прецизионных станках, где действуют малые нагрузки; является одним из факторов преждевременного выхода из строя высокооборотных электрошпинделей на подшипниках качения. Некруглость формы деталей наряду с отрицательным влиянием на функциональные параметры изделий в ряде случаев не позволяет обеспечивать точность формы при шлифовании в пределах десятых долей микрометра.

Возникновение волнистости поверхности большинство исследователей связывают с вибрациями в технологической системе. На параметры образующейся волнистости влияют состояние рабочей поверхности шлифовального круга, недостаточная жесткость технологической системы, режимы шлифования, неуравновешенность шлифовального круга и детали. В ряде работ рассматривается взаимосвязь волнистости шлифовального круга с вызываемой ею волнистостью обработанной поверхности детали, а также влияние "следов" обработки от предыдущего прохода. На образование погрешности формы высокоточных валов, как отмечает ряд авторов, оказывают влияние отклонения формы центровых отверстий и центров станка, а также некоторые геометрические параметры их (диаметр и длина образующей, несоосность центровых отверстий и центров, несовпадение углов и т.п.). Одним из мероприятий для обеспечения высокой точности деталей предлагаются различные методы правки центровых отверстий. Необходимость тщательной правки центровых отверстий обусловлена тем, что из-за наличия на поверхности их "выступов" и "впадин" контакт детали и центра осуществляется лишь по данным "выступам" и жесткость системы "центр-центровое отверстие", а значит и упругие перемещения детали под действием усилия резания в этих условиях непостоянны по углу поворота заготовки. Непостоянство смещений детали в установившемся режиме шлифования приводит к образованию погрешности формы обработанной поверхности, т.е. имеет место наследственный перенос погрешностей центровых отверстий. Коэффициент наследования зависит не только от величины некруглости формы центровых отверстий, а также и от количества "выступов". Установлено, что коэффициент наследования возрастает при уменьшении абсолютной величины некруглости центровых отверстий и при овальной форме их он может быть больше единицы.



Следовательно, при весьма точном центровом отверстии (в пределах 1 мкм) возникают наибольшие трудности обеспечить точность формы деталей равной десятым долям микрометра. Доводка и притирка позволяют снизить некруглость центровых отверстий и повысить точность формы деталей, но нужно отметить, что введение указанных операций приводит к повышенному расходу правящего инструмента, к снижению производительности обработки и, в ряде случаев, не дает возможности обеспечить долемикроновую точность формы при наличии некруглости наружной поверхности заготовки.

Следовательно, наряду с повышением точности установочных баз для обеспечения долемикроновой точности необходимо изыскивать такие пути, которые позволяли бы непосредственно в процессе шлифования препятствовать наследственному переносу погрешностей центровых отверстий, а также наружной поверхности заготовки.

В некоторых работах рассматриваются вопросы исправления погрешности формы при наличии непостоянства припуска или эксцентриситета наружной поверхности заготовки путем управления упругими перемещениями и стабилизации усилия резания. Достижимая точность не превышает нескольких микрометров. Вопросы исправления погрешности формы при условии обеспечения точности формы выше 1 мкм практически не освещены в литературе. Совершенно не изученными являются вопросы влияния вынужденных крутильных колебаний на конечную точность формы при шлифовании. Недостаточно работ, в которых бы исследовалась проблема обеспечения долемикроновой точности деталей при установке их на центровые отверстия нормальной точности (1 - 6 мкм), представляющая значительный интерес для прецизионного станкостроения.

Исходя из вышесказанного в настоящей работе поставлены задачи:

1. Исследовать теоретически: динамику процесса шлифования деталей типа валов на центрах в условиях непостоянства жесткости, процесс шлифования вала при наличии нежесткого привода вращения заготовки, условия исправления погрешности формы.

2. Исследовать экспериментально: исправление погрешности формы при изменении приведенной массы заготовки, жесткости привода вращения и окружной подачи заготовки, влияние вынужденных

крутильных колебаний на точность формы валов.

