

05.02.08
П27

КОНТРОЛЬНЫЙ
ЭКЗЕМПЛЯР

На правах рукописи

Переврзев Павел Петрович

**ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ
С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.02.08 – "Технология машиностроения"

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Челябвск
1999**

Научный
читальный зал

Работа выполнена на кафедре "Технология, бизнес и компьютерное управление машиностроительного производства" Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск).

Научный консультант — заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор С.Н.КОРЧАК.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Л.В.ХУДОБИН;

заслуженный машиностроитель РФ, доктор технических наук, профессор В.П.ПОНОМАРЕВ;

доктор технических наук, профессор В.А.АКСЕНОВ.

Ведущее предприятие — Центральное бюро нормативов по труду при Российском центре производительности Министерства труда Российской Федерации (г.Москва).

Защита состоится 22 июня 1999 года, в 11 часов, на заседании диссертационного совета Д 053.13.05 в Южно - Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан "___" _____ 1999 г.

Ученый секретарь специализированного совета,

доктор экономических наук, профессор

 И.А.Баев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. С повышением точности машины и их деталей, а также точности заготовок, доля шлифовальных станков в общем станочном парке машиностроительных предприятий постоянно возрастает и в настоящее время достигает, например, на автомобильных заводах западных стран 80%. Из всего шлифовального оборудования половину станков составляют круглошлифовальные станки.

подавляющее большинство специальных круглошлифовальных станков с цикловым и числовым программным управлением работают в автоматическом цикле с применением приборов активного контроля. Эти станки имеют широкие технологические возможности: большой диапазон скоростей подачи, мощный привод, высокую жесткость и геометрическую точность.

Анализ использования на заводах круглошлифовальных станков с программным управлением показал, что их возможности по производительности используются только на 50...70% и их производительность зачастую ниже, чем на станках с ручным управлением подачи, хотя стоимость станков с программным управлением выше. Основная причина такого положения кроется в отсутствии нормативной базы режимов резания для шлифовальных станков с программным управлением, что связано с отсутствием теории и методик, решающих задачу расчета высокопроизводительных циклов шлифования (управляемых путем ступенчатого изменения программной скорости подачи по командам прибора активного контроля), обеспечивающих требуемую чертежом детали точность и качество обрабатываемой поверхности. Существующие нормативы режимов резания предназначены для станков с ручным управлением и содержат среднюю за цикл обработки скорость подачи, по которой производится расчет основного времени.

Управляющая программа скоростью подачи на станках с программным управлением подбирается в производстве экспериментально или устанавливается в соответствии с обработкой аналогичных деталей. Такой подход требует больших материальных затрат и растянут по времени, поскольку необходимо провести пробную обработку заготовок при различных сочетаниях численных значений программной скорости подачи на каждой ступени цикла и различном распределении припуска по ступеням цикла.

Так как часто обработка заготовок ведется сравнительно небольшими, часто меняющимися партиями, то применение экспериментального метода подбора управляющей программы ограничено или просто невозможно. Поэтому, для гарантированного обеспечения чертежных требований обрабатываемой поверхности, назначается цикл шлифования с заведомо заниженным уровнем программных скоростей подачи. В результате управление

00000
0103

Южно-Уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

производительностью и точностью обработки зависит от опыта и добросовестности рабочего, поскольку технолог лишен нормативно-справочных данных о требуемом распределении припуска и значению программных скоростей подач на каждой ступени цикла для заданных условий шлифования.

Учитывая высокую распространенность операций, выполняемых на круглошлифовальных станках с программным управлением, вопросы разработки теории оптимизации многоступенчатых циклов шлифования, превращают задачу в **НАУЧНУЮ ПРОБЛЕМУ**, решение которой позволит создать новую нормативно-справочную базу режимов резания и поднять производительность станков с программным управлением до проектного уровня. Данная работа выполнялась в соответствии с программой Государственного Комитета по Науке и Технике СССР на 1986-1990 годы в рамках решения научно-технической проблемы 0.76.01. "Разработать и внедрить систему методических и нормативных материалов, типовых решений по научной организации труда, обеспечивающих эффективное использование техники и трудовых ресурсов" по заданию: 08.01.А.: "Разработать и внедрить методические рекомендации по расчету норм времени на ЭВМ в едином цикле с автоматизированным проектированием технологических процессов".

Цель работы. Разработать теорию и методику расчета производительности обработки деталей разной точности на основе моделирования взаимосвязи оптимальных режимов резания с получаемой точностью и другими показателями качества и создание новой информационной справочной базы расчетного проектирования автоматических циклов круглого шлифования.

Научная новизна. Разработаны теоретические зависимости между режимами наибольшей производительности автоматических циклов шлифования, точностью заготовок, требуемой точностью обработки и другими показателями качества (шероховатостью, прижогами), с учетом точности и жесткости элементов технологической системы (станок, деталь). Моделирование производительности базируется на закономерностях изменения силовой нагрузки технологической системы при изменении геометрических параметров зоны контакта круга с заготовкой (размеры детали, круга и пр.) в зависимости от режимов резания. Моделирование сил резания выполнено на основе теории пластичности и охватывает практически все факторы, влияющие на изменение сил. Оптимизация управляющих параметров цикла шлифования выполнена на основе метода динамического программирования, с применением новой методики одновременного учета четырех технологических ограничений производительности (точности, шероховатости, бесприжоговости и

неосыпаемости кругов разных характеристик) и существенного сокращения вариантов перебора. Рассчитан справочно-нормативный массив оптимальных (по минимальному времени) автоматических многоступенчатых циклов шлифования для станков с программным управлением в широком диапазоне изменения технологических условий обработки (марки сталей, характеристики кругов, размеры обработки, станки разной точности и жесткости и пр.).

Практическая ценность. Использование новой расчетной методики позволило разработать справочную базу для систем автоматизированного проектирования циклов шлифования, существенно повышающую эффективность использования станков с программным управлением. Разработаны, прошли промышленную апробацию на 30 заводах, защищены на Ученом Совете Госкомтруда СССР и изданы "Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением". Часть II Нормативы режимов резания. - М.: Экономика, 1990, с. 261-298. В этих нормативах впервые решена задача расчетного определения обоснованного минимального основного времени цикла обработки для операций круглого врезного шлифования, выполняемых на станках с программным управлением. В нормативах рассчитаны карты для определения программных скоростей подачи и распределение припуска по ступеням цикла в зависимости от точности заготовок, требуемой шероховатости, глубины дефектного слоя, а также от ряда других технологических ограничений производительности: податливости технологической системы, точности станков и т.д..

В соответствии с заданием программы ГКНТ СССР (этап Т2Н: "Разработать базовый программно-методический комплекс автоматизации нормирования технологических процессов механообработки резанием") разработана автоматизированная система проектирования и нормирования операций, выполняемых на круглошлифовальных станках с программным управлением.

Обсуждение работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на международных, всесоюзных, республиканских и региональных научно-технических конференциях (НТК) и семинарах (НТС), в том числе на: региональном НТС "Эффективность применения общемашиностроительной автоматизированной системы технического нормирования операций абразивной обработки", Челябинск, 1985 г.; Всесоюзной НТК "Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении", Полтава, 1979 г.; региональной НТС "Опыт и пути совершенствования методов чистовой обработки в машиностроении", Ленинград, 1984 г.; региональном НТС "Повышение качества абразивного инструмента и эффективности зачистки

проката, отливок, поковок", Челябинск, 1977 г.; региональном НТС "Прогрессивные методы шлифования", Челябинск, 1976 г.; региональном НТС "Современный абразивный инструмент и методы повышения эффективности процессов шлифования", Челябинск, 1980 г.; Всесоюзном НТС "Создание шлифовального оборудования с ЧПУ", Одесса, 1982 г.; региональном НТС "Механика и технология машиностроения", Уральское отделение Академии наук России, Свердловск, 1990 г.; республиканской НТК "Пути повышения технологического уровня и конкурентоспособности металлорежущих станков с ЧПУ", Каунас, 1983 г.; региональной НТК "Проблемы автоматизированного проектирования и управления обработкой на металлорежущих станках", Челябинск, 1988 г.; региональном НТС "Управление точностью и качеством обработки в общемашиностроительных нормативах режимов резания и нормах времени для металлорежущих станков, в том числе для станков с ЧПУ", Челябинск, 1988 г.; Всесоюзном НТС "Новое в абразивной обработке труднообрабатываемых материалов", Киев, 1976 г.; Всесоюзном НТС "Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении", Челябинск, 1978 г.; региональной НТК "Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и гибких производственных систем", Челябинск, 1988 г.; региональном НТС "Пути повышения производительности и качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала", Свердловск, 1984 г.; научно-технических советах Центрального бюро нормативов по труду Госкомтруда СССР, Москва, 1985-1991 гг.; международной НТК "I Международная специализированная выставка "Машиностроение"; Челябинск, 1997г; международной НТК "II Международная специализированная выставка "Машиностроение", Челябинск, 1998г.

