

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

КАЛЕНИК Дмитрий Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО
ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ
УПРАВЛЕНИИ РАДИАЛЬНЫМ УСИЛИЕМ

Специальность 05.02.08 - "Технология
машиностроения"

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Челябинск
1975

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ТВЕРСКОЙ М.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
МАТВЕЕВ В.В.,
кандидат технических наук, доцент
МИТРОФАНОВ В.Г.

Ведущее предприятие - Челябинский завод тракторных агрегатов
Челябинского тракторостроительного объединения.

Автореферат разослан "___" апреля 1975 года.

Защита диссертации состоится "22" мая _____ 1975 г., в 15
часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней машино-
строительных факультетов Челябинского политехнического института
имени Ленинского комсомола (454044, г. Челябинск, 44, проспект им.
В.И. Ленина, 76, ауд. 244 гл. учебного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой
диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать от-
зыв (в двух экземплярах, заверенных печатью).

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
кандидат технических наук, доцент  (А.С. ДАММЕР)

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и цель исследования. Непрерывно повышающиеся требования к точности размеров и качеству обрабатываемых поверхностей, применение высокопрочных труднообрабатываемых материалов, совершенствование технологии производства заготовок повышают роль абразивной обработки в машиностроении. Повышение роли абразивной обработки сопровождается совершенствованием конструкций станков, абразивных инструментов и процессов шлифования.

При обработке точных отверстий в режущих и мерительных инструментах, кольцах подшипников, зубчатых колесах и других деталях массового производства широко применяется внутреннее врезное шлифование. На большинстве станков для внутреннего врезного шлифования обработка ведется с постоянной подачей. Вследствие значительного колебания нагрузки на инструмент, которая в этом случае не контролируется, процесс характеризуется заниженными режимами, что приводит к неполному использованию мощности станка и возможностей инструмента на большей части цикла шлифования. Непостоянство усилия, даже при шлифовании на заниженных режимах, приводит к значительной нестабильности размера и качества обработанной поверхности. Для повышения точности и качества поверхности применяется многократное выхаживание. Автоматические циклы получаются сложными и многоступенчатыми.

Применение систем автоматического управления (САУ), осуществляющих регулирование силы резания, позволяет значительно повысить производительность и качественные показатели процесса. Идея управления силовыми факторами на металлорежущих станках была выдвинута и научно обоснована профессором Б.С. Балахшиным.

Значение управления силовыми факторами возрастает в условиях ограниченной жесткости системы СПИД, что особенно характерно для внутреннего шлифования.

Основным фактором, определяющим производительность процесса шлифования, качество и точность обработки, является радиальная составляющая силы резания P_y .^{*)} Поэтому при автоматизации процессов шлифования в последнее время применение находят САУ величиной P_y . Успешная автоматизация процесса внутреннего врезного шлифования

*) Глейзер Л.А. Пути усовершенствования инструмента, станков и технологии шлифования. Филиал ВИНТИ АН СССР, тема 1, Mashgiz, 1957. Ган Р.С. Шлифование с контролем усилия врезания. Новая технология прецизионного внутреннего шлифования. Труды американского общества инженеров-механиков "Конструирование и технология машиностроения", М., "Мир", 1964, №3.

требует наряду с системами управляющего (активного) контроля и путовой автоматики применения системы автоматического управления поперечной подачей.

Сложность и высокая стоимость, низкая надежность, обусловленная, в частности, сложностью и недостаточной точностью и надежностью динамометрических устройств, — существенные недостатки таких САУ. Поэтому разработка и исследование простой по конструкции и надежной в эксплуатации САУ процессом внутреннего врезного шлифования с регулируемой силой P_y является актуальной проблемой.

Цель исследования — разработка простых по конструкции и надежных в эксплуатации систем автоматического управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием усилия P_y для повышения точности и производительности обработки, качества обрабатываемой поверхности.

- Задачи исследования:
1. Разработать алгоритм управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием силы P_y .
 2. Создать систему автоматического управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием силы P_y .
 3. Провести аналитическое исследование процесса исправления исходной погрешности заготовки для определения влияния параметров разработанной системы и режима обработки на скорость этого исправления.
 4. Экспериментально исследовать процесс шлифования с применением разработанной системы для проверки полученных теоретических выводов.
 5. Провести производственные испытания и внедрение САУ.

Научная новизна. 1. Разработан алгоритм управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием силы P_y , предусматривающий обеспечение минимума себестоимости технологической операции. Доказана условность "статического" алгоритма управления, составленного для заготовки со средним, равномерно распределенным припуском на обработку и введена необходимая коррекция для его практической реализации.

2. На основе теоретического исследования создана САУ для внутреннего шлифования с регулированием силы P_y . Разработаны и практически реализованы новые, более простые автоматические циклы шлифования.
3. Предложен инженерный способ аналитического исследования переходного процесса, вызванного эксцентricностью обрабатываемой поверхности, который позволяет получить аналитическую зависимость

между параметрами системы, режимом обработки и характером исправления исходной погрешности заготовки, синтезировать систему с требуемыми характеристиками, выбрать параметры ее настройки и режим обработки.

4. Введено понятие качества исправления исходной погрешности в поперечном сечении заготовки, характеристикой которого может служить величина припуска, снятого за время, в течение которого исходная погрешность уменьшится до допустимой величины.

Практическая полезность. 1. Разработан и внедрен в производство промышленный вариант САУ процессом внутреннего врезного шлифования с регулируемым радиальным усилием, позволяющий повысить производительность обработки в 1,2-1,5 раза, точность обработки на I класс, шероховатость поверхности на I класс, сократить расход шлифовальных кругов.

2. Промышленный вариант САУ отличается простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью, малой стоимостью и может быть установлен практически на любой внутришлифовальный автомат или полуавтомат. Для управления гидродвигателем радиальной подачи применены стандартные, серийно выпускаемые промышленностью дроссели.

3. Применение САУ позволяет в некоторых случаях сократить количество операций окончательной обработки точных отверстий.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании и эксплуатации САУ.

Реализация научно-технических результатов в промышленности.

Разработанная САУ внедрена на Челябинском заводе тракторных агрегатов на операциях шлифования посадочных отверстий шестерен коробки перемены передач трактора. Годовой экономический эффект (по актам внедрения) составил 40.000 рублей. На ГПЗ-14 (г. Прокопьевск) САУ внедрена на операции шлифования посадочных отверстий внутренних колец подшипников 312. Годовой экономический эффект от внедрения в расчете на один станок, оснащенный САУ, согласно акту внедрения составляет 1.250 рублей.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались: 1. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола в 1968-1974 гг.

2. На отраслевом научно-техническом совещании "Повышение точности и надежности металлорежущих станков путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1970.

3. На научно-технической конференции вузов Урала по машиностроению, Ижевск, 1970.
4. На научно-технической конференции "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием", Челябинск, 1971.
5. На Всесоюзном совещании-семинаре "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1973.

По материалам диссертации автором опубликовано десять печатных работ.