3. Дать практические рекомендации по обеспечению долемин-
ронной точности формы деталей типа валов.

Глава П. Теоретический анализ обеспечения высокой точности формы валов при шлифовании на центрах.

С целью установления основных механических явлений, при-
сущих шлифованию валов в условиях переменной жесткости стыка
"центр-центровое отверстие" и определения технологических путей
снижения погрешности формы исследовалось движение вала на цент-
рах. Для случая обработки вблизи одного из центров с учетом со-
измеримости жесткостей узла "шпиндель-шлифовальный круг"
(жесткость круга - j_2) и сопряжения "центр-центровое отвер-
стие (жесткость заготовки - $j_{заг}$), уравнение движения
системы запишется в виде

$$\begin{cases} m_1 \ddot{\xi}_1 + \mu_1 \dot{\xi}_1 + [j_{01} + \chi] \xi_1 - \chi \xi_2 = \chi t_{cp} \frac{\Delta j_1}{j_{01}} \cos \omega_j \tau - \chi H \cos(\omega_p \tau - \psi) \\ m_2 \ddot{\xi}_2 + \mu_2 \dot{\xi}_2 + [j_2 + \chi] \xi_2 - \chi \xi_1 = \chi H \cos(\omega_p \tau - \psi) \end{cases} \quad (I)$$

где ξ_1 и ξ_2 - соответственно непостоянство смещений заготов-
ки и шлифовального круга; m_1 и m_2 - приведенные массы за-
готовки и круга; μ_1 и μ_2 - коэффициенты демпфирования; j_{01} -
постоянная составляющая жесткости заготовки; Δj_1 - её пере-
менная составляющая ($\Delta j_1 = \frac{j_{max} - j_{min}}{2}$); χ - постоянная
величина, характеризующая усилие резания; t_{cp} - средняя глу-
бина резания; H - амплитуда некруглости наружной поверхности
заготовки; $\omega_j = \kappa_j \frac{\pi n_1}{30}$ и $\omega_p = \kappa_p \frac{\pi n_1}{30}$ - циклические частоты из-
менения жесткости и текущего радиуса заготовки; κ_j и κ_p -
число "выступов" на центровом отверстии и наружной поверхности
заготовки; n_1 - скорость вращения заготовки; ψ - фазовый
угол.

В правой части полученного уравнения содержатся перемен-
ные возмущающие силы, которые в установившемся режиме приводят
к возникновению вынужденных колебаний. Частное решение системы
(I) имеет вид:

$$\xi_1 = \xi_{1j} + \xi_{1p}; \quad \xi_2 = \xi_{2j} + \xi_{2p}$$

Погрешность формы поперечного сечения обработанной детали бу-
дет определяться относительными перемещениями заготовки (ξ_j

и ξ_{1p}) и шлифовального круга (ξ_{2j} и ξ_{2p}).

$$a_j = \xi_{1j} - \xi_{2j} \quad \text{и} \quad a_p = \xi_{1p} - \xi_{2p}, \quad \text{или}$$

$$\begin{cases} a_j = \frac{\Delta j}{j \omega_j} \alpha(t_p) \operatorname{Re} \left[\frac{z_{2j}}{z_{1j} \cdot z_{2j} + \alpha(z_{1j} + z_{2j})} e^{i \omega_j \tau} \right] \\ a_p = \alpha H \operatorname{Re} \left[\frac{-z_{1p} - z_{2p}}{z_{1p} \cdot z_{2p} + \alpha(z_{1p} + z_{2p})} e^{i(\omega_j \tau - \psi)} \right] \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$z_{1j} = j \omega_1 - m_1 \omega_j^2 + i \mu_1 \omega_j; \quad z_{2j} = j \omega_2 - m_2 \omega_j^2 + i \mu_2 \omega_j$$

$$z_{1p} = j \omega_1 - m_1 \omega_p^2 + i \mu_1 \omega_p; \quad z_{2p} = j \omega_2 - m_2 \omega_p^2 + i \mu_2 \omega_p$$

— соответственно механические импедансы заготовки и шлифовального круга на частотах ω_j и ω_p .