Завершенная работа обсуждена и одобрена на совместном совещании кафедр "Технология, бизнес и компьютерное управление машиностроительных производств" и "Оборудование и инструмент компьютеризированного производства" Южно- Уральского государственного университета.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 42 публикациях и в 3 отчетах по НИР.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и четырех приложений, содержащих статистическую обработку экспериментов, документы о внедрении результатов исследований в производство. Работа содержит 293 страниц машинописного текста, включая 84 рисунка, списка литературы из 201 наименования литературы, 5 таблиц и приложение на 31 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научно-технической проблемы, в краткой форме изложена научная новизна, практическая значимость работы и перечень решенных в диссертации задач.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Большой вклад в решение вопросов формирования цикла обработки, а также установления количественного влияния на производительность операции различных технологических факторов, внесли исследования Балакшина Б.С., Базрова Б.М., Лурье Г.Б., Новикова В.Ю., Михелькевича В.Н., Корчака С.Н., Худобина В.Л., Волосова С.С., Ящерицина П.И., Королева А.В. и многих других ученых.

Учеными, работающими в области абразивной обработки, подчеркивалась важность и актуальность решения задачи проектирования циклов шлифования и даже сформулирована постановка задачи оптимизации цикла. В ряде работ сформулирован комплекс технологических ограничений производительности операции, к важнейшим из которых относятся точность размера и качество поверхностного слоя обрабатываемой поверхности заготовки (шероховатость, прижог и др.), диапазоны допустимого варьирования управляющих параметров (программная скорость подачи, частота вращения заготовки, скорость крута, количество ступеней цикла, распределение припуска по ступеням цикла), износостойкость шлифовального крута. Некоторые исследования в области шлифования сделаны во имя решения задачи оптимизации цикла шлифования. Разработанные модели имеют узкий диапазон применения, т.к. моделирование производительности операции произведено на основе частных, узкодиапазонных эмпирических моделей, которые не перекрывают требуемых практикой диапазонов варьирования многих, одновременно действующих технологических параметров. Кроме того, разработанные методики не учитывают ограничение производительности операции по требуемой точности обработки, которая является основным фактором, определяющим ее уровень.

Поскольку в основе управления производительностью цикла обработки лежат силовые ограничения скоростей подач на каждой ступени цикла, то для практического управления циклом и его проектирования необходимы расчетные зависимости между силами резания и скоростями подач. В работах Глейзера Л.А., Маслова Е.Н., Евсеева Д.Г., Сальникова А.Н., Филимонова Л.Н. Королева

А.В., Корчака С.Н., Новоселова Ю.К. сделаны первые шаги в создании аналитических моделей сил резания, основанных на описании с той или иной степенью приближения физики процесса резания, как единичным зерном, так и кругом в целом.

До сих пор не имеет решения заключительный этап задачи оптимизации цикла, состоящий в разработке самой методики оптимизации цикла шлифования с установлением численной взаимосвязи режимов резания (программная скорость подачи и снимаемая часть припуска на каждой ступени цикла), с технологическими ограничениями производительности операции связанных с исходной точностью заготовки и конечной точностью детали, параметрами дефектного слоя обрабатываемой поверхности, жесткостью станка и характеристикой круга.

На основе анализа результатов обзора литературы была поставлена цель и сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработать теоретические модели составляющих силы резания на базе использования закономерностей механики с учетом основных факторов влияющих на силу в любом диапазоне их варьирования.
2. Разработать математические модели управления производительностью цикла с учетом силовых ограничений по : точности обработки, шероховатости, бесприжоговости и неосыпаемости круга.
3. Разработать методику оптимизации циклов шлифования с одновременным учетом комплекса основных технологических ограничений.
4. Создать автоматизированную систему проектирования автоматических циклов шлифования.
5. Разработать табличные нормативы режимов резания для безмашинного проектирования автоматических циклов шлифования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ С РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Ограничение производительности процесса шлифования основаны на учете численных значений различных составляющих сил резания. Так точность обработки (упругие деформации в технологической системе), шероховатость и осыпаемость круга зависят от радиальной составляющей силы резания P_y , а бесприжоговость - от тангенциальной составляющей P_z . Рассмотрим методику моделирования составляющих сил резания на примере P_y .

Процессы пластической деформации металла при резании, так же, как и при ковке, штамповке, прокатке, могут быть описаны закономерностями теории больших пластических деформаций. С использованием этих закономерностей, а

так же исходя из равенства работ активных и реактивных сил (силы резания и силы сопротивления пластической деформации в процессе резания), С.Н.Корчаком предложена следующая плоская модель (1) радиальной составляющей силы резания единичным зерном шлифовального круга :

$$P_{y_j} = 2,8 \frac{a_s \sigma_i}{\sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta + \frac{\sigma_i}{3} l_3, \quad (1)$$

где P_{y_j} – радиальная составляющая силы резания на единицу ширины режущей кромки единичного зерна; a_s – глубина резания единичным зерном; l_3 – длина площадки затупления единичного зерна; σ_i – интенсивность напряжений (параметр, наиболее полно характеризующий напряженное состояние во всей напряженной зоне резания, и который используется в теории больших пластических деформаций для характеристики сложнапряженного состояния металла); β_1 – угол сдвига; β – угол между равнодействующей силы резания, приходящаяся на единицу длины режущей кромки острого единичного зерна, и направлением окружной скорости вращения круга V_k .

С учетом ширины среза b_j , формула (1) преобразуется в силу резания $P_{y_b_j}$ единичным зерном для объемной схемы резания:

$$P_{y_b_j} = P_{y_j} b_j = 2,8 \frac{a_s \sigma_i}{\sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta b_j + \frac{\sigma_i}{3} l_3 b_j. \quad (2)$$

В реальном процессе шлифования, в зоне контакта круга с заготовкой, резание металла производится одновременно несколькими зёрнами. Тогда радиальную составляющую силы резания P_y при шлифовании кругом в целом выразим в следующем виде

$$P_y = P_{y_b_j} N_{BL}, \quad (3)$$

где N_{BL} – количество режущих зерен, находящихся в данный момент времени на всей площади зоны контакта $B L$ круга с заготовкой (где B – ширина рабочей поверхности круга; L – длина дуги контакта круга с заготовкой).

В свою очередь, количество режущих зерен N_{BL} функционально связано с рецептурными параметрами характеристики круга по следующей зависимости

$$N_{BL} = \frac{W_3 W_C k_Y B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2}, \quad (4)$$

где W_3 – относительное объемное содержание зерен в круге; W_C – относительное объемное содержание связки в круге; d_3 – средний размер зерен в круге; k_Y – коэффициент, изменяющийся в зависимости от разных условий шлифования.

Тогда сила резания, после подстановки (2) и (4) в формулу (3), преобразуется к виду

$$P_y = 2,8 \frac{a_s \sigma_1}{\sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta \ b_j \left(\frac{W_3 W_{ck} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} + \frac{\sigma_1}{3} \ell_3 b_j \right) \frac{W_3 W_{ck} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} \quad (5)$$

Эта зависимость выражает физическую связь силы резания с глубиной резания единичными зернами круга через действительное сопротивление σ_1 сталей пластическим деформациям в условиях шлифования (где σ_1 — функция степени деформации, скорости деформации и температуры срезаемого слоя).

С другой (чисто геометрической) стороны глубина резания зернами круга зависит от кинематических характеристик конкретной операции шлифования, а именно: диаметра круга и детали, подачи на оборот детали, скоростей круга и детали. Для того, чтобы связать силовую и кинематическую характеристику процесса шлифования, подставим в уравнение (5) вместо текущей глубины среза a_s , геометрическую глубину среза a_k , полученную Е.Н.Масловым из кинематических условий резания единичным зерном в виде

$$a_k = \frac{2 V_d \sqrt{\Delta t_\Phi}}{60 V_{к\text{м}D}} \sqrt{\frac{D+d}{D d}}, \quad (6)$$

где Δt_Φ — подача на оборот заготовки; $V_{к\text{м}}$ — окружная скорость вращения круга; V_d — окружная скорость вращения заготовки; m_D — число зерен на единицу длины круга; d — диаметр заготовки; D — диаметр рабочей поверхности круга.