Объем работы, её структура. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста; состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиография содержит 107 наименований. В диссертации имеется 75 иллюстраций, 9 таблиц и 6 приложений.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- B - условно-полная себестоимость одной станко-минуты без учета затрат на инструмент, *¹) коп/мин;
- T_m - машинное время, мин;
- T_{cm} - время простоя станка при смене и всех правках одного круга, мин;
- P - затраты предприятия, обусловленные эксплуатацией шлифовально-го круга, включая затраты на правящий алмаз, расходуемый при всех правках одного круга, коп;
- N_k - количество деталей, обработанных одним кругом;
- V_z - скорость съема припуска в направлении радиальной подачи, мм/мин;
- Z - припуск на радиус, мм;
- Q_a - интенсивность расхода абразива при шлифовании, см³/мин;
- Q_n - интенсивность съема припуска, см³/мин;
- D_d, H_d - диаметр и длина шлифуемого отверстия; см;
- H_k - высота круга, см;
- D_{kmax}, D_{kmin} - диаметр устанавливаемого и сменяемого изношенного круга, см;
- K_1 - коэффициент, учитывающий расход круга при правках, $K_1 < 1$;
- K - коэффициент режущей способности шлифовального круга, мм³/минкгс;
- P_d - усилие, развиваемое гидродвигателем подачи, кгс;
- U_d - скорость гидродвигателя подачи, см/мин;

*1) Великанов К.М., Новожилов В.И. Экономичные режимы резания металлов. Л., "Машиностроение", 1972.

P_0 - усилие гидродвигателя при $U_g = 0$, кгс;

$\Delta F = F_1 - F_2$, см²;

P_1, P_2 - давление в гидроцилиндрах F_1 и F_2 , кгс/см²;

R_{y1}, R_{y2} - линейные сопротивления утечек в гидроцилиндрах F_1, F_2 , кгс.с/см;

d - параметр гидродвигателя подачи, имеющий размерность коэффициента демпфирования, кгс.с/см;

$U_n(\tau)$ - координата профиля, обрабатываемого отверстия в направлении радиальной подачи, см;

τ - текущее время, с;

$U_n(\tau - T_0)$ - координата профиля отверстия на предыдущем обороте, см;

$T_0 = \frac{2\pi}{\omega}$ - время одного оборота заготовки, с;

ω - круговая частота вращения заготовки, с⁻¹;

C - жесткость системы СПИД, кгс/см;

$$\Gamma = \frac{5}{3 \cdot 10^8} D_g H_g, \text{ см/кгс};$$

U - мгновенное значение натяга в системе СПИД, см;

t - глубина слоя, снимаемого за один оборот заготовки, см;

\mathcal{L} - знак преобразования функции по Лапласу;

S - комплексная переменная.

1. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ СИЛЫ P_y

При разработке алгоритма в качестве критерия оптимальности принята себестоимость технологической операции. Требования к точности отверстия и качеству поверхности, возможности оборудования и инструмента накладывают ограничения на величину рассчитанных оптимальных режимов обработки. Для определения переменной части себестоимости принято следующее выражение:

$$C_0 = 5\tau_n + \frac{5\tau_{cm} + \eta}{N_k} \quad (1)$$

В (1) не учитываются постоянные затраты, которые не зависят от изменения интенсивности съема припуска. Основными характеристиками режима обработки, влияющими на интенсивность съема, при врезном шлифовании являются скорость резания V_k , круговая подача V_g и скорость V_l . Скорость V_k должна назначаться максимальной для данных условий обработки, т.к. ее оптимальное значение обычно находится за пределами достижимой скорости на внутришлифовальных станках. Из условия отсутствия прижогов величина подачи V_g также должна быть максимальной. Тогда параметром активного воздействия на

интенсивность съема припуска может служить величина V_2 . Для определения N_k используется зависимость

$$Q_a = c_q Q_m^m \quad (2)$$

Величина N_k находится делением полезного используемого объема одного круга на объем абразива, расходуемого при шлифовании одной детали

Тогда при $\zeta_m = \frac{1}{V_2}$

$$C_0 = \frac{6Z}{V_2} \left[1 + \frac{(\zeta_m + \frac{1}{f}) c_q V_2^m (\pi D_g H_g)^m}{0,785 N_k (D_{kmax}^2 - D_{kmin}^2) k_1} \right] \quad (3)$$

Отсюда оптимальное значение скорости V_{2*} *)

$$V_{2*} = \left[\frac{0,785 N_k (D_{kmax}^2 - D_{kmin}^2) k_1}{c_q (m-1) (\zeta_m + \frac{1}{f})} \right]^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{1}{\pi D_g H_g} \quad (4)$$

На рис. I представлен график (кривая 2) изменения себестоимости C_0 от величин V_2 , построенный по данным производственных испытаний на ГПЗ (г. Свердловск). Применительно к операции шлифовании посадочных отверстий внутреннего кольца подшипника 3520/02 величина

$V_{2*} = 0,27$ мм/мин. При увеличении интенсивности съема первое слагаемое в формуле (1) уменьшается (кривая I), но при этом увеличивается доля непроизводительных расходов.

Снимать весь припуск со скоростью V_2^* можно лишь при отсутствии ограничений. При шлифовании закаленных материалов одним из основных ограничений является ограничение по прижогам, для построения которого необходимо знать зависимость глубины дефектного слоя h' от скорости V_2 . Эта зависимость может быть аппроксимирована отрезком прямой (I на рис. 2). Алгоритм управления - кривая ABCD - строится таким образом, чтобы кривая ABCD не пересекалась с прямой I (граница зоны прижогов), чем гарантируется отсутствие прижогов на обработанной поверхности.

Интенсивность съема припуска V_2^* в конце цикла обработки определяется из условий обеспечения требуемой точности геометрических параметров и высоты шероховатости поверхности.

Способ шлифовании с контролем скорости V_2 , разработанный в Куйбышевском политехническом институте, является весьма эффективным при работе круга с полным самозатачиванием, когда режущая способность круга изменяется незначительно. При работе круга с частичным притуплением зерен указанный способ обработки может привести к значительным колебаниям силы резания вследствие изменения режущей способности круга. Кроме того, абразивные круги даже одной и той же

*) Способ расчета оптимального алгоритма разработан на основе метода, предложенного М.М.Тверским.