Решения a_j и a_p характеризуют собой влияние непостоянства жесткости сопряжения "центр-центровое отверстие", зависящее от некруглости центровых отверстий, и радиуса наружной поверхности заготовки. Из (2) можно выделить коэффициенты передачи

$$A_j = \frac{z_{2j}}{z_{1j} \cdot z_{2j} + \alpha(z_{1j} + z_{2j})}; \quad A_p = \frac{-z_{1p} - z_{2p}}{z_{1p} \cdot z_{2p} + \alpha(z_{1p} + z_{2p})} -$$

действительная часть которых характеризует собой наследственный перенос отклонений формы центровых отверстий (A_j) и наружной поверхности заготовки (A_p). Анализ выражений (1), (2) позволяет сделать следующие основные выводы:

1. при шлифовании валов на центрах имеет место наследование некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовки. Наследственный перенос указанных погрешностей характеризуется коэффициентами передачи, зависящих от параметров самой системы и процесса резания;

2. амплитуда колебания вала увеличивается при возрастании силы резания, непостоянства жесткости заготовки и радиуса наружной поверхности заготовки;

3. увеличение числа "выступов" на центровом отверстии и наружной поверхности заготовки приводит к увеличению частоты колебаний и к снижению коэффициентов передачи, а, следовательно, и некруглости детали;

4. на величину коэффициентов передачи влияют приведенная масса заготовки — m_1 , которую можно легко менять путем присоединения добавочной массы, и скорость вращения заготовки — μ_1 .

В приведенном выше анализе было принято, что привод вра-

щения заготовки обладает абсолютно жесткой характеристикой и точность формы детали определяется смещением заготовки и круга вдоль линии действия радиальной составляющей усилия резания R_r . Если принять, что привод вращения заготовки имеет конечную жесткость - j_n , то тогда движение заготовки запишется в виде

$$\begin{cases} J \ddot{\chi} + (\mu_1 + \nu_1) \dot{\chi} + j_n \chi - (b_1 - b_2) \xi_1 = -b_1 n \cos[k_f(\omega\tau + \varphi_0 + \delta) - \psi] \\ m_1 \ddot{\xi}_1 + \mu_1 \dot{\xi}_1 + (j_0 - D_1 + D_2) \xi_1 + D_2 \dot{\chi} = \chi t_{cr} \frac{\Delta j_1}{j_{01}} \cos k_f(\omega\tau + \varphi_0 + \delta) - \\ - D_1 n \cos[k_f(\omega\tau + \varphi_0 + \delta) - \psi] \end{cases} \quad (3)$$

где χ - крутильные перемещения заготовки, J - приведенный момент инерции заготовки, μ_1 - крутильный коэффициент демпфирования, φ_0 - угол рассогласования между поворотами планшайбы станка и заготовки, δ - угол сдвига, $b_1, b_2, \dots, D_2$ - коэффициенты.

Уравнения (3) взаимосвязаны, поскольку в первом содержатся линейные перемещения - ξ_1 , во втором - крутильная скорость - $\dot{\chi}$, следовательно, в процессе обработки одновременно имеет место два вида колебаний заготовки - крутильные и линейные. Решение уравнений (3) может быть найдено в виде

$$\begin{cases} \xi_1 = \Xi_j \cos(k_f \omega \tau - \Phi_j) + \Xi_r \cos(k_f \omega \tau - \Phi_r) \\ \chi = K_j \cos(k_f \omega \tau - \Psi_j) + K_r \cos(k_f \omega \tau - \Psi_r) \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) вытекает основной вывод, что для увеличения точности формы детали необходимо стремиться при шлифовании к снижению амплитуды линейных колебаний (Ξ_j и Ξ_r), что возможно за счет рационального изменения крутильной жесткости привода j_n . Последнее осуществимо путем встраивания в привод вращения заготовки специальных устройств, например, упругих пружинных поводков.

