

05.02.08
И 75
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИГОЛЕВИЧ Владимир Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ
ОБРАБОТКИ НА КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ
С ЧПУ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Челябинск - 1992

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"
Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки
и техники РСФСР, доктор
технических наук,
профессор Корчак С. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Митрофанов В. Г. ;

кандидат технических наук,
доцент Суржов В. И.

Будущее предприятие - Челябинский агрегатный завод.

Защита диссертации состоится 24 апреля 1992 года,
в 10 часов, в ауд. 502 на заседании специализированного совета
ЛОБЗ.13.05 в Челябинском государственном техническом университете
по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76.

Просим Вас принять участие в заседании специализированного
совета или прислать по указанному адресу отзыв в двух экземпля-
рах, заверенных печатью.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского
государственного технического университета.

Автореферат разослан "23" апреля 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор экономических наук,
профессор



И. А. Баев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современной технике используется большое количество ступенчатых валов. Эти детали производятся при изготовлении двигателей, редукторов, шпинделей, коробок скоростей и т. д. Постоянно возрастающие требования к повышению производительности и точности обработки таких изделий вызывают необходимость интенсификации и автоматизации процессов их изготовления.

Эффективным средством автоматизации обработки многоступенчатых валов на круглошлифовальном оборудовании в мелкосерийном и серийном производстве являются станки с ЧПУ. Их высокая производительность обеспечивается за счет снижения вспомогательного времени на установку и снятие заготовки, на переналадку для обработки следующей шейки вала, на измерения. Резервы расширения технологических возможностей этого оборудования с точки зрения обеспечения требуемого качества обработки и, в том числе, точности при уменьшении основного времени заложены в управлении автоматическими циклами шлифования с использованием приборов активного контроля или путевых датчиков. Эти циклы составляют основное содержание управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ.

При разнообразии схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ формирование циклов врезного шлифования осложняется значительным несовпадением скорости съема припуска с программной скоростью движения шлифовальной бабки. Это связано с соизмеримостью по абсолютным значениям величин снимаемых припусков с упругими отжатыми, иногда величиной износа круга и допуском на заготовку и требует учета динамических свойств процесса шлифования. Обусловленная этим инерционность процесса шлифования оказывает существенное влияние на производительность и точность обработки. В настоящее время динамические свойства процесса учитываются технолог-программистом или наладчиком интуитивно, на основе собственного опыта поскольку отсутствуют нормативные материалы, в которых бы количественно связывались параметры управляющей программы (припуски, программные скорости подачи на этапах цикла) с качеством и, в частности, точностью обработки. Чтобы уменьшить многочисленные экспериментальные поправки программ на станках, вызывающие простои, технолог часто идет на заведомое занижение режимов резания, гарантирующее получение требуемых точности и качества обрабатываемых поверхностей и, следовательно, на соответствующее снижение производительности обработки. Поэтому весьма актуальной является разработка рекомендаций по обоснованному назначению режимов шлифо-

вания с учетом динамических свойств этого процесса. Разнообразие схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ при ограниченных возможностях эмпирических силовых зависимостей, учитывающих узкий диапазон варьирования параметров шлифования, вызывает необходимость разработки комплекса аналитических силовых зависимостей для реализации управления режимами резания и точностью обработки. Формирование циклов врезного шлифования требует выявления по силовой модели обобщенных динамических характеристик этого процесса и их взаимосвязи с широким набором технологических параметров. На основе чего может быть разработана формализованная методика расчета производительных циклов круглого наружного врезного шлифования, учитывающая ряд технологических ограничений, для использования в нормативных материалах, САПР и программном обеспечении станков с ЧПУ.

Цель работы. Разработка методики формирования управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ с учетом динамических свойств процесса для управления точностью и повышения производительности обработки.

Основные задачи. В работе решались следующие задачи.

1. Разработать силовые зависимости для различных схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ.
2. Разработать зависимости для определения взаимосвязи постоянной времени процесса шлифования как обобщенного динамического параметра с технологическими параметрами процесса.
3. Сформировать методику и алгоритм расчета циклов врезного шлифования для применения в системах автоматизированного проектирования технологических процессов, а также в станочных системах ЧПУ.
4. Разработать измерительно-вычислительный стенд для комплексных экспериментов по проверке адекватности моделей.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории резания металлов, законов механики, аналитической геометрии и теории автоматического управления.

Достоверность результатов аналитических решений проверялась экспериментально на специально разработанном измерительно-вычислительном стенде, обеспечивающем автоматизированные комплексные экспериментальные исследования процесса шлифования. Обработка экспериментальных данных проводилась методами математической статистики. Вычисления и математическое моделирование выполнялось на ЭВМ ММ420 и IBM PC/XT.

Научная новизна. 1. На основе закона механики о равенстве ак-

тивных и реактивных сил, а также основных законов теории пластичности разработаны аналитические силовые зависимости для различных схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ, учитывающие геометрические параметры и физико-механические свойства детали, а также состояние шлифовального круга и технологической системы в целом.

2. На основе анализа баланса скоростей и силового взаимодействия в технологической системе получена аналитическая взаимосвязь между постоянной времени процесса шлифования как его обобщенной динамической характеристикой и параметрами этого процесса.