Применение формулы (6) правомочно при условии равенства объема металла $W_{об}$, снимаемого за время одного оборота Δt_1 заготовки совокупностью единичных зерен под действием силы резания при окружной скорости круга $V_{к\text{м}}$ и заготовки V_d , и, такого же объема металла, снимаемого шлифовальным кругом, выраженного через фактическую подачу Δt_Φ при шлифовании заготовки определенного диаметра d и ширины поверхности B , т.е. снимаемого объема "втулки" ($d B \Delta t_\Phi$) с толщиной стенки Δt_Φ . Тогда расчетная зависимость радиальной составляющей силы резания, выразится в следующем виде:

$$P_y = 2,8 \frac{\sigma_1 b_j}{\sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta \ \frac{2 V_d \sqrt{\Delta t_\Phi}}{60 V_{к\text{м}D}} \sqrt{\frac{D+d}{D d}} \cdot \frac{W_3 W_{ck} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} + \frac{\sigma_1}{3} \ell_3 b_j \frac{W_3 W_{ck} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} \quad (7)$$

По формуле (7) производится расчет радиальной составляющей силы резания для конкретной операции круглого шлифования с радиальной подачей в зависимости от режимов резания, характеристики круга, физико-механических свойств обрабатываемого металла и геометрии зоны контакта круга с заготовкой, зависящей от диаметров детали, круга и длины шлифуемой шейки вала.

Поскольку наладка станков по режимам резания, указанным в нормативах, должна обеспечивать обработку детали с выполнением требуемых ограничений по точности, прижогу, неосыпаемости круга, то желательно привести формулу (7) к виду, где сила зависит от настроечных параметров станка. Это возможно за счет некоторого упрощения формул с заменой трудноопределимых параметров (J_3 , b_j и др.) на настроечные параметры станка.

За время одного оборота заготовки Δt_i под действием силы резания будет снят кругом объем металла W_{OB} , т.е.

$$W_{OB} = \frac{a_s \sigma_i}{\sin \beta_1} \cdot \frac{W_3 W_{CK} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} V_K \Delta t_i \quad (8)$$

С другой стороны, кинематический объем металла W_{OB} , снимаемый шлифовальным кругом с заготовки за время Δt_i , равен

$$W_{OB} = \pi d B \Delta t_i \quad (9)$$

Используя равенство уравнений (8) и (9), и выражая время Δt_i через частоту вращения заготовки n_d в виде $\Delta t_i = 1/n_d$, получим выражение, позволяющее выразить первое слагаемое формулы (7) через настроечные параметры станка:

$$\frac{a_s \sigma_i}{\sin \beta_1} \cdot \frac{W_3 W_{CK} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} = \frac{V_d B \Delta t_i}{V_K} \quad (10)$$

Во втором слагаемом формулы (7) находится фактическая площадь F контакта круга (по площадкам затупления зерен) с заготовкой в процессе шлифования, равная

$$F = \ell_3 b_j \cdot \frac{W_3 W_{CK} \gamma B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} \quad (11)$$

Взаимосвязь площади F с геометрическими параметрами зоны контакта можно установить по следующей формуле:

$$F = \eta B L \quad (12)$$

где η - относительная степень затупления шлифовального круга, равная отношению суммарной площади площадок затупления всех зерен круга, находящихся на его рабочей поверхности, к геометрической площади всей рабочей поверхности круга, т.е. величина η определяет относительную опорную поверхность круга по площадкам затупления зерен, которая зависит от характеристики круга и степени износа зерен.

Из равенства формул (11) и (12) получим следующее выражение, позволяющее упростить второе слагаемое формулы (7):

$$\ell_3 b_1 \frac{W_3 W_{CKY} B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} = \eta B L,$$

или, раскрывая значение длины дуги контакта L по формуле Е.Н. Маслова, получим

$$\ell_3 b_1 \frac{W_3 W_{CKY} B L}{(1 - W_3 - W_C) d_3^2} = \eta B \sqrt{\frac{d D \Delta t_\Phi}{D + d}}. \quad (13)$$

После подстановки уравнения (10) в первое слагаемое формулы (7), и подстановки уравнения (13) во второе слагаемое формулы (7), и некоторых упрощений, получена модель радиальной составляющей силы резания, выраженная через настроечные параметры станка (применительно к настройке любой конкретной операции):

$$P_y = 1,9 \sigma_i \frac{V_D B \Delta t_\Phi}{V_K} + \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D \Delta t_\Phi}{D + d}}. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет производить расчет радиальной составляющей силы резания при известных значениях фактической подачи и других технологических параметров. Первое слагаемое уравнений физически определяет величину составляющей силы резания идущей только на срез металла (т.е. только на пластическую деформацию металла в зоне сдвига) кругом, у которого зерна не имеют площадок затупления на задней поверхности. Второе слагаемое уравнений определяет величину составляющей силы резания, идущей на преодоление силы трения, дополнительно возникающей при наличии площадок затупления на режущих вершинах зерен круга.

Сила P_y может быть выражена и через фактическую скорость минутной подачи S_Φ , при $\Delta t_\Phi = S_\Phi \Delta t = S_\Phi / n_d$. С использованием этой связи, фактическая скорость подачи из формулы (14) выражается в следующем виде:

$$S_\Phi = \frac{\left(-\eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{n_d(d+D)}} + \sqrt{\left(\eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{n_d(d+D)}} \right)^2 + 4n_d B \frac{1,9\sigma_i P_y}{V_K}} \right)^2}{2\pi d B \frac{1,9\sigma_i}{V_K}}. \quad (15)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

По точности обработки. Поскольку текущая погрешность обработки наследственно зависит от исходного биения заготовки (при этом точность настроечного диаметра, которым является минимальный диаметр, контролируется прибором активного контроля), то получение заданной точности обработки (радиального биения, не превышающего допуска на диаметр) ограничивается, как величиной силы резания, так и амплитудой ее колебания, т.к. при одном и том же максимальном значении силы резания и разных амплитудах ее колебания будет разная погрешность обработки. Причем, чем больше погрешность, тем больше амплитуда колебания P_y . Соответственно, в течение цикла шлифования необходимо ограничивать не только максимальное значение фактической скорости подачи (и силу P_y), но и амплитуду ее колебания $\Delta S_{\phi i}$ (и колебание силы ΔP_y).

Основываясь на взаимосвязи упругих перемещений технологической системы, с ее жесткостью и действующей силовой нагрузкой, полученной А.П.Соколовским и Б.С.Балакшиным, установлена функциональная взаимосвязь между фактической и программной подачей на каждом радиусе обрабатываемой заготовки, через упругие перемещения технологической системы (рис. 1), в зависимости от силы резания и податливости технологической системы:

$$S_{пз} \Delta \tau_i + \gamma P_{y_{k,i-1}} = \gamma P_{y_{k,i}} + \Delta t \phi_{k,i}, \quad (16)$$

где $P_{y_{k,i}}$ - радиальная составляющая силы резания при съеме металла с k -го радиуса заготовки на i -том обороте заготовки; $P_{y_{k,i-1}}$ радиальная составляющая силы резания при съеме металла с k -го радиуса заготовки на предыдущем ($i-1$) обороте заготовки; $\Delta t \phi_{k,i}$ - фактическая подача на k -ом радиусе заготовки при i -ом обороте; $S_{пз}$ - программная скорость подачи на z -той ступени цикла; γ - податливость технологической системы.