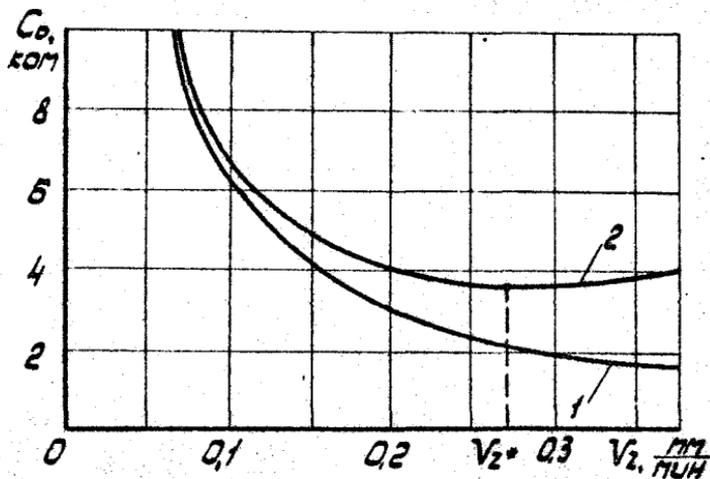


Рис. 1

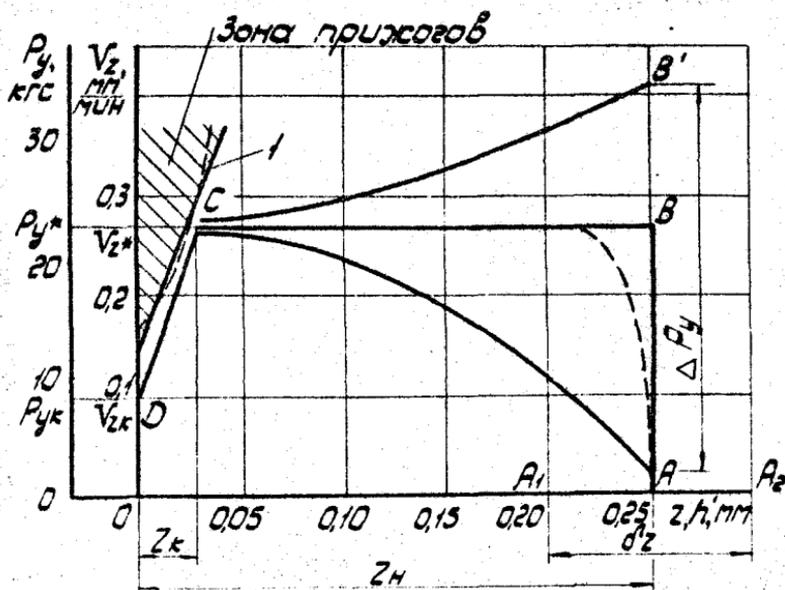


Рис. 2

характеристики имеют большие отклонения в режущей способности. Поэтому способ управления усилием P_y является более универсальным. Для построения алгоритма управления по силе P_y использована линейная зависимость: $Q_m = \kappa P_y$. По данным испытаний на 6113 коэффициент $\kappa = 148 \text{ мм}^3/\text{мин.кгс.}$ Величина усилия, обеспечивающая оптимальную по себестоимости скорость съема припуска, $P_{y*} = 23 \text{ кгс.}$, $P_{y\kappa} = 8,5 \text{ кгс.}$

Следует отметить условность "статического" алгоритма управления (кривая ABCD на рисунке 2), построенного для заготовки со средним, равномерно распределенным припуском. Начальная точка алгоритма для партии заготовок с номинальным припуском Z_n и допуском на предварительную обработку δZ может находиться в любой точке отрезка $A_1 A_2$. В реальных условиях невозможно достигнуть мгновенного нарастания усилия до P_{y*} и кривая увеличения усилия (пунктир на рисунке) будет зависеть от характеристики привода подачи. При неравномерном распределении припуска необходимо обеспечить увеличенный съем припуска на участках с минимальным радиусом, для чего необходимо, чтобы мгновенное значение величины силы P_y при шлифовании выступов и впадин обрабатываемой поверхности было различным. Величина колебания силы ΔP_y должна быть достаточной для исправления исходной погрешности до допустимой величины на участке BC съема основной части припуска. В то же время допустимая мгновенная нагрузка на шлифовальный круг определяет отклонение усилия в большую сторону (точка B' на рисунке).

Независимо от фактической режущей способности круга и других переменных условий алгоритм предусматривает постоянство усилия в конце цикла шлифования, поэтому этап выхаживания алгоритмом не предусмотрен. Алгоритм определяет требования к системе управления в целом и приводу подачи в частности, которые должны обеспечить:

- быстрый подвод круга к поверхности и быстрое нарастание натяга;
- бесступенчатое регулирование подачи в широких пределах;
- достаточную скорость исправления исходной погрешности;
- предотвращение недопустимых нагрузок круга, возможность реверсивного движения при шлифовании выступов, при этом не должен теряться контроль за величиной усилия;
- демпфирование вибраций и колебаний;
- стабильную, надежную работу и долговечность системы.

При врезном шлифовании направление силы P_y совпадает с направлением регулируемой подачи, поэтому сила P_y составляет большую часть нагрузки привода подачи. Как показано в докторской диссертации М.М.Тверского, для управления радиальным усилием в этом случае нет

необходимости в создании систем управления по классической схеме - с применением динамометрических устройств. Решить эту задачу можно проще - устранив или значительно снизив силы трения в механизмах привода подачи и обеспечив требуемые статические и динамические характеристики привода. Наиболее полно перечисленным выше требованиям отвечает система управления с гидравлическим приводом подачи. Принципиальная схема гидромеханической части САУ, разработанной в результате выполненного автором исследования, представлена на рис.3. Радиальное усилие подачи создается за счет разности усилий, развиваемых плунжерными гидроцилиндрами F_1 и F_2 . Гидроцилиндры через дроссельный регулятор скорости, обеспечивающий постоянство расхода масла Q , соединяются с гидросистемой станка. При рабочей подаче шлифовальной бабки массой M масло поступает в гидроцилиндр F_2 и через распределительный клапан и дроссель с линейным сопротивлением R - в гидроцилиндр F_1 . При отводе круга в конце цикла шлифования масло из гидроцилиндра F_1 поступает на слив, при этом под действием гидроцилиндра F_2 бабка прижата к правому упору, как это показано на рисунке.

Примененный в схеме дифференциальный гидродвигатель подачи обладает большой чувствительностью, т.к. обе рабочие полости цилиндра находятся под давлением. При рабочей подаче основная часть расхода масла Q идет на слив через дроссель N . Это позволяет, изменяя расход слива, получить двигатель с широким диапазоном регулирования подачи.

При отсутствии возмущающих воздействий после исправления исходной погрешности система обеспечивает постоянство усилия P_y . На чувствительность системы и точность управления большое влияние оказывает непостоянство силы трения в направляющих. Для стабилизации сил трения в механизме подачи применены крестовые пружинные шарниры.

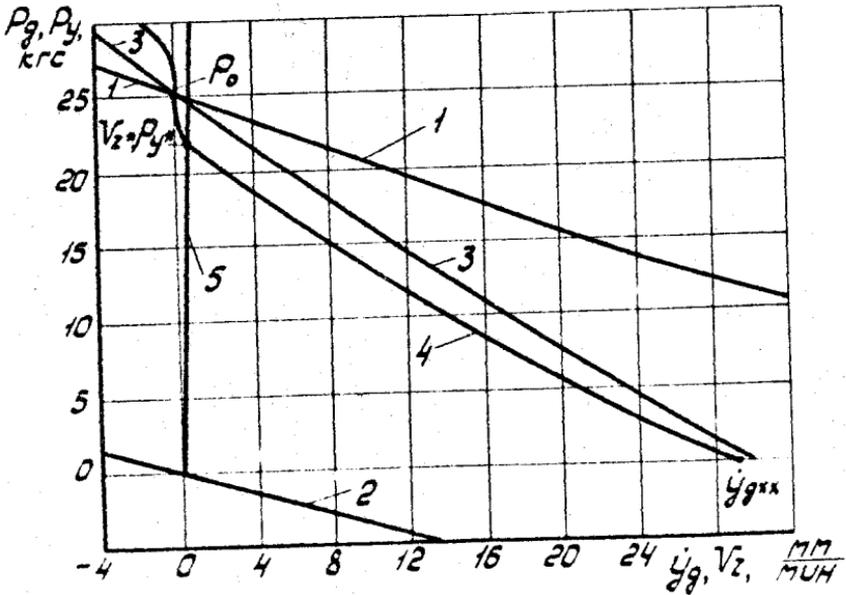
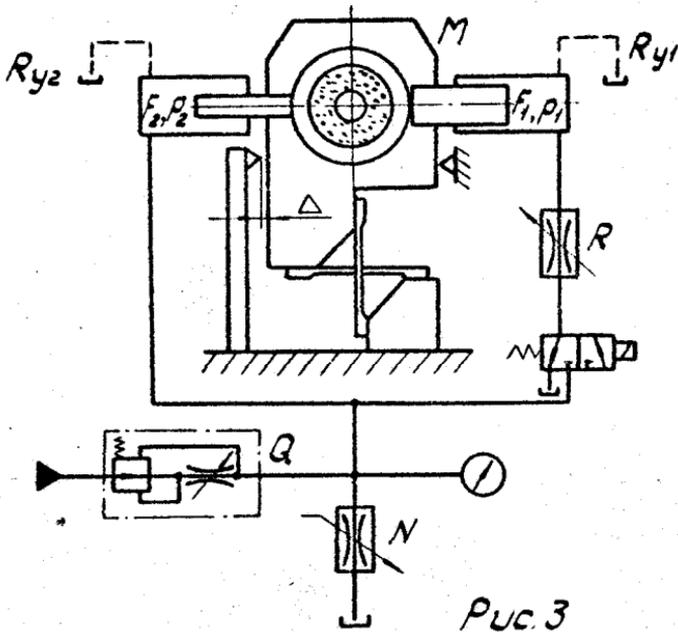
Чтобы не усложнять гидравлическую схему привода рабочей подачи, уменьшение усилия в конце цикла производится механическим способом, с помощью пружины большой жесткости. Настройка величины зазора Δ (рис.3) между регулируемым упором пружины и шлифовальной бабкой производится таким образом, чтобы при величине оставшегося припуска Z_A (рис.2) подаче бабки препятствовала пружина.