3. Разработана методика расчетного определения технологического ограничения по точности обработки на параметры цикла врезного шлифования для расчета управляющих программ, основанная на использовании динамических характеристик шлифования.

Практическая ценность. 1. Для круглошлифовальных станков с ЧПУ впервые разработаны и изданы общемашиностроительные нормативы режимов резания, обеспечивающие полный выбор параметров цикла врезного шлифования и учитывающие их связь с точностью обработки.

2. Разработаны рабочие программы расчета автоматических циклов шлифования для ЭВМ, включенные в состав двух систем автоматизированного нормирования операций для станков с ЧПУ, спроектированных по заказам предприятий.

Промышленное использование разработанных нормативных материалов позволило сократить время отладки управляющих программ в среднем на 40%. При обеспечении требуемой точности и качества поверхности детали время циклов обработки сократилось в среднем в 1,4 раза.

Реализация работы. На ПО АвтоВАЗ внедрены "Руководящие материалы по режимам резания для круглошлифовальных станков с ЧПУ".

По заданию Центрального бюро нормативов по труду (ЦБНТ) в "Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на многоцелевых и универсальных станках с ЧПУ" включен раздел "Круглое наружное шлифование", при разработке которого использовались результаты диссертационной работы. Годовой экономический эффект - 108 тысяч рублей.

На основе этих нормативов разработана система автоматизированного нормирования операций для станков с ЧПУ, ориентированная на СМ4, СМ420. По заказу одного из предприятий завершена разработка системы нормирования программных операций для ЭВМ класса IBM PC.

Разработанные системы автоматизированного нормирования операций и стенд используются в курсовом и дипломном проектировании студентами специальности 1201, а также слушателями специального

факультета переподготовки инженерных кадров ЧТУ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на областной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "Автоматизация машиностроительного производства", Челябинск, 1984 г., на областной научно-практической конференции "Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации производства", Челябинск, 1986 г., на конференции "Опыт технологической подготовки и эксплуатации станков с ЧПУ", Свердловск, 1986 г., на научно-методическом семинаре "Внедрение микропроцессорных средств в машиностроении", Челябинск, 1987 г., на всесоюзной научно-технической конференции "Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и ГПС", Челябинск, 1988 г., на втором всесоюзном семинаре "Роботы и ГПС", Челябинск, 1988 г., на республиканской конференции "Автоматизация машиностроения на базе ГПС и РТК", Баку, 1988 г., на республиканском семинаре "Автоматизация контроля качества в ГПС", Севастополь, 1989 г., на региональном научно-техническом семинаре "Механика и технология машиностроения", Свердловск, 1990 г., на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института 1984 - 1987 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 101 наименования и 10 приложений на 59 страницах. Общий объем работы 226 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Одной из главных задач технологии машиностроения является установление связей между технологическими факторами, определяющими производительность и точность обработки. Основы такой связи разработаны в трудах Б. С. Балакшина. В работах Б. М. Базрова, Л. В. Худобина, И. Е. Фрагина, П. И. Яшеричины и др. обосновано рассмотрение силы резания как интегрального показателя многих факторов шлифования, которые порождают погрешность динамической настройки, а также определяющая роль нормальной составляющей силы резания в управлении упругими перемещениями, точностью и производительностью обработки через управление режимами резания. В связи с этим расчетные

зависимости сил резания при шлифовании во многих известных работах положены в основу проектирования автоматических циклов, в том числе, для оборудования с ЧПУ.

При этом известные эмпирические зависимости, охватывающие значительный набор схем обработки, работают в узком диапазоне технологических параметров и не устанавливают связи между этими параметрами и составляющими силы резания. С. Н. Корчаком предложен подход, основанный на использовании законов механики и теории пластичности, позволивший получить расчетные зависимости для условного единичного зерна. Этот подход получил развитие в работах П. П. Переверзева и В. Л. Кудыгина, в которых эти зависимости обобщены для некоторых схем шлифования для круга в целом. Однако в связи с концентрацией переходов на станке с ЧПУ этот набор аналитических зависимостей недостаточен для разработки методики полного расчета режимов резания в управляющих программах.

Основным содержанием управляющей программы круглошлифовального станка с ЧПУ является закон изменения режимов резания при врезном шлифовании. Г. В. Лурье, В. Н. Михелькевичем и другими исследователями показано, что из-за упругости технологической системы, износа круга и других факторов интенсивность съема металла на протяжении рабочего цикла шлифования с постоянной программной скоростью подачи будет значительно меняться, что затрудняет расчет программ. Исследованию динамики процесса шлифования посвящены работы В. А. Кудинова, М. М. Тверского, Д. В. Каленика и других. В. А. Кудинов, В. Н. Михелькевич, В. Ю. Новиков обосновали подход, когда с достаточной для практики точностью взаимосвязь между силой резания и деформацией технологической системы считается безинерционной, а сам процесс шлифования описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T \frac{dS_{\phi}}{dt} + S_{\phi} = K_c S_n, \quad (1)$$