При выполнении конкретной операции, многие параметры сохраняют свои значения практически постоянными (диаметр и ширина заготовки, физико-механические свойства обрабатываемого материала, окружная скорость вращения круга и т.д.). Поэтому выразим их через коэффициенты K_1 и K_2 , равные

$$K_1 = 1,9 \sigma_i + \frac{\pi B d}{V_K}; \quad K_2 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} + \sqrt{\frac{d D}{D + d}}$$

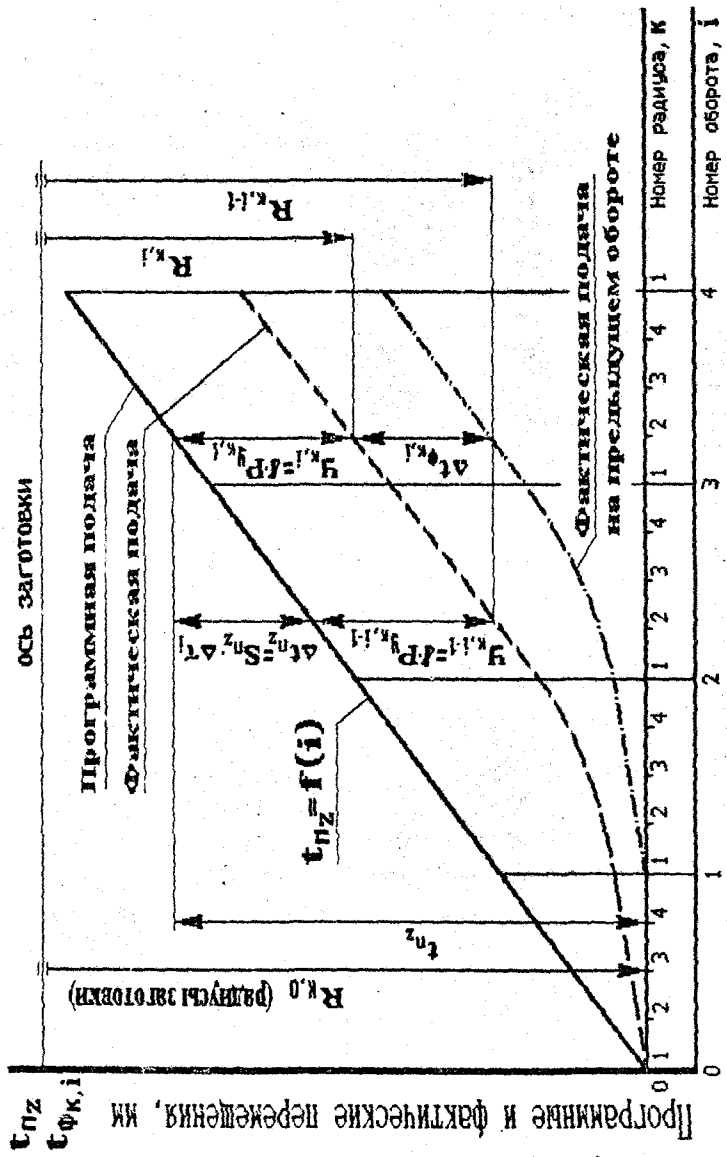


Рис. 1. Расчетная схема взаимосвязи радиусов заготовки с подачами и перемещениями

Из совместного решения уравнений (16) и (14), а также использования коэффициентов K_1 и K_2 получена модель текущего значения фактической скорости подачи $S_{\phi_{k,i}}$ при управлении программной скоростью подачи $S_{\Pi z}$:

$$S_{\phi_{k,i}} = \left\{ \frac{-\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} + \sqrt{\left(\frac{\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} \right)^2 + \frac{S_{\Pi z} \Delta\tau_i + \gamma K_1 S_{\phi_{k,i-1}} + \gamma K_2 \sqrt{S_{\phi_{k,i-1}}}}{\Delta\tau_i + \gamma K_1}} \right\}^2 \quad (17)$$

Текущее значение радиуса обрабатываемой поверхности $R_{k,i}$ и время цикла $\tau_{ц}$ рассчитываются по формулам:

$$R_{k,i} = R_{k,i-1} - \Delta t \phi_{k,i}; \quad (18)$$

$$\tau_{ц} = \sum_1^i \Delta\tau_i.$$

При шлифовании некруглой заготовки (рис. 2), имеющей исходное радиальное биение ΔR , равное

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min}, \quad (19)$$

где R_{\max} , R_{\min} - соответственно, начальные значения максимального и минимального радиусов обрабатываемой поверхности заготовки, фактическая скорость подачи соответственно изменяется от максимального S_{\max} до минимального S_{\min} значения. Расчет этих подач, с учетом формулы (17), производится по формулам (20) и (21), учитывающих точность заготовки через R_{\max} и R_{\min} , т.е.

$$S_{\max} = \left\{ \frac{-\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} + \sqrt{\left(\frac{\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} \right)^2 + \frac{t_{\Pi z} - R_{\max} + R_{s_{k,i-1}}}{\Delta\tau_i + \gamma K_1}} \right\}^2; \quad (20)$$

$$S_{\min} = \left\{ \frac{-\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} + \sqrt{\left(\frac{\gamma K_2}{2(\Delta\tau_i + \gamma K_1)} \right)^2 + \frac{t_{\Pi z} - R_{\min} + R_{v_{k,i-1}}}{\Delta\tau_i + \gamma K_1}} \right\}^2; \quad (21)$$

где $t_{\Pi z}$ - текущее значение программной подачи; $R_{s_{k,i-1}}$, $R_{v_{k,i-1}}$ - текущее значение максимального и минимального радиусов.

Радиальное биение δ_p выражается через колебание силы резания $\Delta P_{y_{\max}}$ и колебание упругих деформаций ΔY_{\max} в виде:

$$\delta_p = \Delta Y_{\max} = \Delta P_{y_{\max}};$$

или, через предельные значения силы резания $P_{y_{\max}}$ и $P_{y_{\min}}$ (при $\Delta P_{y_{\max}} = P_{y_{\max}} - P_{y_{\min}}$) и соответствующие предельные значения фактической скорости подачи S_{\max} и S_{\min} , с учетом формулы (14) и коэффициентов K_1 и K_2 , получим модель

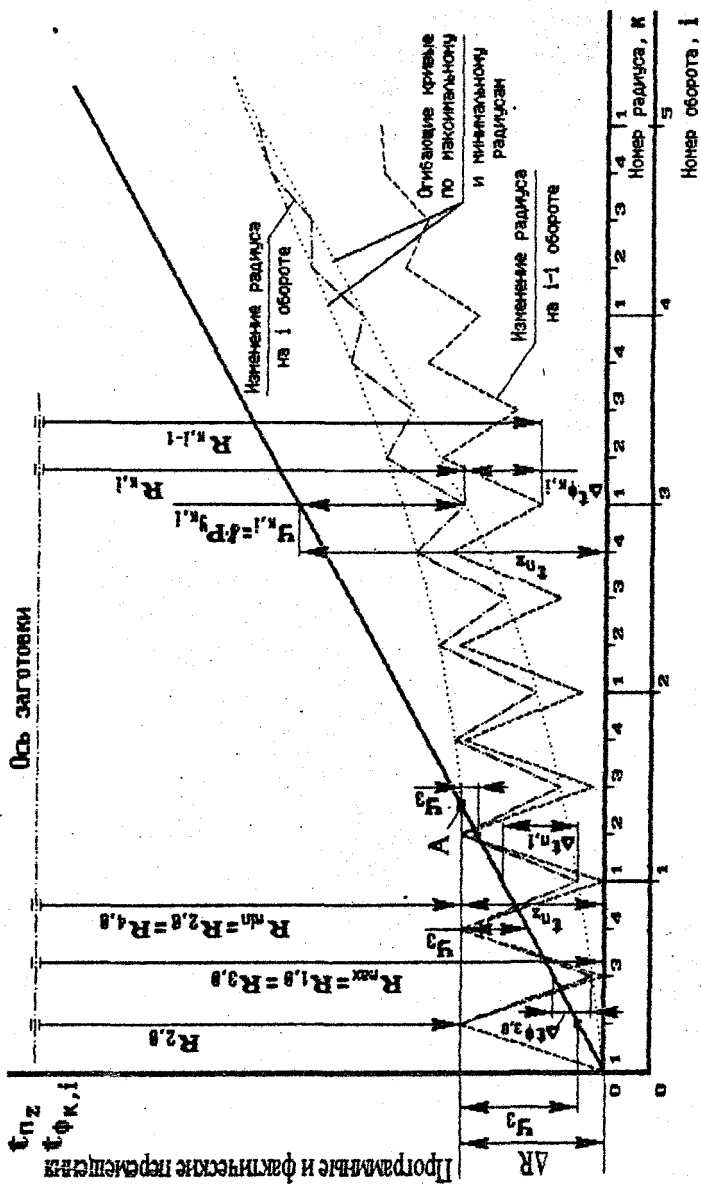


Рис. 2. График съема металла с некруглой заготовки

ограничения колебания фактической скорости подачи по радиальному биению

$$\delta_p = \gamma((K_1 S_{\max} + K_2 \sqrt{S_{\max}}) - (K_1 S_{\min} + K_2 \sqrt{S_{\min}})) \leq [\delta_p] \quad (22)$$

где $[\delta_p]$ - допустимое значение радиального биения обрабатываемой поверхности, которое на чертежах деталей может являться допуском на диаметр шлифования или допусками на форму и расположение поверхностей, если эти допуски составляют часть допуска на диаметр.