При исследовании динамики формообразования поверхности загла при шлифовании с учетом неравномерной жесткости обоих сопряжений "центр-центровое отверстие" по двум направлениям была получена система из четырех уравнений, решение которых было осуществлено на ЭВМ "Мир" по стандартной программе. Результаты решения подтвердили основные положения, связанные с наследованием некруглости центровых стверстей и наружной поверхности заготовки в случае обработки как вблизи центрового отверстия, та:

и шеек, расположенных посередине вала. Было установлено, что максимальная погрешность формы имеет место вблизи центрального отверстия и на её величину непостоянство жесткости второго соп-
ряжения практически не оказывает влияния. Точность формы шеек
вала, расположенных посередине, зависит от некруглости центро-
вых отверстий, а также количества "выступов" K и угла сдви-
га Ψ . Погрешность формы в среднем сечении вала будет мини-
мальной при $\Psi = \pi/K$ и равенстве "выступов" на обоих центральных
отверстиях.

Глава III. Расчет и проектирование устройств для исправления некруглости формы валов.

Для шлифования валов с нежестким приводом вращения заго-
товки были спроектированы и изготовлены различные типы упругих
поводков, у которых роль упругого элемента выполняет витая ци-
линдрическая или плоская пружины. Геометрические параметры по-
водков зависят от величины крутильной жесткости привода j_n .
Моделирование процесса шлифования на аналоговой вычислительной
машине МН-7 показало, что с уменьшением крутильной жесткости
привода амплитуда линейных колебаний заготовки снижается. При
 $j_n < 10$ кг.см/рад амплитуда крутильных колебаний быстро рас-
тет и появляется неустойчивость формы этих колебаний, с увели-
чением $j_n \geq 100$ кг.см/рад изменение амплитуды линейных коле-
баний несущественно. На основании произведенного расчета были
установлены пределы уменьшения крутильной жесткости, ограничен-
ные максимальной амплитудой крутильных колебаний ($M_{\text{кр}}/g$),
формой затухания свободных крутильных колебаний (апериодичес-
кое) и прочностью упругого элемента. Оптимальные значения кру-
тильной жесткости поводка были установлены в пределах 30 – 80
кг.см/рад.

Наряду с пассивным изменением окружной подачи заготовки,
осуществляемым с помощью упругого поводка, для исправления не-
круглости формы валов был разработан поводковый патрон, обес-
печивающий принудительное изменение скорости вращения заготов-
ки в соответствии с профилем центрального отверстия или наружной
поверхности. В результате теоретического исследования был вы-
веден закон изменения окружной подачи заготовки

$$- \omega_1(\alpha) = \frac{D_1}{D_3} H \cos(k_f \alpha - \varphi) + \sum_{j=1}^n \frac{x_{tj}}{D_3} \Delta_j \cos k_j \alpha \quad (5)$$

где $\omega_1(\alpha)$ — переменная составляющая скорости вращения заготовки, D_1 и D_3 — коэффициенты, α — угол поворота. Согласно (5) скорость должна изменяться при подходе к шлифовальному кругу "выступа" на наружной поверхности заготовки или "впадины" на центровом отверстии. В поводковом патроне амплитуда изменения окружной подачи заготовки обеспечивается эксцентриситетом кулачка, величина которого устанавливается в зависимости от исходной некруглости центрального отверстия или наружной поверхности заготовки. Частота изменения окружной подачи осуществляется благодаря сменной прецизионной зубчатой паре в соответствии с числом "выступов" на центровом отверстии и наружной поверхности заготовки. Зубчатое колесо устанавливается неподвижно на переднем центре станка. Связанная с ним шестерня, находящаяся на одной оси с кулачком, при вращении корпуса устройства, жестко связанного с планшайбой станка, совершает сложное движение: вращательное переносное вместе с планшайбой и вращательное относительное вокруг собственной оси. В результате сложения этих двух движений заготовка получает неравномерное вращение.