где S_{ϕ} - фактическая скорость съема припуска, S_n - программная скорость движения шлифовальной бабки (номинальная скорость подачи), K_c - статический коэффициент передачи процесса шлифования как динамического звена, T - постоянная времени процесса шлифования, характеризующая динамику изменения S_{ϕ} при изменении S_n . Решение этого дифференциального уравнения позволяет получить формализованное описание циклов шлифования и выполнить расчет управляющих программ. Существенное влияние на результаты такого расчета, а следовательно на точность и производительность обработки оказывает точность оценки коэффициентов уравнения (1), в частности. Т. В. Ю. Новиков экспериментально показал влияние на постоянную

времени различных параметров шлифования. В. А. Ратмиров, А. С. Чубуков используют этот обобщенный параметр для целей автоматического управления, определяя значения T в ходе шлифования. Однако в известных работах отсутствуют аналитические расчетные зависимости, связывающие постоянно времени с параметрами процесса шлифования, что делает невозможным проектирование автоматических циклов на стадии подготовки управляющих программ.

В связи с этим представляется целесообразным получение аналитических зависимостей, обеспечивающих возможность проектирования управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ и, в частности, циклов врезного шлифования.

2. ВЗАИМОСВЯЗЬ СИЛ РЕЗАНИЯ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И РЕЖИМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ШЛИФОВАНИЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРОЦЕССА. ПОДХОД К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

В основу получения силовых зависимостей положены аналитические связи между режимами обработки и силами резания, разработанные С. Н. Корчаком и основанные на равенстве сил резания и сил сопротивления материала пластической деформации для единичного условного верна, имеющего площадку заглупления. Для рассмотрения были приняты три схемы: шлифование торца детали торцом круга, шлифование угловым кругом с продольной подачей стола, а также угловое шлифование.

Для всех этих схем с использованием методики П. П. Переверзева выведены теоретические зависимости для круга в целом путем определения суммарной мощности деформации в объемной схеме резания. В каждой схеме рассматривались элементарные участки шлифовального круга, характеризующиеся шириной B_j , длиной дуги контакта L_j , скоростью съема металла Q_j , скоростью резания V_{kj} . Суммарные зависимости для всех режущих зерен получены интегрированием по всей площадке контакта круга с деталью. В результате получено для составляющей силы резания, действующей в направлении выполняемого размера, при шлифовании торца детали угловым кругом с продольной подачей стола

$$P_x = 6 \int_{z_{\min}}^z \frac{\epsilon_c \cdot c \cdot z_j \cdot \sin(\arctg \frac{S_{np}}{2\pi z_j n}) \cdot \sqrt{S_{np}^2 + (2\pi n z_j)^2}}{\eta_k \cdot c \cdot (R - z_j)} + \\ + \frac{\mu \cdot \eta \cdot 1,41 \cdot ((R - z_j + z_{\min}) \cdot \sin \psi)}{z_{\min} \cdot \sin \psi} dz_j,$$

где ϵ_i - интенсивность напряжений, ϵ_c - интенсивность степени деформации, S_{np} - скорость продольной подачи, n - частота вращения детали, n_k - частота вращения круга, R - радиус круга, z - радиус детали, $z_{мин}$ - минимальный обрабатываемый радиус детали, μ - коэффициент трения, η - степень затупления круга, ψ - угол разворота шлифовальной бабки.

При рассмотрении шлифования торца детали торцом круга известно, что обработка представляет собой комбинацию двух схем: шлифование плоскости плоскостью и шлифование периферийными зернами круга за счет круговой подачи детали. В этом случае

$$P_x = \int_{z_{до}}^{z_{до+d}} \int_{z_{мин}}^z \left(\frac{\epsilon_i \cdot \epsilon_c \cdot S_{np}}{4 \pi^2 \cdot n \cdot n_k} \left(d_j - \frac{d}{2} + \alpha \epsilon \cos \alpha \frac{z_j^2 + R_{мц}^2 + R^2}{2 \cdot z_j \cdot R_{мц}} \right) \cdot z_j \cdot \operatorname{tg} \beta + \frac{\epsilon_i \cdot \eta \cdot z_j}{c} \right) \cdot dz_j,$$

где d - угол контакта круга с деталью, $R_{мц}$ - межцентровое расстояние круг-деталь.

В случае углового шлифования предполагалось, что для принятых на практике углов разворота шлифовальной бабки при шлифовании одним из конусов круга диаметральной поверхности силовое взаимодействие определяется в основном поперечной составляющей скорости движения подачи, а при шлифовании вторым конусом торцевой поверхности детали такой составляющей является продольная. Выражение для нормальной составляющей силы резания, действующей в направлении выполняемого размера с более жестким допуском и в конечном счете определяющей точность обработки,

$$P_y = \frac{\epsilon_i \cdot \epsilon_c \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot d \cdot S_{np} \operatorname{ctg} \theta}{2 \cdot n_k} \cdot \ln \frac{R_{макс}}{R_{мин}} + \frac{\epsilon_i \cdot \eta}{c \cdot \operatorname{ctg} \theta} \sqrt{\frac{2 \cdot d \cdot S_{np} \cos^2 \theta}{n}} \times \\ \times \int_{R_{мин1}}^{R_{макс1}} \frac{dR_j}{\sqrt{2 \cdot \cos \theta + d/R_j}} + \int_{R_{мин2}}^{R_{макс2}} \left(\frac{\epsilon_i \cdot \epsilon_c \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot S_{np} \operatorname{tg} \theta \cdot \sqrt{S_{п}^2 \sin^2 \theta + 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_j \cos \theta}}{R_j \cdot n \cdot n_k \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{S_{np} \operatorname{tg} \theta}{2 \cdot \pi \cdot R_j} \right)^2}} + \frac{\epsilon_i \cdot \eta \cdot \operatorname{tg} \theta}{c} \sqrt{\frac{2 \cdot R_j \cdot S_{п}}{n}} \cdot \left(1 + \left(\frac{S_{np} \operatorname{tg} \theta}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_j} \right)^2 \right)^{-0,25} \right) dR_j,$$