По осыпаемости круга. На первой, черновой ступени циклов шлифования, фактическая скорость подачи, и, следовательно, сила резания, достигают наибольших значений. При таких значениях радиальной составляющей силы резания может происходить осыпание (самозатачивание) круга, зависящее от его твердости и величины силы.

При моделировании ограничения по осыпаемости круга предполагается, что требуется ограничить силовую нагрузку P_y на круг до такого уровня, при котором зерна круга работают в режиме затупления с образованием площадки затупления, т.е. без вырывания зерен из связки или разрушения зерен, что характерно для работы круга в режиме самозатачивания. Величина допустимой силы резания $[P_y]$, при которой круг работает в режиме затупления, и, которую нельзя превышать на протяжении всего цикла шлифования заготовки, принимается в ряде работ равной 25% от критической силы $P_{кр}$, при которой происходит самозатачивание круга, т.е.

$$P_y \leq [P_y] = 0,25 P_{кр}$$

Для расчета критической силы самозатачивания, применена методика Умино К. расчета критической силы $f_{кр}$, в соответствии с которой, под действием критической силы в круге может происходить, либо преобладающее разрушение связки (вырывание зерен из связки), либо разрушение абразивных зерен при относительно большом содержании связки, что характерно для кругов высокой твердости:

$$f_{кр} = d_3^2 \sqrt{\frac{2\gamma_3 E_3}{d_3}} \cdot \left(1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{\gamma_c E_c}{\gamma_3 E_3}} + \frac{W_c}{3W_3^{2/3} (1 - \sqrt[3]{W_3})} \right) \right) \quad (23)$$

где γ_c - поверхностная энергия материала связки; E_c - модуль упругости материала связки; γ_3 - поверхностная энергия материала зерен; E_3 - модуль упругости материала зерен.

По формуле (23), критическая сила в зависимости от прочности материала

зерна γ_3 и связки γ_c , а также их объемов в кругах разных характеристик, вызывает хрупкое разрушение (диспергирование), либо преимущественно зерен, либо (чаще) связки.

Когда связка прочнее зерен, то происходит разрушение зерен, а средняя критическая сила f_3 , при которой происходит разрушение зерна, рассчитывается по методу Гриффита по следующей формуле:

$$f_3 = S_3 \sigma_3,$$

при
$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{2\gamma_3 E_3}{d_3}},$$

где f_3 — критическое значение радиальной составляющей силы резания, действующей на одно зерно поверхностного слоя круга в зоне контакта, при которой происходит разрушение зерна; S_3 — площадь поперечного сечения зерна $S_3 = f(d_3)$, при этом $d_3/2$ является длиной начальной трещины; σ_3 — среднее критическое напряжение в толще зерна.

Если прочность связки меньше прочности зерен, происходит разрушение связки и выпадение зерен. В отличие от формулы К.Умико (где для связки также принята величина начальной трещины равной $d_3/2$), в настоящей работе величина начальной трещины связана не с величиной зерна d_3 , а с размером мостика связки D_m , и ее величина определена экспериментально. В результате получены следующие величины средней критической силы f_c , при которой происходит разрушение связки

$$f_c = S_c \sigma_c,$$

при
$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1,7\gamma_3 E_3}{D_m}},$$

где f_c — критическое значение радиальной составляющей силы резания, действующей на одно зерно поверхностного слоя круга в зоне контакта, при которой зерно вырывается из связки из-за разрушения мостика связки; S_c — площадь поперечного сечения мостика связки, которая рассчитывается в зависимости от относительного объемного содержания связки W_c и зерен W_3 , в свою очередь, зависящих от характеристики круга, т.е. $S_c = f(W_c, W_3, d_3)$; D_m — диаметр мостика связки между зёрнами $D_m = f(W_c, W_3, d_3)$, при этом экспериментальное значение длины начальной трещины равно $D_m / 1,7$; σ_c — среднее критическое напряжение в толще мостика связки по границе контакта с зёрнами.

Учет в функции $f_{кр}$ совместного влияния f_3 и f_c проведен тоже по методике, предложенной К. Умино. Сущность методики заключается в том, что строится (рис. 3) область граничных значений критических сил f_3 и f_c в зависимости от объемного содержания связки W_c в круге. Критическая сила f_3 не зависит от W_c и поэтому изображена горизонтальной прямой. Критическая сила f_c выходит из начала координат и изменяется в зависимости от W_c . Эти две зависимости определяют область граничных значений суммарной критической силы $f_{кр}$ самозатачивания круга для обоих случаев осыпания круга. Расположение линий f_3 и f_c зависят от прочности материала зерен и связки, а так же характеристики круга.

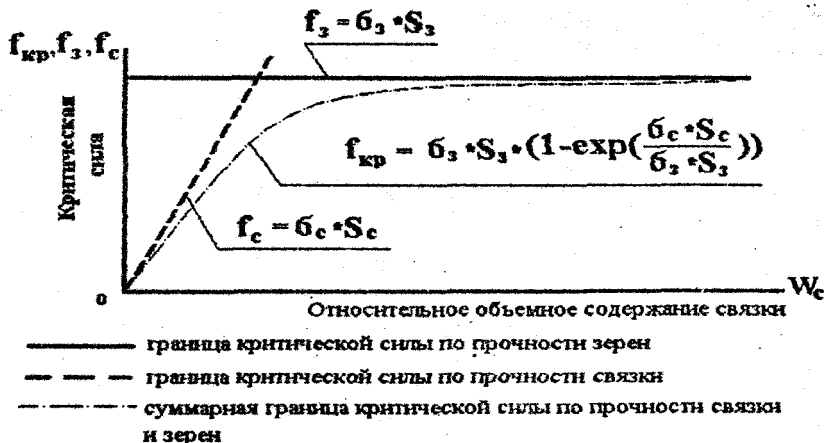


Рис. 3. График критической силы круга, зерен и связки в зависимости от содержания связки в круге

Полученная область граничных значений аппроксимирована экспоненциальной зависимостью силы $f_{кр}$ самозатачивания в следующем виде:

$$f_{кр} = f_3 \left(1 - \exp \left(- \frac{f_c}{f_3} \right) \right). \quad (24)$$

Формула (24), обладая свойствами непрерывной функции, позволяет производить расчет критической силы самозатачивания одновременно для двух случаев осыпания (разрушения) круга:

1. Прочность связки меньше прочности зерен. Осыпание круга происходит в результате вырывания зерен из связки.

2. Связка прочнее зерен. Происходит разрушение зерен, а зона разрушения переходит от границ зерен к самим зернам.

Тогда максимально допустимое значение фактической скорости подачи S_{oc} по осыпаемости круга, выраженное аналогично формуле (15) из формулы радиальной составляющей силы резания, запишем в следующем виде:

$$S_{oc} = \left(\frac{-\eta B \frac{\sigma_1}{3} \sqrt{\frac{dD}{n_d(d+D)}} + \sqrt{\left(\eta B \frac{\sigma_1}{3} \sqrt{\frac{dD}{n_d(d+D)}} \right)^2 + 4\pi d B \frac{1,9\sigma_1}{V_k} [P_y]}{2\pi d B \frac{1,9\sigma_1}{V_k}} \right)^2$$

при $[P_y] = 0,25 i^*_{кр} n_{зп} B L$.

где $n_{зп}$ - среднее количество зерен, расположенных на поверхности круга.

