

О. С. Ломова, И. А. Сорокина, Е. И. Яковлева

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СТАНОЧНОЙ СИСТЕМЫ

В статье исследовано влияние сил резания на технологический процесс обработки деталей в центрах круглошлифовальных станков. Доказано, что коррекция узлов станка позволит уменьшить погрешность формы деталей за счет стабилизации сил резания и повысить точность финишной обработки. *Точность обработки; погрешность формы; силы резания*

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении показатели качества изделий весьма тесно связаны с точностью обработки деталей машин. Эксплуатационные свойства деталей формируются, главным образом, на финишных операциях механической обработки. В машиностроении большое распространение получила окончательная обработка методом шлифования в центрах станков.

Полученные размер, форма и расположение поверхностей определяют фактические зазоры и натяги в соединениях деталей машин, и, следовательно, их технические параметры, влияющие на надежность при эксплуатации.

В различных узлах и механизмах широко применяются прецизионные цилиндрические детали (валы, роторы гидромоторов, гильзы и золотники гидроагрегатов и т. д.), погрешность формы которых занимает доминирующее положение в обеспечении точности изделий в целом. За счет ее снижения, как в поперечном, так и в продольном сечении можно уменьшить суммарную погрешность обработки и увеличить резерв размерной точности.

Вследствие отклонений формы, когда диаметры прецизионных цилиндрических заготовок в различных сечениях принимают разные значения, один размер (максимальный, минимальный или средний) не может характеризовать точность обработки. Деталь годна в том случае, если наибольшее и наименьшее значения размера не выходят за границы поля допуска (рис. 1). Точность обработки отдельной детали можно оценить как:

$$\Delta_{\text{обр.}} = \left| \frac{D_{\text{нб}} + D_{\text{нм}}}{2} - D_{\text{ср}} \right| \pm \frac{D_{\text{нб}} - D_{\text{нм}}}{2} \leq \frac{T}{2}, \quad (1)$$

где $D_{\text{нб}}$, $D_{\text{нм}}$ – наибольшие и наименьшие размеры обработанной поверхности одной детали; $D_{\text{ср}}$ – средний настроечный размер детали, соответствующий середине поля допуска; T – допуск на обработку.

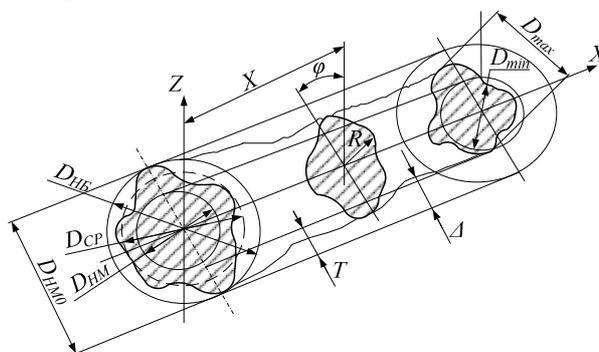


Рис. 1. Отклонение действительной формы от номинальной

До 50-х гг. XX в. в технологии машиностроения доминировало требование к точности размеров. С 50-х годов появляются претензии к отклонению формы и точности расположения поверхностей, которые переходят в область отклонения, где основное влияние оказывает станочная система.

Исследованиями доказано, что отклонение формы является весомой величиной в составе суммарной погрешности обработки и оказывает значительное влияние на работоспособность деталей машин. Она определяется влиянием значительного количества одновременно действующих технологических факторов. Наиболее существенный из них – это действие силовых деформаций вследствие изменения режимов резания, припуска на обработку, затупления шлифовального круга и изменения механических свойств обрабатываемого материала, приводящих к смещению узлов станка из-за зазо-

ров, и упругому перемещению оси шпинделя шлифовального круга и переднего, и заднего центров станка [1, 2].

В результате исследования жесткости круглошлифовальных станков установлено [3, 4], что, примерно, жесткость передней и задней бабок определяется перемещением центров от деформаций в местах контакта со шпинделем и пиноли с корпусом. При этом 60 % приходится на перемещение оси вращающегося шпинделя шлифовального круга (рис. 2).