Механическая характеристика гидродвигателя подачи без учета утечек выражается следующим равенством:

$$P_y = \Delta F N^2 (Q - \Delta F \dot{y}_g)^2 - F_1^2 R \dot{y}_g, \quad (5)$$

где $F_1^2 R \dot{y}_g$ - сила сопротивления демпфирующего дросселя R .

Характеристика изображена на рис.4 (кривая 3). Графическое построение



PUC -

ние характеристики производится суммированием характеристик 1 и 2, соответствующих двум составляющим правой части уравнения (5). Зависимость полезной нагрузки, развиваемой гидроприводом, от скорости \dot{y}_g (кривая 4) является реальной характеристикой с учетом сил трения в подвижных элементах, которая получена непосредственным измерением $\dot{y}_g \cdot P_g$. Зависимость между усилием P_y и скоростью V_2 показана на рисунке линией 5. Пересечение характеристик 4 и 5 дает рабочую точку (V_{2*} , P_{y*}), характеризующую процесс резания при шлифовании с данным приводом подачи и отсутствии возмущающих воздействий. Скорость \dot{y}_g при $P_g = 0$ определяет скорость подвода к поверхности обработки. При значительных расходах через дроссели Q и N с учетом малых величин рабочих подач ($Q \gg \Delta F \dot{y}_g$) равенство (5) запишется в виде

$$P_g = \Delta F N^2 Q^2 - d \dot{y}_g, \text{ где } d = 2\Delta F^2 N^2 Q + F_1^2 R. \quad (6)$$

При значительном сопротивлении демпфирующего дросселя $d \approx F_1^2 R$.

II. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕЗНОГО ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАДИАЛЬНОГО УСИЛИЯ

Одним из важнейших преимуществ обработки отверстий шлифованием является надежное исправление исходной погрешности в поперечном сечении заготовки. При проектировании системы с регулированием усилия P_y это преимущество не должно быть утеряно. Поэтому необходимо исследовать характер формообразования поверхности в процессе шлифования, оценить влияние параметров системы и режима обработки на скорость исправления исходной погрешности заготовки. Запишем систему уравнений для процесса шлифования с использованием разработанной системы (рис. 3) управления поперечной подачей:

$$Q - \frac{1}{N} \sqrt{P_2} - \frac{1}{R} (P_2 - P_1) + F_2 \dot{y}_g - \frac{1}{R_{y_2}} P_2 = 0; \quad (7)$$

$$\frac{1}{R} (P_2 - P_1) - \frac{1}{R_{y_1}} P_1 - F_1 \dot{y}_g = 0; \quad (8)$$

$$F_1 P_1 - M \ddot{y}_g - P_y - F_2 P_2 = 0. \quad (9)$$

Принимая зависимость между P_y и натягом в системе СПИД прямо пропорциональной, получим

$$P_y = c y = c (y_g - y_n). \quad (10)$$

Принимая и величину t пропорциональной силе P_y , записываем

$$P_y = \frac{1}{t} \tau = \frac{1}{t} [y_n(\tau) - y_n(\tau - \tau_0)]. \quad (11)$$

После линеаризации и перехода к уравнениям в приращенных система уравнений может быть представлена в виде:

$$\delta P_2 = \frac{1}{\alpha \tau} \delta \alpha_2 + \frac{F_2}{\alpha} \delta \dot{y}_g; \quad (12)$$

$$\delta p_1 = \frac{1}{\beta R} \delta p_2 - \frac{F_1}{\beta} \delta y_g ; \quad (13)$$

$$\delta \ddot{y}_g = \frac{1}{M} (F_1 \delta p_1 - \delta p_y - F_2 \delta p_2) ; \quad (14)$$

$$\delta p_y = c(\delta y_g - \delta y_n) ; \quad (15)$$

$$\delta y_n(\tau) = \delta y_n(\tau - \tau_0) + \Gamma \delta p_y, \quad (16)$$

где $\alpha = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{y_2}} + \frac{1}{2N\sqrt{p_{20}}}$; $\beta = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{y_1}}$.

За установившееся состояние принят процесс шлифования, при котором отсутствуют возмущающие воздействия на систему (исходная погрешность равна нулю, режущая способность круга постоянна), при этом $p_y = p_{y0}$; $y_g = y_{g0}$; $p_1 = p_{10}$; $p_2 = p_{20}$; $y = y_0$; $t = t_0$. Линеаризация произведена в точке p_{20} . Исключив из уравнений (12)... (16) переменные δp_1 ; δp_2 ; δy_g ; δp_y , получим

$$T_2^2(1+c\Gamma)\delta \ddot{y}_n(\tau) + T_1(1+c\Gamma)\delta \dot{y}_n(\tau) + \delta y_n(\tau) = T_2^2\delta \ddot{y}_n(\tau - \tau_0) + T_1\delta \dot{y}_n(\tau - \tau_0) + \delta y_n(\tau - \tau_0), \quad (17)$$

где $T_2^2 = \frac{M}{c}$; $T_1 = \frac{d_1}{c}$; $d_1 = \frac{\alpha F_1^2 + \beta F_2^2 - \frac{1}{2} F_1 F_2}{\alpha \beta - \frac{1}{2} R^2}$ без учета утечек $d_1 = d$. При эксцентричном расположении обрабатываемого отверстия отклонение профиля его относительно оси вращения может быть довольно точно описано уравнением

$$\delta y_{n\text{исх}} = E_0 \sin(\omega \tau + \psi_0), \quad (18)$$

где $2E_0$ - исходная погрешность, E_0 - величина эксцентриситета, ψ_0 - начальная фаза.