При этом ограничение фактической скорости подачи по осыпаемости круга выразится в виде

$$S_{\phi_{k,i}} \leq S_{oc}$$

По бесприжоговости. В качестве расчетной модели ограничения текущего значения фактической скорости подачи по бесприжоговости обработки, принята теоретическая модель (25), предложенную А.А. Кошиным и А.Л.Беляковым:

$$i^* \operatorname{erfc} \left(\frac{M_4 h_{дс}}{S_{\phi_{k,i}}^{0,25}} \right) = \frac{M_1}{M_2 S_{\phi_{k,i}}^{0,75} + M_3 S_{\phi_{k,i}}^{0,25}} \quad (25)$$

при значениях коэффициентов

$$M_1 = \frac{\lambda U_{пр}}{2\sqrt{\Omega}}; \quad M_2 = \frac{2,8\pi d \sigma_1}{\sqrt{V_d}} \sqrt{\frac{(d+D)n_d}{dD}};$$

$$M_3 = \frac{2,8\mu\eta\sigma_1}{\sqrt{V_d}} \sqrt{\frac{dD}{(d+D)n_d}}; \quad M_4 = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{V_d}{\Omega}} * \sqrt{\frac{(d+D)n_d}{dD}}$$

где $h_{дс}$ - глубина дефектного слоя; λ - коэффициент теплопроводности материала; Ω - коэффициент температуропроводности; μ - коэффициент трения;

$U_{пр}$ - температура начала прижогообразования.

Модель (25) получена на основе решения третьей краевой задачи для линейного уравнения теплопроводности с рядом допущений в теплофизике шлифования.

Поскольку на первых ступенях цикла, фактическая скорость подачи $S_{ф, i}$ достигает максимальных значений, при которых образуется прижог, то ее текущее значение по формуле (25) ограничивается из условия, чтобы глубина дефектного слоя $h_{дс}$ не превысила оставшейся части припуска $\Pi_{ост}$, т.е.

$$h_{дс} \leq \Pi_{ост}$$

Учитывая, что в конце цикла шлифования, величина $S_{ф, i}$ не должна превышать бесприжогового уровня $S_{бпр}$, то должно выполняться условие:

$$S_{ф, k, i} \leq S_{бпр}$$

Значение $S_{бпр}$ так же рассчитывается также из уравнения (25) при глубине прижога равной $h_{дс} = 0$. В этом случае уравнение (25) запишется в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} = \frac{M_1}{M_2 S_{бпр}^{0,75} + M_3 S_{бпр}^{0,25}} \quad (26)$$

Значение $S_{бпр}$, удовлетворяющее равенству (26), соответствует величине бесприжоговой скорости фактической подачи.

Таким образом, при моделировании ограничения по бесприжоговости, учитываются два случая ограничения фактической скорости подачи. На первых ступенях цикла наибольшее значение фактической скорости подачи ограничивается допустимой глубиной прижога $h_{дс} \leq \Pi_{ост}$. В конце цикла шлифования фактическая скорость подачи должна обеспечить бесприжоговую обработку.

По шероховатости. Моделирование ограничения по шероховатости поверхности ведется на последней ступени цикла, а именно в конце цикла "выжигивания" по зависимостям, связывающим показатели шероховатости с фактической скоростью подачи.

Расчет ограничения фактической подачи по шероховатости обрабатываемой поверхности ведется по принципу: расчетная шероховатость R_a , в конце цикла шлифования не должна превышать заданное значение по чертежу $[Ra]$, т.е. $R_a \leq [Ra]$.

В качестве расчетной использована следующая теоретическая модель шероховатости В.М.Исакова:

$$Ra \leq 0,2 \left(\frac{d_3}{\operatorname{tg} \varphi} \sqrt{\frac{\Delta}{4N_z}} \left(\sqrt{\eta + \frac{\pi^2}{V_k} \sqrt{\frac{d(d+D)n_d S_{\Phi_{k,i}}}{D}}} - \sqrt{\eta} \right) \right)^{2/3}$$

где φ — средний угол при вершине зерен круга; Δ — уровень скалывания зерен при правке круга; N_z — номер структуры круга, который определяется через W_3 по формуле $N_z = 0,5 (62 - 100 W_3)$.

Полученная в конце цикла фактическая скорость подачи $S_{\Phi_{k,i}}$ должна обеспечивать требуемую величину шероховатости $[Ra]$.

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

На протяжении цикла шлифования текущее значение фактической скорости подачи ограничивается комплексом технологических ограничений. Границы областей этих ограничений для деталей с различными чертежными требованиями могут иметь самое разнообразное взаиморасположение (рис. 4). При этом каждое ограничение фактической скорости подачи проявляется на разных частях снимаемого припуска. На рис. 4 в координатах "скорость подачи - припуск" на примере трехступенчатого цикла шлифования приведена типовая схема области допустимых значений фактической скорости подачи S_{Φ} , построенная по комплексу технологических ограничений. На первой ступени цикла при снятии части припуска равной Π_1 , фактическая скорость подачи S_{Φ} ограничивается точностью обработки. Соответственно, на второй и третьей ступени величина S_{Φ} ограничивается по шероховатости. Представленная на рис. 4 траектория фактических скоростей подач формируется величинами ступенчато изменяющихся программных скоростей подач (Sp_1 , Sp_2 и Sp_3), которые рассчитываются и обеспечивают фактические скорости подач на протяжении всего цикла в области допустимых ограничений.

Таким образом, ступенчатый график изменения программной скорости подачи в зависимости от оставшейся части припуска представляет собой управляющую программу, по которой настраивается станок на заданный цикл шлифования. Цикл шлифования начинается при максимальном значении снимаемого припуска Π_{\max} . Заканчивается цикл по команде прибора активного контроля, когда оставшаяся часть припуска равна нулю, т.е. после съема последней части припуска Π_3 .

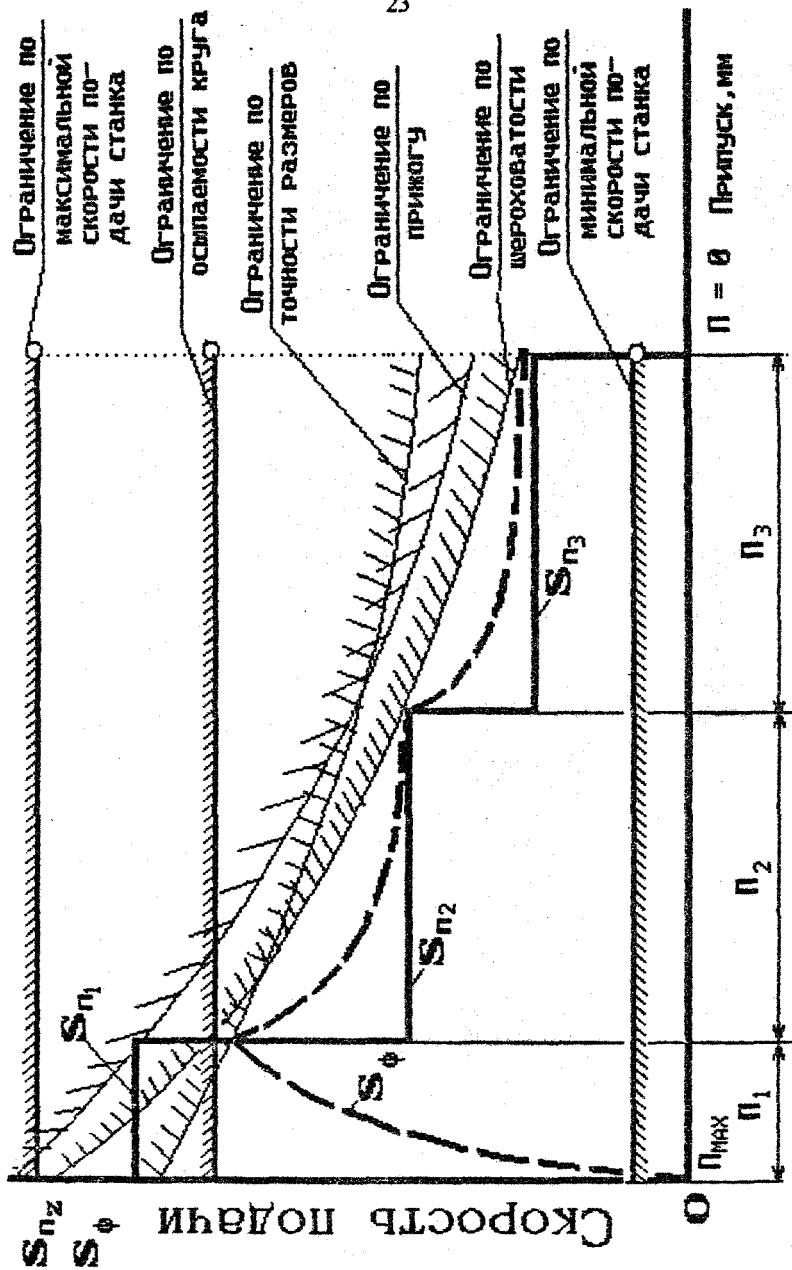


Рис. 4. Область допустимых значений фактических скоростей подачи трехступенчатого цикла круглого врезного шлифования