Величина перемещения зависит от веса шпинделя вместе со шлифовальным кругом и от зазора в подшипниках. Смещение оси шпинделя с учетом веса, действия сил и направления вращения можно выразить следующей зависимостью:

$$\delta x = \Delta_{\text{ш}} / 2 \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

где δx – радиальное смещение оси шпинделя в рассматриваемом сечении (переднем подшипнике) у шпиндельного круга; $\Delta_{\text{ш}}$ – величина зазора в подшипнике шпинделя.

Угол между результирующей силой резания и вертикалью β можно найти как:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P \cdot \cos \alpha}{G \cdot P \cdot \sin \alpha}, \quad (3)$$

где P – суммарная сила резания; G – сила веса шпинделя и шлифовального круга; α – угол конусообразности, равный $\alpha = \varphi \cdot \gamma$, где φ – угловое перемещение режущей кромки шлифовального круга; γ – угол смещения общей оси центров.

Тогда радиальное смещение оси шпинделя находим из формулы:

$$\delta x = \frac{\Delta_{\text{ш}} \cdot P \cdot \cos \alpha}{2G - P \cdot \sin \alpha}. \quad (4)$$

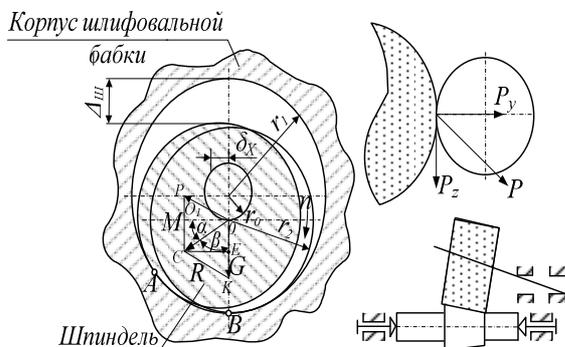


Рис. 2. Перемещения оси вращения шпинделя

Поскольку вектор результирующей силы R будет изменяться, практика исследований показала, что отношение радиальной составляющей силы резания к тангенциальной может колебаться в пределах 1–3, а при затуплении шлифовального круга это отношение может составлять порядка 5, следовательно, угол вектора смещения a может изменяться в среднем в пределах 18–45° (относительно горизонтальной).

Погрешность формы продольного профиля обрабатываемой поверхности с учетом зазоров в шпиндельном узле и пиноли задней бабки и смещением вершины подвижного центра можно определить по формуле:

$$\Delta_{\phi} = 2L \left[\Delta_{\text{ш}} \frac{P \cdot \cos \alpha}{M(G - P \cdot \sin \alpha)} - H \left(\frac{\Delta_3}{b - (2T_{\text{ц}} - T_{\text{в}})} - \frac{\Delta_3}{b} \right) \right], \quad (5)$$

где L – длина обрабатываемой поверхности; M – расстояние между подшипниками шпинделя; $T_{\text{ц}}$, $T_{\text{в}}$ – допуски на длину детали и глубину центровых отверстий; H – длина пиноли с центром; b – вылет переднего центра.

Упругие деформации узлов станка имеют воздействие на образование погрешность формы продольного профиля поверхности заготовки. В итоге происходит не только смещение в узлах станка из-за зазоров, но и упругое перемещение шпинделя и переднего, и заднего центров станка, которое определяется как:

$$\delta_n = \frac{P_x^2 \cdot b}{L^2 \cdot 3E \cdot I_n}, \quad (6)$$

$$\delta_3 = \frac{P \cdot (L - x)^2 \cdot a}{L^2 \cdot 3E \cdot I_3}, \quad (7)$$

где x – расстояние до прилагаемой нагрузки; a – вылет заднего центра; E – модуль упругости; I_3 , I_n , $I_{\text{ш}}$ – моменты инерции задней бабки, передней бабки и шпинделя шлифовального круга.

На рис. 3 представлена схема смещения шпинделя и пиноли задней бабки от действия сил резания.

В результате различного сочетания смещений центров и поворота режущей кромки шлифовального круга возможны различные варианты соотношений углов φ и γ , определяющих погрешность продольного профиля, то есть образование прямой конусообразности при ($\varphi > \gamma$)

или обратной при $(\varphi < \gamma)$. При равенстве углов φ и γ погрешность профиля отсутствует.