где $S_{п}$ - поперечная составляющая скорости подачи, $R_{мин1}$, $R_{макс1}$ - соответственно, минимальный и максимальный работающие на диаметральной поверхности радиусы круга, $R_{мин2}$, $R_{макс2}$ - соответственно, минимальный и максимальный работающие на торце детали радиусы круга.

Получены также выражения для определения других составляющих силы резания для рассмотренных схем обработки.

Для анализа адекватности полученных зависимостей, а также для дальнейшего комплексного исследования круглого наружного шлифования как многофакторного процесса разработан и изготовлен измерительно-вычислительный стенд (ИВС) на базе промышленного станка с ЧПУ ЗМ151Q2 и ЭВМ IBM PC, сопряжение между которыми выполнено через стандартный интерфейс КАМАК. Функциональная схема стенда приведена на рис. 1. Аппаратная часть ИВС разработана исходя из требования универсальности. Конкретные группы экспериментов проводятся на ИВС за счет расширения его программного обеспечения. ИВС выполняет функции: сбор результатов измерений и ввод их в ЭЕМ; первичная обработка информации; визуальное и графическое отображение информации; сортировка, накопление и хранение информации; автоматическое регулирование технологических параметров; программно-логическое управление приводами и механизмами станка для физического моделирования задаваемого режима исследования.

В качестве примера приведены результаты группы экспериментов по оценке влияния режимов шлифования на силы резания при шлифовании торца детали из стали ХВГ торцом круга Ш 600х40х360 24А 40 С1 5К при его частоте вращения 1480 об/мин в диапазоне частот вращения 60...350 об/мин и диапазоне продольных подач 0,5...50 мм/мин (основной диаметр образца - 80 мм). После статистической обработки результаты эксперимента сравнивались с расчетными данными (рис. 2).

Адекватность качественных свойств модели реальному процессу в широком диапазоне варьирования технологических параметров позволяют рекомендовать полученные уравнения для использования при выявлении обобщенных характеристик процесса, в том числе для анализа его динамических свойств.

3. ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ. ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ОБРАБОТКИ

Для дальнейшего исследования принята наиболее распространенная на практике схема круглого наружного шлифования с поперечной подачей шлифовальной бабки. На основании описания процесса уравнением (1) в качестве обобщенного динамического параметра рассматривается постоянная времени T .

Согласно методике, предложенной В. Н. Михелькевичем, может быть записан баланс скоростей в технологической системе:

$$S_k = S_{\varphi} + S_{уд} + S_{ик},$$

МАГИСТРАЛЬ КРЕЙТА КАМАК

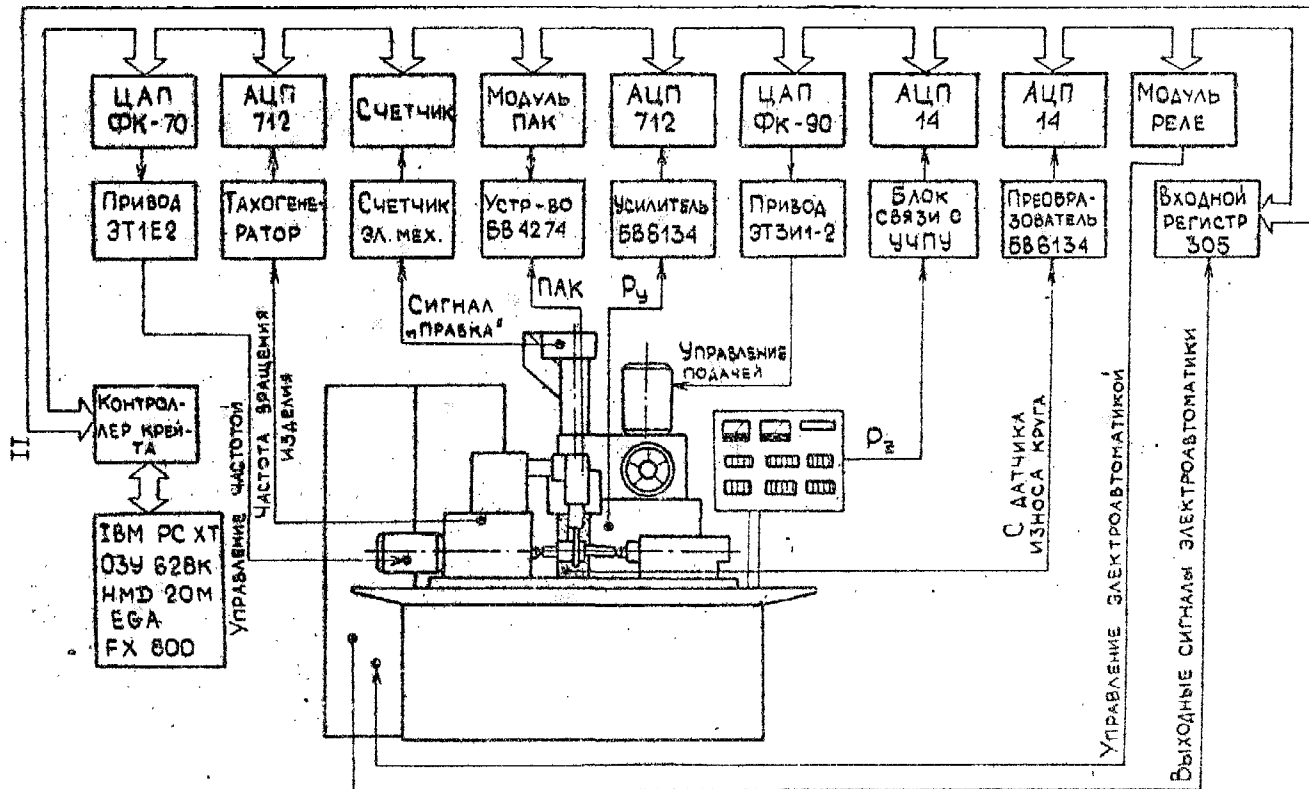


Рис. 1. Функциональная схема КВЭ

где S_k - скорость движения подачи шлифовального круга, S_ϕ - фактическая скорость съема припуска, $S_{уд}$ - скорость упругой деформации технологической системы, $S_{ик}$ - скорость износа круга. Учитывая, что на основании принятых допущений

$$S_{ик} = \alpha \cdot S_\phi; \quad S_{уд} = \frac{dP_y}{j \cdot d^2}$$

где j - жесткость технологической системы, и разлагая в ряд Тейлора аналитическую зависимость для P_y , получим:

$$T = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot B \cdot \delta_i \cdot \varepsilon_i \cdot \tan \beta}{V_k} + \frac{\eta \cdot B \cdot \delta_i}{2 \cdot c \cdot S_0^{0.5}} \sqrt{\frac{D \cdot d}{n \cdot (D+d)}} \right) \cdot (j \cdot (1+\alpha))^{-1} \quad (2)$$

где V_k - скорость резания, D, d - соответственно, диаметры шлифовального круга и детали, B - ширина шлифования, S_0 - характеристика диапазона подач. Полученное выражение описывает взаимосвязь постоянной времени с входными параметрами процесса. Анализ результатов расчета показывает, что наибольшее влияние на постоянную времени процесса оказывает жесткость технологической системы (при

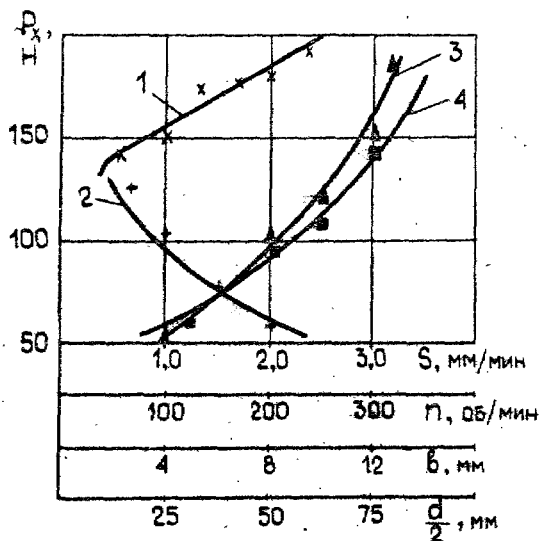


Рис. 2. Взаимосвязь составляющей силы резания с параметрами шлифования:

- 1 - влияние скорости подачи S (x);
- 2 - влияние частоты вращения детали n (+);
- 3 - влияние разности радиусов B (▲);
- 4 - влияние диаметра детали d (■)

ее изменении от 500 до 1500 кг/мм - T уменьшается в 2,5...3 раза), а также геометрические параметры обрабатываемой поверхности. В рабочем интервале изменения последних T изменяется в среднем в 4 ра-

аа. Заметно также влияние свойств обрабатываемого материала (σ_i), частоты вращения детали и степени затупления круга.