При проектировании цикла шлифования необходимо стремиться к тому, чтобы на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактической скорости подачи было максимально допустимым, тем или иным ограничением, на протяжении всего пути снятия припуска. Для этого необходимо правильно управлять траекторией фактической скорости подачи на протяжении всего цикла шлифования, с учетом одновременного действия комплекса ограничений. Управление этой траекторией осуществляется путем ступенчатого переключения программной скорости подачи. Количество ступеней цикла определяется типом используемого на практике прибора активного контроля. Чем больше команд переключения скоростей подач имеет прибор активного контроля, тем ближе к теоретическому закону изменения фактической скорости подачи (внутреннему контуру области ограничений) будет располагаться траектория фактической скорости подачи и тем меньше будет основное время цикла обработки. Отсюда следует, что бесступенчатые циклы, (т.е. циклы, с плавным изменением программной скорости подачи) потенциально могут обеспечить полное совпадение траектории фактической скорости подачи с границей области допустимых значений, и, тем самым достичь теоретического предела производительности цикла. Поскольку современные конструкции приборов активного контроля позволяют проводить настройку только 1-5 ступенчатых циклов, то наибольшая производительность циклов шлифования будет заведомо меньше теоретически возможного предела.

Расчет численных значений управляющих параметров цикла, к которым относится сочетание численных значений программной скорости подачи S_{pz} и снимаемой части припуска P_z для каждой ступени цикла, является многовариантной задачей. Решение этой задачи, из-за большого количества вариантов возможных сочетаний управляющих параметров цикла, требует применение математических методов оптимизации.

По своей постановке задача расчета параметров цикла шлифования носит оптимизационный характер и может быть решена методами теории оптимального управления.

В качестве целевой функции принято время цикла шлифования, в течение которого производится резание металла. Целевая функция сводит задачу оптимизации цикла шлифования к задаче оптимизации по быстродействию. Задача оптимизации цикла в этом случае формулируется следующим образом (по Г.Б.Лурье): "Найти такое сочетание управляющих параметров циклом обработки, при котором обрабатываемая поверхность детали переходит из исходного состояния в конечное за минимальное время".

Поиск минимума целевой функции производится с учетом действия следующих ограничений:

1. Ограничение по точности обработки.
2. Ограничение по неприжоговости обработки.
3. Ограничение по шероховатости обрабатываемой поверхности.
4. Ограничение по осыпаемости круга.
5. Ограничение по допустимому количеству ступеней переключения программной скорости подачи прибора активного контроля.
6. Ограничение по переменным условиям обработки (припуск на обработку, степень загуления круга, переменная подаτικότητα технологической системы для группы станков разной жесткости, радиальное биение заготовки, диаметр и окружная скорость круга).
7. Ограничение по диапазонам управляющих параметров станка.
8. Ограничение по мощности привода круга и заготовки.

В качестве метода оптимизации принят метод динамического программирования, широко использующийся для решения транспортной задачи, в которой требуется найти оптимальный (т.е. минимальный по времени) маршрут из пункта А в пункт В, состоящий из разных по длине дорог между промежуточными станциями, при разных скоростях движения и значениях времени хода (т.е. времени прохождения) между ними. Применительно к оптимизации цикла шлифования, такая дорожная схема аналогична движению круга при снятии припуска с заготовки при различных значениях программных скоростей подач на разных ступенях снятия припуска.

Сущность методики оптимизации цикла шлифования методом динамического программирования, заключается в следующем.

Оптимизация режимных параметров производится в координатах "Программная скорость подачи - Припуск" на координатной сетке (рис. 5), шкалы которой разбиты на дискреты.

Шкала программной скорости подачи разбита на $M-1$ дискрет (M - количество программных скоростей подач станка) в диапазоне

$$S_{II}^{\min} \leq S_{II_m} \leq S_{II}^{\max},$$

где m - текущий номер программной скорости подачи, при $1 \leq m \leq M$; S_{II_m} - величина m -го уровня программной скорости подачи; S_{II}^{\min} - S_{II}^{\max} - соответственно, минимальная и максимальная величина программных скоростей подач по паспорту станка.

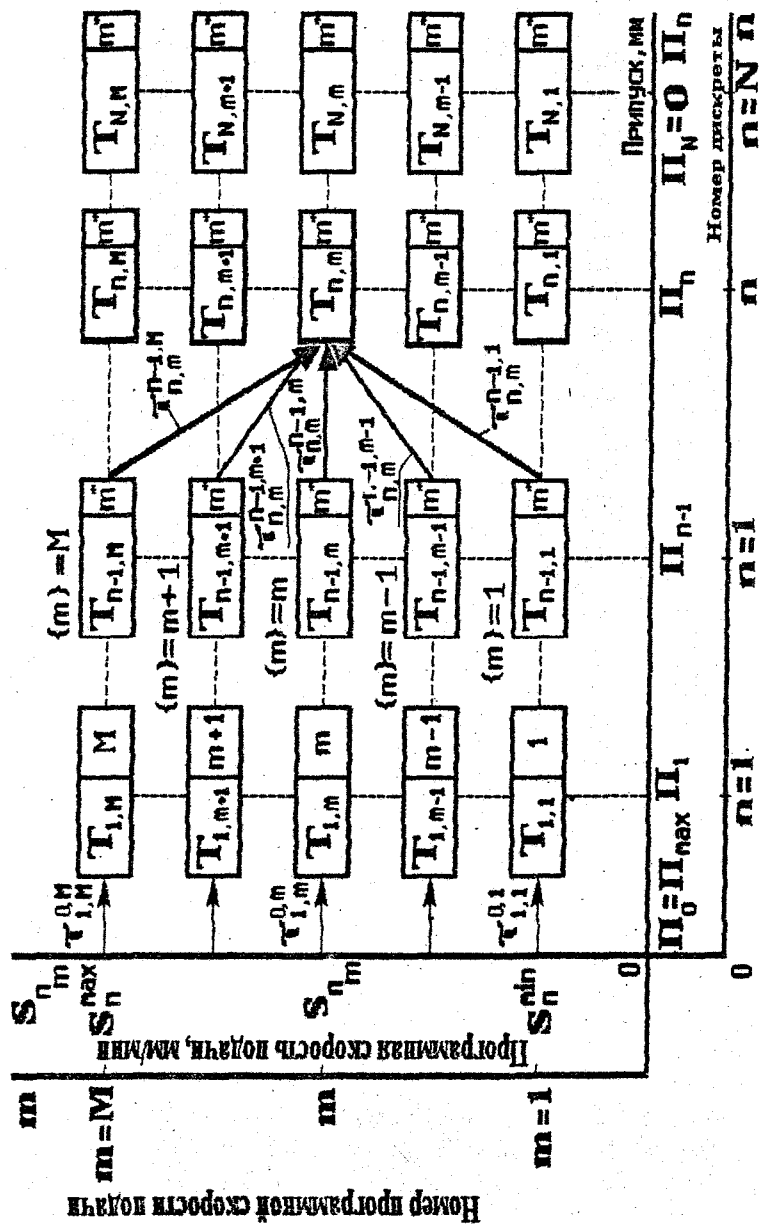


Рис. 5. Координатная сетка для оптимизации цикла круглого врезного шлифования методом динамического программирования

Аналогично шкала припусков разбита на $(N-1)$ дискрет $(N - \text{максимальный номер дискреты припуска, при котором величина оставшейся части припуска равна нулю})$ в диапазоне

$$P_{\max} \geq P_n \geq 0,$$

где n - номер текущего уровня дискреты припуска (при $n = 0$, величина оставшейся части припуска равна P_{\max} , а при $n = N$, равна нулю); P_n - величина оставшейся части припуска на n -ой дискрете припуска.

На каждом пересечении координатной сетки (рис. 5) с координатами $[n, m]$ помещена клетка, в которой записывается оптимальное (минимальное) время $T_{n,m}$ достижения этого состояния. Поскольку в основе метода динамического программирования лежит принцип - "оптимальная траектория оптимальна на каждом участке", то оптимальное время $T_{n,m}$ определяется после выбора оптимального хода из совокупности ходов, совершаемых в узел сетки с координатами $[n, m]$ из предыдущего уровня припуска $(n-1)$ при всех m -ных значениях программной скорости подачи.