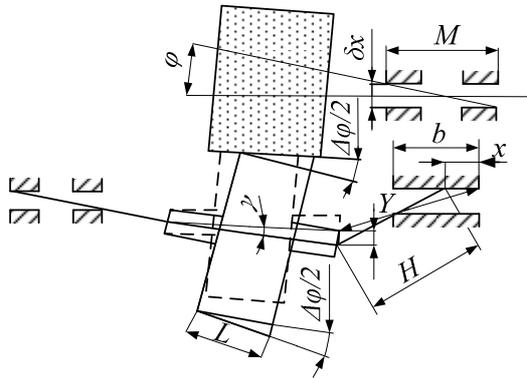


Рис. 3. Схема образования погрешности формы от смещения узлов станка и зазоров в подвижных соединениях от действия сил резания

Прямую и обратную конусообразности Δ_φ можно выразить зависимостями:

$$\Delta_{\varphi_{пр.}} = 2L \left(\frac{\delta_3 - \delta_n}{L} - \frac{\delta_{ш}}{c} \right), \quad (8)$$

$$\Delta_{\varphi_{обр.}} = 2L \left(\frac{\delta_{ш}}{c} - \frac{\delta_3 - \delta_n}{L} \right), \quad (9)$$

где c – вылет шпинделя шлифовального круга; $\delta_{ш}$, δ_n , δ_3 – соответственно перемещения оси шпинделя в контролируемом сечении, заднем и переднем центрах станка.

Конусообразность обрабатываемой поверхности заготовки, к образованию которой приводят зазоры в узлах станка, колебание вылета пиноли с центром и упругие перемещения, можно найти как:

$$\Delta\varphi_E = \left\{ \left[\Delta_{ш} \frac{P \cdot \cos\alpha}{M(G \cdot P \cdot \sin\alpha)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times H \left(\frac{\Delta_3}{b(2\delta_n \delta_c)} \cdot \frac{\Delta}{b^3} \right) \right] + \right. \\ \left. + L \left[\frac{P_c^2}{2E \cdot I_{ш}} - \left(\frac{P(L-x)^2 \cdot a}{L \cdot 3E \cdot I_3} - \frac{P_x \cdot b}{L \cdot E \cdot I_n} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

При правильной настройке станка конусообразность подчиняется нормальному закону распределения, принимая как положительные (прямая конусообразность), так и отрицательные (обратная конусообразность) значения.

При обработке заготовок в центрах круглошлифовальных станков для повышения точности формы необходимо определить в станке кинематические связи между исполнительными

органами, базирующими деталь и инструмент (шлифовальный круг) для создания формообразующих движений, которые осуществляются, как правило, посредством механических и кинематических систем. Если создать формообразующие движения силового органа, который на каждый оборот детали будет поджимать технологическую систему во время смещения заготовки в центрах станка, то можно стабилизировать положение пиноли.

С целью исключения влияния зазоров в шпиндельном узле шлифовального круга и в корпусе задней бабки станка разработано устройство, позволяющее стабилизировать положение пиноли в шпинделе станка (рис. 4).

Зазоры в подшипниках шлифовального круга должны иметь определенную величину, которую измеряют по величине смещения концов шпинделя при определенной нагрузке и при разогреве станка до 40 Н [4, 5]. Смещение концов шпинделя по нормам точности станков определяется в статическом режиме. Например, для круглошлифовального станка модели 3А151 при нагрузке 50 Н смещение должно быть не более 0,009 мм.

При использовании данного устройства усилием поджима шпиндель шлифовального круга устанавливается в положение, в котором колебание сил резания не вызывает смещения шпинделя в радиальном направлении. Аналогичное устройство обеспечивает поджим пиноли в корпус задней бабки станка. Усилие поджима пиноли и шпинделя должно быть таким, чтобы обеспечивалась нормальная работа узлов станка. В устройстве усилие поджима создается сжатым воздухом.

Эксперименты были направлены на исследование технологического процесса шлифования на режимах черновой и чистовой подачи с выхаживанием с коррекцией сил резания.

На рис. 5 (а, б) представлены графики процесса обработки цилиндрической детали в центрах станка с коррекцией (поджимом) и без коррекции узлов, включая пиноль задней бабки. Из графиков видно, что при отсутствии поджима узлов (рис. 5, а) на этапе врезания (черновая подача) происходит резкое смещение пиноли задней бабки с центром и шпинделя шлифовального круга на величину выборки зазоров в узлах станка и упругих деформаций.