Для определения амплитуды изменения окружной подачи заготовки в работе приводятся аналитический и графоаналитический методы расчета, на основании которых установлены основные требования и геометрические параметры поводкового патрона.

При условии высокой точности центровых отверстий ($\Delta_{ц.с.} \leq 0,4$ мкм) жесткость сопряжения "центр-центровое отверстие" практически остается постоянной по угловой координате. Наличие некруглости наружной поверхности заготовки в этом случае приводит к изменению тангенциальной составляющей усилия резания

P_t , а, следовательно, и момента, которым нагружен во время обработки привод вращения заготовки. Заготовка получает вынужденные крутильные колебания, которые могут препятствовать достижению высокой точности формы, поскольку они взаимосвязаны с линейными колебаниями. Исходя из сделанного предположения, была решена задача гашения их с помощью маятникового демпфера, спроектированного в виде крестовины с четырьмя маятниками, роль которых выполняют свободно висющие на пальцах кольца.

В работе приводятся расчет и настройка маятникового демпфера в зависимости от числа "выступов" на наружной поверхности заготовки, а также выбор минимальной скорости вращения демпфера.

Глава IV. Экспериментальные исследования методов достижения долемикронной точности формы валов.

Экспериментальные исследования проводились на прецизионном круглошлифовальном станке модели 3E153, установленном в термоконстантном цехе. Некоторые результаты исследований проверялись на прецизионных станках фирмы "Shipman" (Англия) и Ш 200х600 (ГДР). Измерения отклонений формы и положения поверхностей валов производились на кругломере "Talyrond - 2" с использованием продольного перемещения измерительного шпинделя. Шероховатость поверхности контролировалась на приборах "Talysurf - 3" и "Калибр- 201". Для записи свободных колебаний заготовки использовался виброметр SOM-2. По осциллограммам колебаний определялся коэффициент трения и приведенная масса заготовки. Измерение жесткости заготовки производилось нагрузочным устройством камертонного типа. Результаты измерений показали, что жесткость сопряжения "центр-центровое отверстие" зависит от некруглости центровых отверстий и количества "выступов", а также от плотности стыка сопряжения. Экспериментально были подтверждены основные теоретические предпосылки о влиянии некруглости центровых отверстий и наружной поверхности, количества "выступов", изменения усилий резания и жесткости заготовки на точность формы обработанной поверхности. При проведении экспериментальной части соблюдались условия оптимального контакта центра с заготовкой, обеспечивающих в наименьшей степени наследственный перенос погрешностей: совпадение углов конусов центрового отверстия ($\alpha_{ц.о.}$) и центра станка ($\alpha_ц$) - $\alpha_{ц.о.} \geq \alpha_ц$ и $\alpha_{ц.о.} - \alpha_ц \leq 30^\circ$, длина образующей центровых отверстий принималась равной 0,7 - 0,9 мм. Правка центровых отверстий производилась на центрошлифовальных станках модели 3225 (г. Саратов) и "Tojoda", на центродоводочном станке "Нерис" трехлезвийной зенковкой, а также обжатием твердосплавными центрами на токарных станках. Данные методы правки позволяли получить некруглость в пределах 0,2 - 8,0 мкм с различным числом "выступов".