Чтобы оценить взаимосвязь рассматриваемой обобщенной характеристики с выходными параметрами процесса шлифования, в частности, с точностью и производительностью, рассмотрен процесс формообразования при круглом врезном шлифовании (рис. 3), для которого:

$$z_i(\tau) = z_i(\tau - \tau_0) - \Delta z_i; \quad S_\phi = \Delta z_i / \tau_0;$$

$$S_k = S_n + \Delta S; \quad \Delta S = dz/d\tau,$$

где $z_i(\tau)$ - некоторый радиус детали в момент времени τ , τ_0 - время одного оборота детали, ΔS - приращение кинематической подачи, за счет колебания припуска. Тогда для относительно низкочастотной погрешности, определяемой как

$$\Delta = z_{\max} - z_{\min}$$

(где z_{\max} , z_{\min} - соответственно, максимальный и минимальный радиус

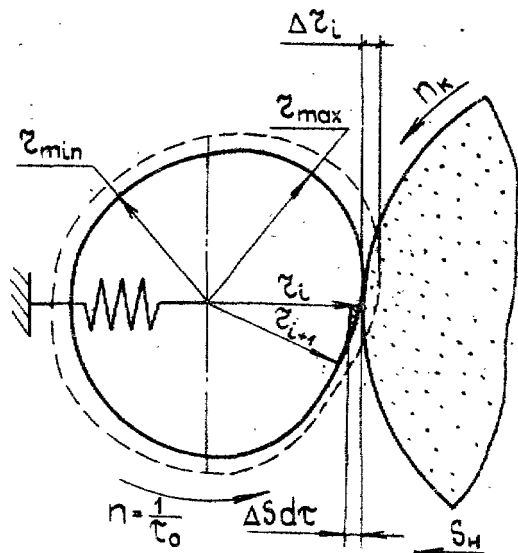


Рис. 3. К анализу формообразования при врезном шлифовании

детали), процесс шлифования выступает как фильтр. И если на начальном этапе шлифования (прерывистое резание) исправление погрешности полностью определяется номинальной скоростью движения подачи, то на втором этапе (непрерывный контакт детали с кругом) новая

погрешность на ℓ -м обороте может быть определена через коэффициент передачи аperiodического звена первого порядка на частоте ω :

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{\ell-1} \cdot \frac{K_r}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \cdot \Delta \varepsilon_{\ell-1},$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot K_r \cdot n$, K_r - коэффициент гармоник, определяющий конкретный профиль поперечного сечения детали (эллипс, эксцентриситет и т. п.). На основании обобщения формул, описывающих исправление погрешности на указанных этапах шлифования, получено время исправления радиального биения от Δ_0 до Δ при постоянной номинальной скорости подачи. Когда время полного врезания соизмеримо с временем одного оборота детали и $\Delta \geq S_n$, это выражение имеет вид:

$$\tau_n = \frac{1}{n} \lg \frac{\Delta}{\Delta_0} \left(\lg \left(1 - \frac{K_r}{\sqrt{1 + 4 \pi^2 n^2 K_r^2 T^2}} \right) \right)^{-1} \quad (3)$$

Известно, что решения дифференциального уравнения (1) для различных начальных условий и интегралы этих решений позволяют получить взаимосвязь, соответственно фактической скорости съема припуска и величины снимаемого припуска с управляющим параметром (номинальной подачей) во времени на разных этапах цикла. При этом, выполняя расчет по производительности при очевидном условии, что время цикла существенно больше времени одного оборота детали, можно пренебречь составляющей кинематической подачи ΔS . Тогда общий вид этих зависимостей для i -й ступени цикла:

$$\begin{cases} S_{\varphi_i} = S_{\varphi_{i-1}} - (S_{\varphi_{i-1}} - S_{n_i}) \cdot e^{-\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{T}}; \\ P_i = S_{\varphi_i} (\tau_i - \tau_{i-1}) + T \cdot (S_{\varphi_{i-1}} - S_{n_i}) \cdot \left(e^{-\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{T}} - 1 \right). \end{cases} \quad (4)$$

Приведенные зависимости доказывают существенную взаимосвязь между постоянной времени шлифования и параметрами процесса, что позволяет использовать ее в качестве обобщенной динамической характеристики для расчета управляющих программ по производительности и точности в области низких частот (исправление эллипсности, эксцентриситета и т. п.).

Однако для анализа развития волнистости в процессе шлифования, связанного с колебаниями силы резания, необходимо рассмотреть процесс шлифования как объект, на входе которого управляющее воздействие (скорость подачи), а на выходе - нормальная составляющая силы резания. При этом, как показано В. А. Кудинским, В. Н. Михелькевичем, М. М. Тверским, необходимо вводить в рассмотрение обратные связи с запаздыванием по детали и кругу. Разложение передаточной

функции такого объекта в ряд Пада дает в операторной форме записи:

$$W(p) = \frac{P(p)}{S(p)} = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (5)$$

где $b_0 = 144 \cdot K_p \cdot \beta \cdot \tau_0$; $b_1 = 72 \cdot K_p \cdot \tau_0 \cdot \tau_k \cdot \beta$;

$$b_2 = 12 \cdot K_p \cdot \tau_0 \cdot \tau_k^2 \cdot \beta; \quad a_0 = 144 + 72 \cdot K_p / j + 144 \cdot K_p \cdot \tau_0 \cdot K_{\text{нк}};$$

$$a_1 = 72 \cdot (\tau_0 + \tau_k) + 144 \cdot K_p \tau_0 / j; \quad a_2 = 12(\tau_0^2 + \tau_k^2) + 36 \cdot \tau_0 \cdot \tau_k +$$

$$+ K_p \cdot \tau_0 \cdot \tau_k / j; \quad a_3 = 6 \cdot (\tau_0^2 \cdot \tau_k + \tau_0 \cdot \tau_k^2) + 12 \cdot K_p \cdot \tau_0 \cdot \tau_k^2 / j;$$

$$a_4 = \tau_0^2 \cdot \tau_k; \quad K_p = T \cdot j \cdot (1 + a) / \tau_0;$$

β - коэффициент, учитывающий разновысотность зерен круга; τ_0 , τ_k - соответственно время запаздывания по детали и по кругу; $K_{\text{нк}}$ - коэффициент, характеризующий износ круга. Таким образом, постоянная времени определяет значение коэффициентов этой передаточной функции.