Далее процесс резания нестабилен из-за колебания системы и упругих деформаций и изменения допуска на рез.

На режимах чистовой подачи и выхаживания деталь обрабатывается до подачи команды на отвод шлифовального круга при достижении определенного перемещения шпиндельной бабки. При этом система смещается в исходное положение.

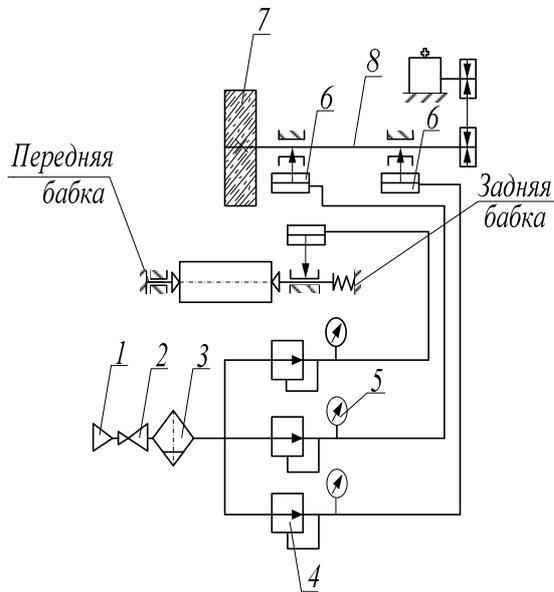


Рис. 4. Принципиальная схема коррекции узлов станка: 1 – вход; 2 – кран; 3 – влагоотделитель; 4 – стабилизатор давления; 5 – манометр; 6 – мембранные коробки; 7 – шлифовальный круг

При обработке деталей с поджимом узлов настройка станка такая же, как и в описанном выше случае. Станок включен, происходит сдвиг пиноли (рис. 5, б) и шпинделя шлифовального круга до полной выборки зазоров. В этом случае расстояние от осей шпинделя до оси пиноли остается постоянным. Процесс обработки на черновом, чистовом и режиме выхаживания не отражается на изменении расстояния между осью пиноли и осью шпинделя, так как величина поджима узлов рассчитана на компенсацию этих смещений и обеспечение работоспособности станка.

Для проверки эффективности разработанного устройства была произведена контрольная обработка образцов из закаленной стали 45, имеющих равную длину и повышенную жесткость. При этом был произведен поджим шпинделя и пиноли задней бабки и предварительно произведена правка шлифовального круга. Усилие поджима составляло 200 Н. Изменением режимов шлифования достигалось значительное колебание сил резания.

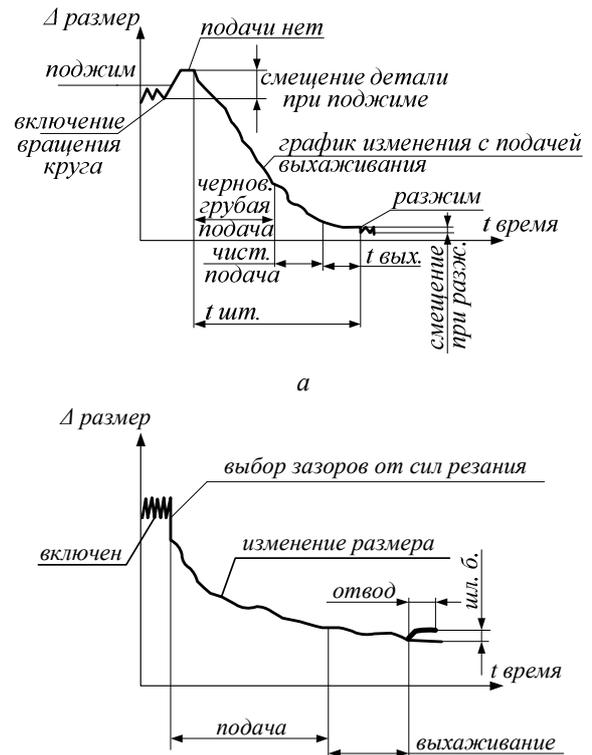


Рис. 5. Графики процесса обработки цилиндрических деталей в центрах станка: а – с коррекцией узлов станка; б – без коррекции узлов станка

Результаты эксперимента показали, что изменение конусообразности проточенной партии деталей методом врезания составило 3–4 мкм. Для партии деталей, проточенной на том же станке и при тех же режимах резания, но без коррекции узлов станка (поджимного устройства), изменение конусообразности составило 11 мкм.