Подставив $\delta y_{n\text{исх}} = \delta y_n(\tau - \tau_0)$ и ее производные в правую часть уравнения (17), получаем профиль поверхности после шлифования на первом обороте. При значительном демпфировании в системе (при $d > 2\sqrt{\frac{M}{1+c\Gamma}}$) получаем общее решение уравнения (17) в виде

$$\delta y_n = \bar{C}_1 e^{k_1 \tau} + \bar{C}_2 e^{k_2 \tau} + E_0 A \sin(\omega \tau + \psi_0 + \psi) = \bar{C}_1 e^{k_1 \tau} + E_0 A \sin(\omega \tau + \psi_0 + \psi), \quad (19)$$

где $0 \leq \tau \leq \tau_0$; $\bar{C}_1, \bar{C}_2, C_1$ - постоянные интегрирования, $k_{1,2} = -\frac{\alpha}{2M} \left[\frac{1}{1+c\Gamma} \pm \sqrt{\frac{1}{1+c\Gamma} - \frac{4M}{2M(1+c\Gamma)}} \right]$
 A - коэффициент, характеризующий изменение начальной амплитуды E_0 , ψ - смещение по фазе.

Приняв $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$, при нулевых начальных условиях, получим

$$\delta y_n = E_0 A \sin \psi e^{k_1 \tau} - \sin(\omega \tau + \psi). \quad (20)$$

Подставив это значение и его производные в правую часть (17) получим для 2-го оборота

$$\delta y_{n2} = \bar{C}_2 e^{k_2 \tau} - E_0 A^2 \sin(\omega \tau + 2\psi), \quad \tau_0 \leq \tau \leq 2\tau_0,$$

которое можно переписать следующим образом

$$\delta y_{n2} = E_0 A^2 [\bar{C}_2 e^{k_2 \tau} - \sin(\omega \tau - 2\psi)], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0. \quad (21)$$

Аналогично для m -го оборота

$$\delta y_{nm} = E_0 A^m [\bar{C}_m e^{k_m \tau} - \sin(\omega \tau + m\psi)], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0. \quad (22)$$

Величину коэффициента C_m можно подсчитать с помощью ряда, количество членов которого равно m :

$$C_m = \sin m\psi - \frac{\sin(m-1)\psi(1-e^{K_2 T_0})}{A} \dots - \frac{\sin[m-(n-1)]\psi(1-e^{K_2 T_0})}{A^{n-1}} \dots - \frac{\sin\psi(1-e^{K_2 T_0})}{A^{m-1}} e^{(m-2)K_2 T_0} \dots e^{(m-2)K_2 T_0}. \quad (23)$$

Сумма ряда практически определяется 3-мя первыми слагаемыми.

Для определенных соотношений параметров системы профиль поверхности при шлифовании на m -ом обороте заготовки может быть записан в виде*

$$\delta y_{nm} = -E_0 A^m \sin(\omega t + m\psi), \quad (m-1)T_0 \leq T \leq mT_0. \quad (24)$$

Например, при $\alpha = 255$ кгс.с/см; $M = 0,1$ кгс.с²/см; $C = 8 \cdot 10^3$ кгс/см; $C\Gamma = 0,05$; $\omega = 31,4$ с⁻¹ величина $K_2 = -30,35$ с⁻¹; $T_0 = -\frac{3}{K_2} = 0,099$ с; $T_0 = 0,2$ с, $\psi = -10^{\circ}24 = 0,0244$ радиан.

Погрешность профиля поверхности по формулам (22), (23) на 1,5-2% больше погрешности $2E_0 A^m$, определенной по формуле (24). Результаты вычисления оказываются близкими (различие не превышает 5-10%), если выполняется $0,25T_0 < T_c < 0,5T_0$, что примерно соответствует интервалу

$$\frac{\pi C}{6(1+C\Gamma)\omega} < \alpha < \frac{\pi C}{3(1+C\Gamma)\omega}. \quad (25)$$

Это заключение справедливо для всех соотношений параметров C, ω, Γ, M , характерных для процессов внутришлифовальной обработки. Для исправления исходной погрешности должно выполняться $A < 1$. Как видно из (22), (24) при меньших значениях A исходная погрешность исправляется быстрее. Для выражения A через параметры системы удобно воспользоваться понятием передаточной функции. На рис.5 построена структурная схема системы управления поперечной подачей на основании уравнений (12)...(16). Из рассмотрения схемы видно, что система является многоконтурной, с многочисленными внутренними обратными связями, показывающими взаимное влияние отдельных конструктивных элементов. Рассматривая процесс шлифования на одном обороте, примем в качестве входного сигнала отклонение профиля поверхности δy_{nm} на предыдущем обороте, а в качестве выходного - отклонение профиля δy_n на данном (рис.5), получаем передаточную функцию

$$W(s) = \frac{\delta y_n}{\delta y_{nm}} = \frac{T_0^2 s^2 + T_1 s + 1}{T_0^2 (1+C\Gamma)s^2 + T_1 (1+C\Gamma)s + 1}. \quad (26)$$

Модуль частотной передаточной функции, составленной по уравнению (26) даёт выражение для коэффициента A , а аргумент - для сдвига по фазе ψ :

$$A = |W(i\omega)| = \sqrt{\frac{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}{(1 - T_0^2 (1+C\Gamma)\omega^2)^2 + T_1^2 (1+C\Gamma)\omega^2}}, \quad (27)$$

* Зависимость (24) может быть получена также на основе частотного метода, возможность применения которого к данному процессу обоснована в докторской диссертации М.М.Тверского.

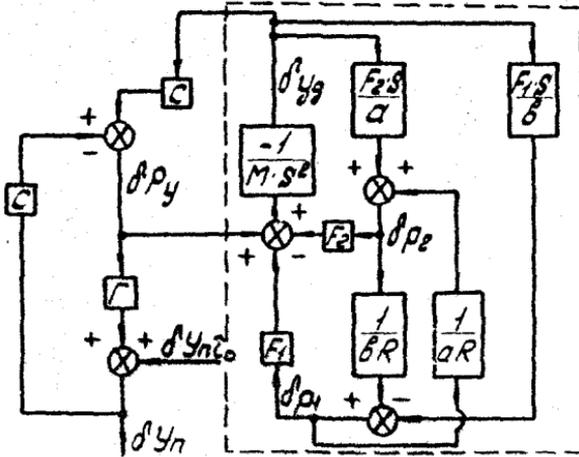


Рис. 5

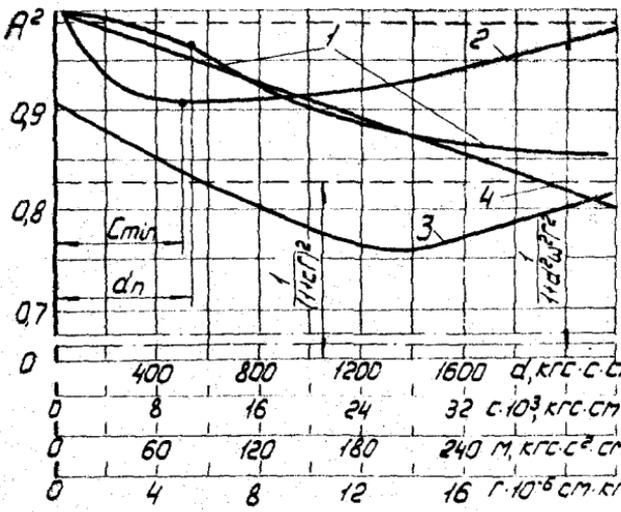


Рис. 6

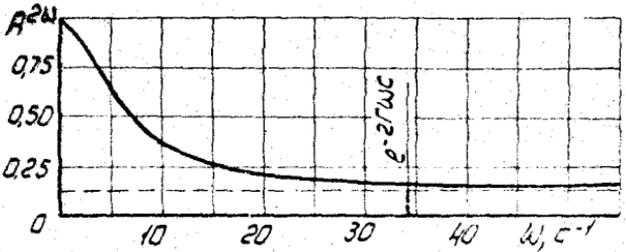


Рис. 7

$$\psi = \operatorname{arctg} W(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{T_1 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2} - \operatorname{arctg} \frac{T_1(1 + c\Gamma)\omega}{1 - T_2^2(1 + c\Gamma)\omega^2} \quad (28)$$

Рассмотрим зависимость коэффициента A от параметров системы d, c, M и коэффициента Γ при неизменной круговой частоте $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$.