Для формирования технологического ограничения по устойчивости (отсутствию огранки) использован критерий Гурвица:

$$\begin{cases} a_3 \cdot a_2 - a_4 \cdot a_1 > 0 \\ a_3 \cdot a_2 \cdot a_1 - a_4 a_1^2 - a_3^2 \cdot a_0 > 0. \end{cases}$$

Для анализа качества переходных процессов (развитие воли от различных возмущений), исходя из удобства машинного расчета, приняты корневые показатели качества: степень устойчивости \mathcal{U}_c и колебательность M_c . Составлена программа расчета на ЭВМ, позволяющая определить корни характеристического уравнения функции (5) для различных значений T .

Взаимосвязь T с различными параметрами процесса, а также результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 4. Эксперименты выполнялись с использованием ИВС. Постоянная времени T определялась по переходной характеристике $S_p(\tau)$, которая предварительно фильтровалась от помех.

На основании проведенного исследования было сформировано ограничение по точности обработки на параметры цикла врезного шлифования. В это ограничение кроме составляющих погрешности в продольном сечении из-за упругих деформаций и кинематической погрешности, образующейся за один оборот детали, введен учет исправления радиального биения, а также условия неразвития волнистости и отсутствия огранки.

В результате разработан граничный алгоритм формирования цикла врезного шлифования. Он включает в себя: расчет стационарных (независящих от снятого припуска) технологических ограничений; зада-

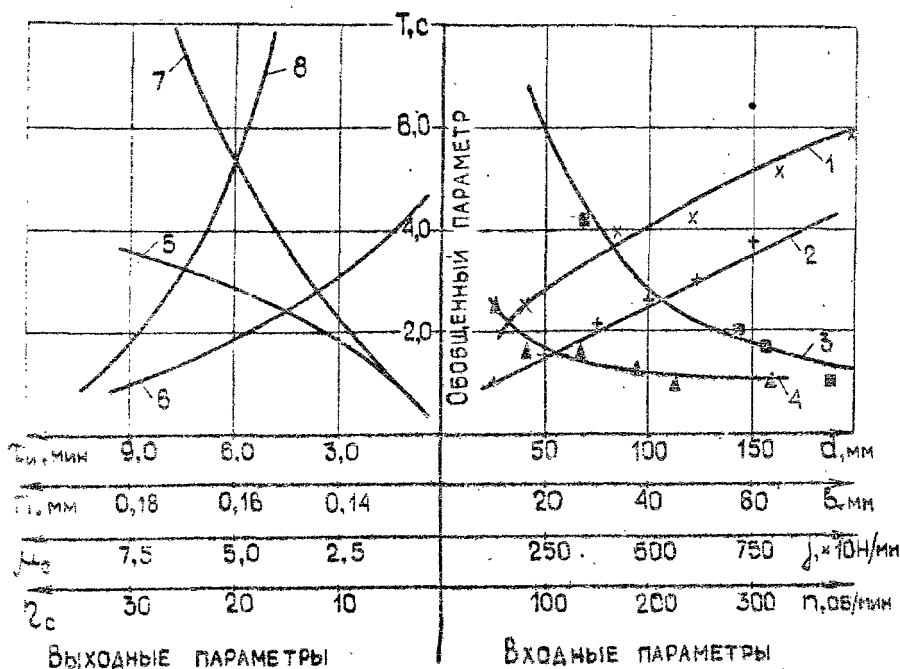


Рис. 4. Езавимосвязь постоянной времени T с параметрами шлифования: 1 - диаметром детали d (x); 2 - шириной шлифования B (+); 3 - жесткостью технологической системы j (•); 4 - частотой вращения детали n (Δ); 5 - временем исправления радиального биения $\tau_{\text{ци}}$; 6 - снятым за 10 с припуском M_c ; 7 - колебательностью процесса M_c ; 8 - степенью устойчивости τ_c

ние. исходя из них, начальных условий (скоростей подачи); решение системы нелинейных уравнений, составленных из зависимостей вида (4) и нестационарных ограничений; проверка остальных ограничений и при необходимости коррекция начальных условий с повторением расчета. К учитываемым ограничениям относятся: заданное по чертежу точности и шероховатости; отсутствие прижога, условие нессыпания круга, мощность на приводе главного движения, допустимый диапазон скоростей подачи. Экспериментальная проверка полученных циклов показала их большую производительность по сравнению с циклами, рассчитанными по известным методикам Харьковского станкостроительного завода и НИИ "УкрОргстанкинпром", в среднем в 1,4 раза при обеспечении требуемого качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе предложен новый подход к аналитическому определению режимов резания с использованием обобщенного динамического параметра процесса шлифования на этапе подготовки управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ, обеспечивающий, в частности, расчет производительных циклов врезного шлифования при заданных требованиях по точности обработки.