Балансирование шлифовального круга осуществлялось статически на однодисковом приспособлении до и после правки шлифовального круга. Для оценки точности статической балансировки круга до безразличного положения использовалось балансирование круга в динамическом режиме на станке "Jster". Результаты шлифования показали, что при условии тщательной правки шлифовального круга волнистости не образуется с частотой, кратной соотношению чисел оборотов круга и заготовки, а обработанная поверхность наследует некруглость центровых отверстий. Было обнаружено образование волнистости с частотой, кратной частотам вращения круга и заготовки и количеству "выступов" на центровом отверстии или наружной поверхности. Исправление указанной волнистости, имеющей наследственный характер, обеспечивается изменением приведенной массы заготовки путем навешивания сбалансированной добавочной массы. Образованию волнистости можно препятствовать также увеличением плотности стыка "центр-центровое отверстие" за счет повышения жесткости заготовки.

Исправление некруглости формы валов при шлифовании с упругим приводом вращения заготовки, как установлено, зависит от крутильной жесткости поводка и скорости вращения планшайбы станка. Жесткость поводков изменялась в пределах 20 - 350 кг.см/рад путем установки пружин с различными геометрическими параметрами, а также изменением плеча крутящего момента. Для исключения возможной поломки пружин при пуске станка в цепь управления двигателя планшайбы изделия были введены добавочные сопротивления. Точность формы увеличивается в 1,5 - 2 раза по сравнению с обычным шлифованием при крутильной жесткости привода 30 - 80 кг.см/рад (шероховатость поверхности составляет $\nabla 9 - \nabla 10$). При отклонениях центровых отверстий равных 2 - 5 мкм точность формы при $J_n = 30 - 80$ кг.см/рад обеспечивается в пределах 0,5 мкм. При снижении окружной подачи заготовки ($n_s = 90 - 100$ об/мин) и постоянной крутильной жесткости привода точность формы повышается в 1,5 раза, но при этом несколько увеличивается шероховатость поверхности ($\nabla 7 - \nabla 9$).

Исправление некруглости формы с помощью поводкового патрона включает в себя этап предварительного измерения профилей наружной поверхности заготовки и центрального отверстия. По результатам замеров валы сортируются по виду и величине некруг-

лости и ставятся метки, показывающие на положение "выступов". При настройке патрона вал поворачивается меткой к шлифовальному кругу, а кулачок относительно хомутика устанавливается таким образом, чтобы вектор эксцентриситета совпадал с линией, соединяющей центры вращения заготовки и шлифовального круга. Согласно (5) скорость вращения заготовки в данный момент будет минимальной. Для исправления некруглости наружной поверхности заготовки I - 5 мкм (сталь P9) амплитуда изменения окружной подачи заготовки составляет 0,46 - 3,7 рад/сек, для исправления некруглости формы, обусловленной некруглостью центровых отверстий I - 6 мкм (сталь ШХ15) или 0,8 - 4 мкм (сталь P9), амплитуда изменения окружной подачи заготовки составляет 0,93 - 7 рад/сек. Данные изменения скорости вращения заготовки обеспечиваются установкой кулачков с эксцентриситетом не более 5 мм (при номинальной скорости $n_0 = 125 - 150$ об/мин). Эксперименты показали, что точность формы при шлифовании с неравномерной скоростью вращения заготовки увеличивается в 2,5 - 3,5 раза по сравнению с обычным шлифованием и отклонения формы обработанной поверхности валов составляют 0,2 - 0,5 мкм.

Шлифование с гашением крутильных колебаний заготовки с помощью маятникового демпфера осуществлялось при строгом выполнении условий контакта центра с центровым отверстием и выбора минимально-допустимой скорости вращения заготовки. Степень исправления некруглости формы зависит от исходной погрешности наружной поверхности заготовки, которая, при высокой точности центровых отверстий, не превышает 0,5 - 3 мкм. При отклонениях формы I - 3 мкм точность увеличивается в 2 - 2,5 раза, при уменьшении исходной погрешности ($< 1,0$ мкм) - в 1,3 - 1,8 раза по сравнению с обычным шлифованием. При этом некруглость обработанной поверхности составляет 0,15 - 0,35 мкм, шероховатость поверхности поддерживается в пределах $\nabla 12$.