Одновременно было установлено, что выбор зазоров в пиноли задней бабки и в подшипниках шпинделя шлифовального круга положительно сказывается на уменьшении погрешности формы обрабатываемой поверхности не только в продольном, но и в поперечном сечении.

При обработке без выбора зазоров отклонения от круглости составляло 8–10 мкм, а при обработке с коррекцией узлов станка не более 4 мкм.

На рис. 6 представлены графики рассеивания диаметров 2 партий обработанных деталей.

Без коррекции узлов станка рассеивание размеров составило 12 мкм, а с коррекцией шпинделя и пиноли задней бабки рассеивание размеров 7 мкм.

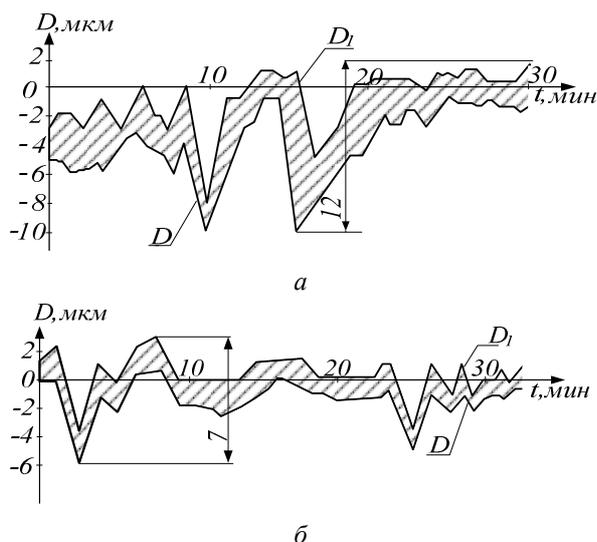


Рис. 6. Графики рассеивания диаметров обработанных деталей: *а* – без коррекции узлов станка; *б* – с коррекцией узлов станка

ВЫВОДЫ

Экспериментальная проверка подтвердила, что одним из основных источников образования погрешности формы обрабатываемых деталей являются зазоры в неподвижных соединениях узлов станка. Исключение влияния зазоров методом коррекции узлов станка приводит к уменьшению погрешностей формы деталей и позволит получить обработанные поверхности с высокой геометрической точностью, и тем самым повысит производительность финишной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов В. Э., Решетов Д. Н.** Влияние тепловых деформаций на точность металлорежущих станков // Станки и инструмент. 1958. №12. С. 32–34.

2. **Жвирблис А. В.** Управление точностью круглого шлифования. М.: Машиностроение, 1979.

3. **Ломова О. С., Моргунов А. П., Ломов С. М.** Обеспечение точности обработки цилиндрических деталей в центрах круглошлифовальных станков // Технология машиностроения. 2010. №.10 (100). С. 12–17.

4. **Гельфельд О. М.** Пути повышения точности круглошлифовальных станков. М.: НИИМаш, 1968. 168 с.

5. **Балакшина Б. С.** Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1973. 680 с.

ОБ АВТОРАХ

Ломова Ольга Станиславовна, доц. каф. нефтехимических технологий и оборудования Омск. гос. техн. ун-та. Дипл. инженер по компрессорным машинам и холодильной технике (ОмПИ). Канд. техн. наук в обл. вакуумной, компрессорной техники и пневмосистем (ОмГТУ). Иссл. в обл. технологии машиностроения с целью обеспечения точности изготовления ответственных деталей нефтегазохимических установок.

Сорокина Ирина Александровна, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по технологическим машинам и оборудованию (ОмГТУ, 2011). Иссл. в обл. технологии машиностроения с целью обеспечения точности изготовления ответственных деталей путем моделирования процесса обработки цилиндрических поверхностей.

Яковлева Екатерина Игоревна, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по технологическим машинам и оборудованию (ОмГТУ, 2011). Иссл. в обл. технологии машиностроения с целью обеспечения точности изготовления ответственных деталей путем управления, контроля и диагностики процесса обработки прерывистых поверхностей.