При построении зависимости от одного из параметров системы остальные принимались постоянными: $d = 10^3 \text{ кгс.с/см}$; $c = 10^4 \text{ кгс/см}$; $M = 0,1 \text{ кгс.с}^2/\text{см}$; $c\Gamma = 0,1$. На рис.6 представлена зависимость коэффициента A^2 от d, c, M и Γ (соответственно кривые 1, 2, 3 и 4). Экстремальные точки кривых 2 и 3 соответствуют такому сочетанию параметров системы и круговой частоты ω , при которых обеспечивается максимальная разность усилий при шлифовании выступов и впадин поверхности. Наибольший наклон кривая 1 имеет в точке перегиба ($d = d_n$), поэтому система наиболее чувствительна к изменению параметра d в области, прилегающей к значению d_n . В случае, когда в системе осуществляется значительное демпфирование

$$d_n = \frac{c}{\sqrt{3}(1+c\Gamma)\omega} \quad (29)$$

Экстремальная точка кривой 2 соответствует жесткости $c = d\omega$, при увеличении d и ω эта точка смещается вниз и вправо. Полученный таким образом интервал

$$\frac{c}{\sqrt{3}(1+c\Gamma)\omega} < d < \frac{c}{\omega} \quad (30)$$

довольно точно соответствует интервалу (25) во всем диапазоне значений $c\Gamma = 0,1 - 0,01$, имеющем место при всех видах внутришлифовальной обработки. Экстремум кривой 3 достигается при весьма больших значениях массы подвижной части системы. Кривые 1, 2 и 3 имеют асимптоты (пунктирные линии на рис.6), положение которых определяется в основном жесткостью c и параметром Γ (для кривых 1 и 3 асимптота общая). При увеличении режущей способности круга (параметра Γ) коэффициент A^2 уменьшается приблизительно прямо пропорционально. Положение асимптот смещается вниз. При построении зависимости A от круговой частоты ω прием время шлифования одинаковым для любого значения ω и равным 4π секунд. Число оборотов заготовки за этот период $n = 2\omega$, а коэффициент исправления $A^{2\omega}$. Согласно работам Л.А. Глейзера и С.Н. Корчака принято, что за одинаковое время снимается примерно одинаковый припуск, независимо от значения ω (в определенных пределах).

График функции $A^{2\omega}(\omega)$ построен на рис.7. При увеличении частоты ω также как и при увеличении d скорость исправления погрешности увеличивается. Однако увеличение d и ω не всегда приводит к ощутимому увеличению скорости исправления (см.рис.6 и 7).

Увеличение демпфирования вызывает уменьшение скорости $\dot{y}_{грх}$ и может вызвать недопустимые перегрузки шлифовального круга. Поэтому величина коэффициента демпфирования d должна быть оптимальной. Для данных c и ω эту величину можно определить как $d = \frac{c}{\omega}$. При малых величинах рабочих поперечных подач трудно управлять соответствующими малыми расходами масла (см.рис.3), поэтому желательно, чтобы величина $d \approx d_n = \sqrt{\frac{c}{\omega(1+c\tau)\omega}}$. Следовательно, интервал (30) будет для параметра d наиболее предпочтительным. Кроме того, в этом интервале, согласно (25), формула (24) дает ошибку, не превышающую 5-10%. С помощью выведенных формул можно показать, что при шлифовании с применением разработанной системы управления поперечной подачей наиболее медленно исправляется эксцентриситет обрабатываемой поверхности. Поэтому при исследовании влияния параметров системы частота возмущающего воздействия принималась равной ω .

Проведенное аналитическое исследование позволило получить практические рекомендации для назначения основных конструктивных параметров системы управления.

Для оценки точности исследования было проведено решение исходной системы уравнений (7)...(11) на ЭЦВМ "Минск-22" методом последовательного интегрирования при отдельных частных значениях параметров системы и с учетом нелинейности и отсутствия непрерывного контакта режущей кромки круга с поверхностью в начале исправления исходной погрешности. Результаты машинного решения подтверждают вывод о возможности применения выражений (22) и (24) для оценки величины погрешности при шлифовании. Формула (24) дает заниженную величину погрешности, расхождение с машинным решением составляет 2-13% (меньшее при меньших d и ω). В случае необходимости более точной оценки следует применять формулы (22), (23).

Для исследования перегрузок шлифовального круга при исправлении погрешности в качестве выходного параметра принимается δP_y и составляется соответствующая передаточная функция по схеме рис.5. Для определения максимальных усилий можно при этом исключить процесс резания, поскольку величина съема за один оборот мала по сравнению с величиной припуска на обработку. Полученное соотношение между величиной исходной погрешности, параметрами системы и режимом обработки можно записать

$$n \frac{P_0}{c} = \frac{\epsilon_0 \alpha W}{\sqrt{c^2 + \alpha^2 W^2}}, \quad (31)$$

где $P_0 = \Delta F N^2 Q^2$, $(n+1)$ - кратность перегрузок.

При $n=1$ максимальная нагрузка не превысит значения $2P_0$.

Аналогично определяются колебания давлений в гидроцилиндрах и т.д.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАДИАЛЬНОГО УСИЛИЯ, ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование проводилось на установке, разработанной автором для внутришлифовального станка 3А250. Станок оснащен дополнительным гидравлическим приводом, специальной шлифовальной бабкой с электрошпинделем, приспособлением для эксцентричного закрепления заготовки и контрольным приспособлением для измерения и записи размера и формы отверстия в процессе обработки.