Результаты выполнения работы.

1. Получены аналитические выражения, описывающие закономерность изменения сил резания в широком диапазоне варьирования параметров процесса шлифования для основных схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ. На их основе проведен расчетный количественный анализ влияния переменных параметров на силы резания.

2. Получена аналитическая зависимость между постоянной времени процесса шлифования как его обобщенной динамической характеристикой и геометрическими, а также технологическими параметрами процесса.

3. На основе этих зависимостей разработана математическая модель формирования поперечного профиля детали, учитывающая инерционность процесса обработки. Определена структура технологического ограничения на параметры цикла врезного шлифования по точности и получено формализованное описание составляющих этого ограничения.

Основные выводы по работе.

1. Подход, основанный на использовании фундаментального закона механики о равенстве активных сил (резания) и реактивных сил (сил сопротивления металла пластической деформации), а также основных законов теории пластичности, обеспечил возможность определения адекватных аналитических зависимостей составляющих сил резания для различных схем обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ, учитывающие геометрические параметры и физико-механические свойства детали, а также состояние шлифовального круга и технологической системы в целом.

2. При наружном врезном шлифовании процесс обработки достаточно полно описывается как связь программной скорости движения поперечной подачи с фактической скоростью сдвига припуска дифференциальным уравнением первого порядка. При этом постоянная времени процесса шлифования в полной мере отражает его свойства и может рассматриваться как обобщенная динамическая характеристика при расчете циклов врезного шлифования для управляющих программ станков с ЧПУ. Впервые получена аналитическая зависимость между процес-

янной времени процесса шлифования и технологическими параметрами этого процесса.

3. Использование постоянной времени в качестве обобщенного динамического параметра дало возможность разработать эффективную методику проектирования циклов наружного врезного шлифования для включения в управляющие программы станков с ЧПУ, обеспечивающей учет технологических ограничений (по точности обработки, шероховатости изделия, бесприжоговости обработанной поверхности, осыпаемости круга и других). Эта методика может использоваться в режимных блоках систем автоматизированного проектирования операнд для станков с ЧПУ, а также в станочных микроЭВМ.

4. Многофакторность процесса шлифования требует комплексного подхода к его экспериментальному исследованию, который обеспечивается средствами их автоматизации. Разработанный и изготовленный в ходе выполнения работы измерительно-вычислительный стенд эффективно реализует такой подход.

5. Промышленное использование разработанных на основе проведенного исследования нормативных материалов показало, что сроки отладки циклов врезного шлифования сократились в среднем на 40 %. При обеспечении требуемой точности и качества поверхности детали время циклов сократилось в среднем в 1,4 раза. Годовой экономический эффект от внедрения нормативов - 108 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Иоголевич В. А. Изменение сил резания в процессе шлифования. // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. - Барнаул: АПИ, 1985. - С. 80 - 83.

2. Иоголевич В. А., Сурков И. В. Использование микропроцессорной техники в системах автоматизированного контроля. // Внедрение микропроцессорных средств в машиностроении: Тезисы докладов научно-методического семинара. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С. 30 - 31.

3. Иоголевич В. А. Исследование роботизированного круглошлифовального модуля на базе серийного оборудования. // Областная научно-практическая конференция: Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии: Тезисы докладов и сообщений. - Челябинск: Изд-во "Челябинский рабочий", 1986. - С. 34.

4. Иоголевич В. А., Сурков И. В. Методика расчета циклов круглого наружного шлифования на стадии подготовки управляющих программ // Тезисы докладов II Всесоюзного семинара "Роботы и гибкие

ты и гибкие производственные системы". - М.: Институт проблем управления, 1988. - С. 132 - 133.

5. Иоголевич В. А. Расчет постоянной времени процесса резания для назначения режимов обработки на круглошлифовальные операции // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С. 23 - 24.

6. Иоголевич В. А. Расчет сил резания при шлифовании торцов на круглошлифовальных станках. // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Темат. сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1986. - С. 77 - 79.

7. Иоголевич В. А., Сурков И. В. Расширение технологических возможностей станков с ЧПУ // Автоматизация контроля в РПС: Тезисы докладов семинара. - М.: ЦНИИ ИТЭИ, 1989. - С. 11 - 12.

8. Иоголевич В. А. Учет динамических характеристик технологической системы и процесса резания при расчете циклов для круглошлифовальных станков с ЧПУ // Опыт технологической подготовки производства и эксплуатации станков с ЧПУ: Тезисы докладов. - Свердловск: Изд-во объединения "Полиграфист", 1986. - С. 12 - 14.

9. Кулыгин В. Л., Иоголевич В. А. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей шлифования реальному процессу // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С. 22 - 23.

10. Переверзев П. П., Кулыгин В. Л., Ивашинников А. В., Исаков В. М., Беляков А. Л., Иоголевич В. А. Описание методики и математических моделей оптимизация режимов резания для операций, выполняемых в автоматическом цикле на круглошлифовальных станках. // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. - Барнаул: АПИ, 1987. - С. 103 - 109.

Иоголевич

Подписано к печати 12.03.92. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1.

Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 55/158.

УОП ЧГТУ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.