Глава V. Практические рекомендации и внедрение.

Общие выводы.

На основании проведенных исследований были разработаны и внедрены практические рекомендации по проектированию, расчету и эксплуатации упругих поводков, поводкового патрона и маятникового демпфера для обработки прецизионных шпинделей на Москов-

ском заводе скоростных прецизионных электроприводов.

Результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы:

1. При шлифовании высокоточных валов имеет место наследственный перенос некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовки. Для количественной оценки данного явления установлены коэффициенты передачи.

2. Установлено, что при шлифовании с жестким приводом вращения заготовки есть два взаимно связанных вида колебаний заготовки - линейных и крутильных. Для повышения точности формы валов необходимо снижать амплитуду линейных колебаний.

3. Разработан метод исправления некруглости формы валов путем изменения окружной подачи заготовки в процессе шлифования.

4. Для исправления некруглости формы валов разработаны специальные устройства. Приведены условия их проектирования, расчета и эксплуатации.

5. Исправление волнистости поверхности наследственного характера обеспечивается путем изменения приведенной массы заготовки (с помощью добавочной массы).

6. Установлено, что при увеличении усилия резания, непосредственно жесткости сопряжения "центр-центровое отверстие" и текущего радиуса заготовки точность формы снижается; увеличение числа "выступов" на центровом отверстии и жесткости заготовки приводит к снижению наследственного переноса погрешностей центровых отверстий.

7. Для обеспечения точности формы в пределах 1 мкм и шероховатости поверхности $\nabla 10$ при использовании центровых отверстий нормальной точности с любым расположением "выступов" целесообразно применять упругие пружинные поводки. Точность формы повышается в 1,5 - 2,5 раза по сравнению с обычным прецизионным шлифованием. При оптимальной жесткости привода (30 - 80 кг.см/рад) и отклонениях центровых отверстий не более 3 - 5 мкм обеспечивается точность формы валов в пределах 0,5 мкм.

8. Для обеспечения точности формы в пределах 0,5 мкм и выше (при отклонениях формы центровых отверстий не более 6 мкм и наружной поверхности 4 - 5 мкм) целесообразно применять предложенный поводковый патрон. Точность формы увеличивается

при выполнении условий выбора величины эксцентриситета кулачка и настройке патрона в 2,5 - 3,5 раза по сравнению с обычным прецизионным шлифованием.

9. Для исправления некруглости формы (при $\Delta_{\text{н.к.}} 0,4 \text{ мм}$) рекомендуется применять маятниковый демпфер крутильных колебаний заготовки. Точность формы увеличивается в 2 - 2,5 раза (при исходной погрешности $I - 3 \text{ мкм}$) и в 1,3 - 1,8 раза (при отклонениях формы менее $I \text{ мкм}$) по сравнению с обычным прецизионным шлифованием. Точность формы обеспечивается в пределах $0,15 - 0,35 \text{ мкм}$.

10. С целью расширения технологических возможностей прецизионных круглошлифовальных станков целесообразно дополнительно оснащать их разработанными поводковыми патронами.

Общая годовая экономия от внедрения результатов исследований на МЗСПЭ составляет около 140.000 руб.

По материалам диссертации опубликованы статьи:

1. Камсюк М.С., Никитич В.Т. О наследственном характере образования погрешности формы цилиндрических деталей при шлифовании на центрах. "Известия ВУЗов. Машиностроение", № 9, 1973.

2. Камсюк М.С., Никитич В.Т., Селиванов Н.М. О взаимосвязи вынужденных линейных и крутильных колебаний детали в процессе круглого шлифования. Сб. "Прогрессивная технология конструкционных материалов". Труды МВТУ № 167. М., 1973.

3. Дальский А.М., Камсюк М.С., Никитич В.Т., Селиванов Н.М. Метод повышения долговечности прецизионных изделий на аэродинамических опорах, "Надежность и контроль качества" № 10, 1973.