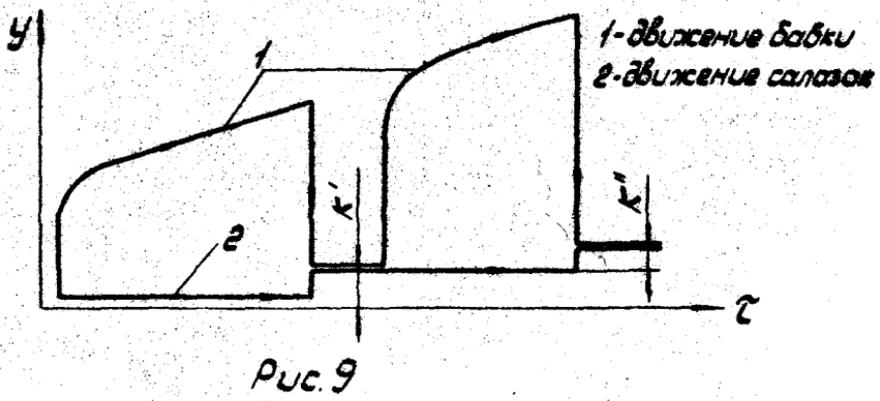
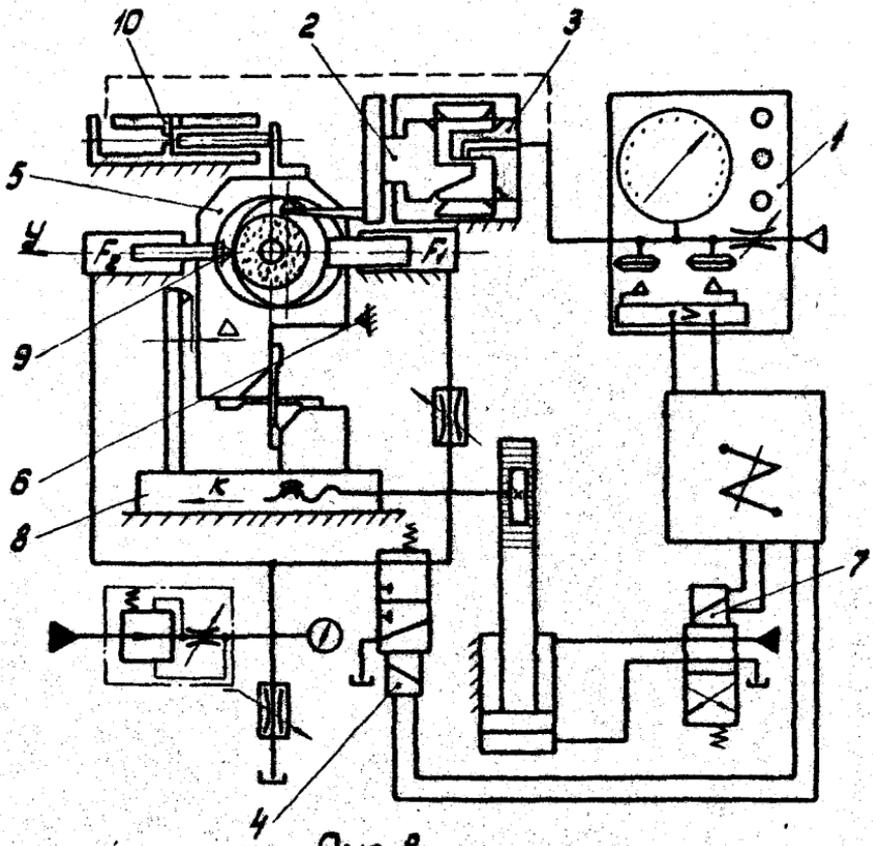
Первая часть экспериментов посвящена исследованию влияния различных факторов (частоты ω , степени демпфирования, величины силы P_y , режущей способности круга и др.) на процесс исправления исходной погрешности. Экспериментальные исследования количественно и качественно подтверждают полученные теоретические выводы о влиянии параметров системы и режимов обработки на скорость исправления погрешности заготовки.

При экспериментах было выявлено также, что для полной характеристики процесса исправления важна не только скорость исправления погрешности во времени, но и величина снимаемого при этом припуска. Получены зависимости в виде графиков изменения величины погрешности заготовки от величины снятого припуска, которые можно назвать качественными характеристиками процесса исправления исходной погрешности заготовки. Характеристикой качества может служить величина припуска, снятого за время шлифования, в течение которого исходная погрешность уменьшится до допустимой величины. Увеличение степени демпфирования, частоты ω и режущей способности круга оказывает более значительное влияние на улучшение качества исправления, чем на скорость исправления во времени. Помимо этих параметров на качество исправления значительное влияние оказывает величина давления в гидросистеме подачи, при уменьшении которого качество исправления улучшается. Качественные характеристики можно использовать для обоснованного назначения необходимой величины припуска на обработку или, наоборот, при данных припуске на обработку и величине исходной по-

грешности - для выбора параметров настройки и режима обработки.

Вторая группа экспериментов проведена для оценки производительности и точности обработки при шлифовании. Для сравнения брались результаты, полученные при шлифовании с регулируемым усилием и постоянной подаче, при которых величина постоянной подачи была равна средней скорости съема припуска при шлифовании с регулируемым усилием. Все остальные условия шлифования оставались постоянными. Производительность обработки за счет более быстрого нарастания натяга при шлифовании с регулируемым усилием была в 1,5-2 раза выше. Шлифование с регулированием радиального усилия обеспечивает значительное уменьшение (в 6-10 раз) разброса размеров в партии деталей (партия в 4-8 деталей, правка круга перед началом обработки партии). Точность размера при шлифовании по индикаторному упору повышается на два класса (2-2а класс по сравнению с 3-3а классом), при шлифовании с выхаживанием на жестком упоре может быть получен I-й класс точности. Система, осуществляющая контроль за величиной радиального усилия, обеспечивает меньший и более стабильный износ шлифовального круга, лучшее сохранение его режущих свойств. Шероховатость поверхности деталей партии находилась в пределах одного разряда класса шероховатости поверхности (8а, 8б) по сравнению с разбросом шероховатости в пределах 2-х классов (7-8). При шлифовании с регулируемым усилием прижоги отсутствовали.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу разработки промышленных вариантов систем автоматического управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием радиального усилия, один из которых приведен на рис.8. Для осуществления цикла (рис.9) с промежуточной правкой шлифовального круга использовались два сигнала командного блока I (рис.8) измерительно-управляющего устройства (ИУ) базового станка. Измерительный стержень подвижной каретки 2 пневмодатчика 3 находится в контакте с обрабатываемой поверхностью и по мере съема припуска уменьшает расход сжатого воздуха через блок I. При этом давление воздуха повышается и последовательно замыкаются I-й и 2-й контакты блока I. После замыкания I-го контакта подается команда на электро-распределительный клапан 4 и масло из гидроцилиндра F_1 поступает на слив. Шлифовальная бабка 5 гидроцилиндром F_2 прижимается к упору 6. Одновременно подается команда на клапан 7 базового станка и салазки 8 перемещаются в направлении подачи на величину предва-



рительно настроенной компенсации K' (рис.9). Стол станка выходит на правку, круг правится алмазом 9 (рис.8). При возвращении стола в зону обработки процесс шлифования продолжается до замыкания 2-го контакта. В конце цикла обработки может быть произведена повторная компенсация K'' (рис.9). В процессе производственных испытаний и внедрения осуществлялись также циклы без промежуточной правки.

Параметры настройки и режим обработки назначались на основе результатов, полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях системы управления поперечной подачей с учетом данных о заготовках и требований на обработку.

Разработанная система управления процессом внутришлифовальной обработки прошла производственные испытания на 6ПЗ (г.Свердловск). Испытания проводились на базе специального внутришлифовального полуавтомата "Swagel-200" (ГДР). Шлифовалось посадочное отверстие внутреннего кольца подшипника 3520/02. Требования к обработке: $D_g = 100 \begin{smallmatrix} -0,004 \\ -0,020 \end{smallmatrix}$, овальность и конусность 0,012, степень шероховатости $\nabla 7$, прижоги не допускаются. Производственными испытаниями убедительно доказаны основные преимущества шлифования с применением разработанной системы: стабильное получение требуемой точности размера и формы обрабатываемого отверстия; надежное обеспечение высокого качества поверхности, отсутствие прижогов; простота реализации автоматического цикла шлифования; повышение производительности труда за счет возможности многостаночного обслуживания и совмещения черновой и чистовой обработки отверстия в одну операцию; экономия расхода шлифовальных кругов; надежное исправление исходной погрешности заготовки. Испытания показали надежность работы всех узлов и стабильность параметров ее настройки.

Разработанная САУ внедрена на Челябинском заводе тракторных агрегатов на операции шлифования посадочных отверстий в шестернях коробки перемены передач трактора. Промышленный вариант САУ был разработан применительно к специальным внутришлифовальным станкам "Sip 200x315/1" (ГДР). Благодаря высокой стабильности радиального усилия, обеспечиваемой в конце цикла шлифования, удалось осуществить автоматический цикл обработки отверстий 2-го класса точности без непосредственного контроля размера в процессе обработки. Косвенный контроль размера осуществлялся с помощью контактного датчика IO (рис.8) по положению шлифовальной бабки. Технично-

экономические результаты внедрения: повышение точности обработки на один класс; повышение производительности обработки в 1,5 раза; улучшение шероховатости поверхности на I класс; сокращение расхода абразивного инструмента в 1,5 раза. Годовой экономический эффект (согласно акта внедрения) составил 40.000 рублей.

При внедрении результатов исследования на ПЗ-14 (г. Прокопьевск) годовой экономический эффект по акту внедрения составил 1250 рублей на один внутришлифовальный полуавтомат ЛЗ-154, оснащенный САУ. Показатели внедрения: повышение производительности обработки в 1,2 ... 1,4 раза; уменьшение поля рассеивания размеров с 15 до 10 мкм, уменьшение поля рассеивания овальности с 5 до 2 мкм.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм управления процессом внутреннего врезного шлифования с регулированием силы A_y , предусматривающий обеспечение минимума себестоимости технологической операции. Доказана условность "статического" алгоритма управления, составленного для заготовки со средним, равномерно распределенным припуском на обработку и необходимость его коррекции при практической реализации.
2. Определены основные требования к системе управления процессом врезного шлифования, в соответствии с которыми разработан и исследован простой по конструкции и надежный в эксплуатации привод, включающий дифференциальный гидродвигатель подачи с дифференциальным, последовательно-параллельным дроссельным регулированием.
3. Созданы конструкции специальных шлифовальных бабок с упругими элементами, что позволило практически стабилизировать силы трения в приводе подачи и в сочетании с гидроприводом создать простую и надежную систему автоматического управления с регулированием радиальной силы без дополнительной обратной связи и измерения усилия в процессе шлифования.
4. Предложен инженерный метод аналитического исследования пере-

ходного процесса, вызванного эксцентricностью обрабатываемой поверхности, который позволяет получить аналитическую зависимость между параметрами системы, режимом обработки и характером исправления исходной погрешности заготовки, синтезировать систему с требуемыми характеристиками, выбрать параметры ее настройки и режим обработки.

5. Получено в общем виде решение (выражения (22), (23)) дифференциального уравнения с отклоняющимся аргументом 2-го порядка нейтрального типа, которым описывается поведение системы управления поперечной подачей. Решение получено для значений параметров, характерных для внутреннего врезного шлифования с применением разработанной системы.
6. Основные рекомендации по выбору параметров системы и режима обработки: а) Для увеличения скорости исправления исходной погрешности заготовки должна быть назначена максимально допустимая скорость круговой подачи. Ограничениями при назначении величины круговой подачи может быть возможная несбалансированность приспособления и заготовки, обеспечение надежной работы датчика размера ИУУ и т.д. б) Оптимальные значения параметра α , характеризующего демпфирующие свойства привода подачи, лежат в интервале (30).
7. Коррекция "статического" алгоритма управления, предусматривающего съем основной части припуска при режимах, обеспечивающих минимум себестоимости технологической операции, производится в случаях: а) Если величина кратковременных перегрузок шлифовального круга при исправлении исходной погрешности превышает допустимую (формула (31)), б) Если за время снятия припуска не обеспечивается исправление исходной погрешности до допустимой величины (формулы (22) ... (24)).
8. Экспериментально доказана справедливость выводов, полученных при аналитическом исследовании процесса исправления погрешности заготовки. На основании результатов экспериментального исследования введено понятие качества исправления погрешности, характеристикой которого может служить величина припуска, снятого

за время, в течение которого исходная погрешность уменьшается до допустимой величины. Качественные характеристики позволяют обоснованно назначить необходимую величину припуска на обработку или параметры настройки и режим обработки при данных величинах припуска и исходной погрешности.

9. Разработаны и практически реализованы автоматические циклы шлифования с регулированием силы P_y . Для управления циклом требуется 1-2 команды ИУУ по сравнению с 4-6 командами, которые требуются при шлифовании с постоянной подачей при обработке точных отверстий.
10. Промышленный вариант САУ отличается простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью, малой стоимостью и может быть установлен практически на любой внутришлифовальный автомат или полуавтомат. Для управления гидродвигателем подачи применены стандартные, серийно выпускаемые промышленностью дроссели. В ходе производственных испытаний доказаны основные преимущества шлифования с применением разработанной системы: стабильное получение высокой точности размера и формы шлифуемого отверстия; надежное получение высокого качества поверхности, отсутствие прижогов; простота практической реализации автоматического цикла шлифования; повышение производительности обработки; экономия расхода абразивного материала; надежное исправление координаты отверстия.
- II. Система автоматического управления внедрена на Челябинском заводе тракторных агрегатов на операции шлифования посадочных отверстий шестерен коробки перемены передач трактора с годовым экономическим эффектом 40.000 рублей. На ПЗ-14 (г. Прокопьевск) САУ внедрена на операции шлифования посадочных отверстий внутренних колец подшипников. Годовой экономический эффект от внедрения в расчете на один станок, оснащенный САУ, составил 1.250 рублей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

- I. Исправление некрутлости при внутреннем шлифовании с регулируемой радиальной силой. Сб. "Самоподнастраивающиеся станки", М., "Машиностроение", 1970.

2. Формообразование поверхности при врезном внутреннем шлифовании с контролем усилия врезания. Сб. трудов ЧПИ "Прогрессивная технология чистовой обработки деталей машин", Челябинск, 1970, №79. (М.М.Тверской). *)
3. Повышение точности размеров и формы поверхности при внутреннем врезном шлифовании с контролем усилия врезания. Тезисы докладов к отраслевому научно-техническому совещанию "Повышение точности и надежности металлорежущих станков путем применения адаптивных корректирующих систем", Ленинград, 1970 (М.М.Тверской).
4. Повышение точности размера при внутреннем шлифовании с постоянным радиальным усилием. Сб. "Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ", Челябинск, 1970.
5. Динамика процесса шлифования со стабилизируемым радиальным усилием при исправлении исходной погрешности. Тезисы докладов научно-технической конференции "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием", Челябинск, 1971.
6. Повышение точности размера и формы поверхности при внутреннем врезном шлифовании с контролем усилия врезания. Сб. "Адаптивные системы управления металлорежущими станками", М., НИИ МАШ, 1971 (М.М.Тверской).
7. Динамика процесса внутреннего врезного шлифования с регулируемой радиальной составляющей силы резания. "Вестник машиностроения", 1972, №8 (М.М.Тверской).
8. Анализ процесса исправления погрешностей формы при врезном внутреннем шлифовании с регулируемым радиальным усилием. Известия ВУЗов "Машиностроение", 1973, №8 (М.М.Тверской).
9. Разработка алгоритма и системы управления процессом внутреннего врезного шлифования. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", ЛДНП, Ленинград, 1973 (М.М.Тверской).
10. Влияние параметров гидропривода и режима обработки на процесс исправления исходной погрешности при внутреннем шлифовании с регулируемым радиальным усилием. Сб. научных трудов ЧПИ "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", Челябинск, 1974, №145 (М.М.Тверской).

*) Здесь и далее в скобках указаны соавторы.