Время хода, т.е. время, необходимое для снятия дискреты припуска $(P_{n-1} - P_n)$ при m - ном номере программной скорости подачи S_{nm} , определяется расчетом в процессе моделирования съема дискреты припуска.

Время хода обозначается $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$, где нижние индексы n и m означают координаты состояния, куда произведен ход, а верхние индексы - откуда произведен ход, где $\{m\}$ - номер программной скорости подачи на предыдущем $(n-1)$ уровне дискреты припуска, при $\{m\}=1 \dots M$.

Согласно принципу оптимальности, из нескольких возможных ходов в состояние $[n, m]$ требуется выбрать один, самый оптимальный ход.

Оптимальным считается один из возможных ходов, обеспечивающий минимальное время $T_{n,m}$ достижения состояния $[n, m]$, определяемое как сумма времени $T_{n-1,\{m\}}$ (т.е. оптимального времени достижения состояния $[n-1, \{m\}]$ на предыдущем уровне припуска, откуда произведен ход) и времени хода $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$ (из состояния $[n-1, \{m\}]$ в состояние $[n, m]$), т.е.

$$T_{n,m} = \min_{\{m\}} \left\{ T_{n-1,\{m\}} + \tau_{n,m}^{n-1,\{m\}} \right\}, \quad (27)$$

при $T_{0,0} = 0$; $m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$, где $T_{0,0}$ - время начала обработки.

Из всех возможных ходов с временем $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$, при минимизации времени $T_{n,m}$, выбираются только допустимые хода. Применительно к задаче оптимизации ход считается допустимым, если в достигнутом состоянии $[n, m]$ после совершения данного хода выполняются все ограничения целевой

функции. Для того, чтобы определить, является ли данный ход допустимым, производится его проверка по всем ограничениям целевой функции.

Из совокупности допустимых ходов (т.е. ходов, обеспечивающих выполнение всех ограничений) выбирается только один оптимальный ход, удовлетворяющий выражению (27), т.е. накопленное минимальное время $T_{n,m}$. После нахождения оптимального хода в состояние $[n,m]$, согласно требованиям метода динамического программирования, производится запоминание номера программной скорости подачи, откуда произведен оптимальный ход. Запомненное значение уровня, откуда произведен оптимальный ход, фиксируется для каждого состояния $[n,m]$ и хранится в переменной m^* во всех клетках на координатной сетке. Обозначения m^* условно показаны на рис.5 в правых половинах клеток, в которых записаны времена $T_{n,m}$.

Подобная процедура оптимизации производится для каждого пересечения координатной сетки. Исключения составляют те пересечения, которые не имеют ни одного допустимого хода.

Для исключения полного перебора вариантов, разработана новая методика направленного перебора для сокращения количества вариантов за счет отсекаания недопустимых и неперспективных ходов, которая позволила сократить число вариантов с 10^{10} до 10^3 (при $M=10$ и $N=10$).

Таким образом, время цикла $\tau_{ц}$ состоит из накопленного минимального времени цикла, т.е.

$$\tau_{ц} = \min_m T_{N,m}$$

Восстановление оптимальной траектории управления циклом шлифования, выполняется процедурой обратного хода, которая начинается из этого единственного конечного состояния, имеющего время $\tau_{ц}$. Для этого определяется предшествующее состояние процесса $T_{n-1,m}$, используя хранимые координаты m^* , идя от нулевого припуска к начальному, фиксируя величины программных скоростей подач и припусков (по достижении которых производились переключения программных скоростей подач).

Полученные таким образом программные скорости подач и соответствующие им части снимаемого припуска (по числу команд прибора активного контроля) являются управляющей программой, обеспечивающей минимальное время цикла при выполнении всех ограничений.

Для оптимизационных расчетов циклов разработаны алгоритмы и программы, по которым произведены расчеты режимов резания в нормативных справочниках.

НОРМАТИВЫ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Разработанная методика оптимизации автоматических циклов шлифования использовалась при создании и внедрении нормативно - справочных и руководящих материалов.

По заказу Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и под методическим руководством Центрального бюро нормативов по труду проведены совместные работы по расчету режимов резания и норм основного времени для операции круглого шлифования с радиальной подачей, которые вошли в сборник "Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ выполняемых на универсальных многоцелевых станках с числовым программным управлением". Часть II. Нормативы режимов резания. М.: Экономика, 1990.- с. 261-298.

В этих нормативах в разделе "Круглое наружное шлифование" впервые приведены нормативы режимов резания и основного времени для технического нормирования работ на круглошлифовальных станках с программным управлением по прибору активного контроля. Предусмотрена обработка цилиндрических поверхностей деталей врезным шлифованием по автоматическим циклам изменения программной скорости подачи. На ЭВМ, по разработанной программе, был рассчитан нормативно - справочный массив численных значений в табличном виде, который с определенным приближением дает возможность проектировать управляющие программы автоматических циклов.

Для более точного автоматизированного расчета параметров цикла шлифования расчет ведется с использованием САПР, что исключает дискретность нормативных величин, а также большое количество нормативных поправочных коэффициентов, которые снижают точность расчетов.

Основу нормативов составляют базовые условия обработки, приведенные в нормативах, для которых выбираются программные скорости подачи и распределение припуска по каждой ступени цикла, а так же основное время цикла. Для измененных условий шлифования выбранные параметры цикла корректируются путем умножения на поправочные коэффициенты, соответствующие измененным условиям. Такая методика проектирования является более сложной по объему численных расчетов (по сравнению с нормативами для станков с ручным управлением), т.к. для измененных условий обработки необходимо корректировать несколько параметров, к которым

относятся основное время, распределение припуска и программная скорость подачи по ступеням цикла. Кроме того, в нормативах впервые применен прямой учет влияния податливости технологической системы на программную скорость подачи и основное время. Расчет податливости технологической системы учитывает податливость центров станка и круга со шпинделем (по паспортным данным).

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Полученные математические модели сил шлифования, основанные на применении закономерностей механики пластических деформаций металлов в зоне резания, устанавливают функциональную связь с: фактической и программной скоростью подачи на каждой ступени цикла, скоростью детали и круга, механическими свойствами шлифуемого металла (интенсивность напряжений), геометрическими параметрами зоны контакта круга и заготовки (диаметры заготовки и круга, ширина обрабатываемой поверхности заготовки), характеристикой круга и степенью затупления зерен круга в любом диапазоне их варьирования.

2. Установлена расчетная связь производительности циклов шлифования с изменением силовой нагрузки технологической системы, режимов резания, требуемой точности обработки, точности заготовок, шероховатости, температур в зоне шлифования (приводящим к прижогам), точности и жесткости элементов технологической системы и других факторов.

3. Впервые разработанная методика оптимизации цикла шлифования дает возможность заменить полный перебор вариантов направленным перебором с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (большое время) ходов, что дает снижение количества вариантов с 10^{10} до 10^3 раз. Оптимизация управляющих параметров цикла шлифования выполнена на основе метода динамического программирования. Каждый шаг вариантов расчета проверяется по четырем важнейшим ограничениям - точности, бесприжоговости, шероховатости и осыпавости круга, обеспечивающим требуемое качество обработки, а также по основным механическим ограничениям технологической системы.

4. Экспериментальные исследования показали адекватность теоретических моделей результатам экспериментов (по критерию Фишера, теоретические зависимости адекватны результатам экспериментов при уровне значимости 0,05).

5. С использованием нового программного продукта рассчитаны массивы справочных таблиц для безмашинного проектирования оптимальных (по минимальному времени) автоматических многоступенчатых циклов шлифования, а также создана САПР для более точных расчетов циклов на ЭВМ. Применение разработанных методик позволили сократить сроки подготовки управляющих программ в среднем на 40%, а трудоемкость обработки на станках снизить в среднем на 20...30%.

6. Разработанная нормативно-справочная база обеспечила однозначность и обоснованность выбора параметров режимов резания, чем обеспечивается, как ручное, так и автоматизированное расчетное проектирование цикла. Нормативно-справочные массивы вошли в два справочника: 1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II. Нормативы режимов резания. М.: Экономика, 1990.- с.261 - 298. 2. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 3. Шлифовальные и доводочные станки. М.: Экономика, (находятся в печати), с. 305 - 352. Во втором справочнике дополнительно разработаны нормативы для циклов бесцентрового шлифования. Нормативы прошли апробацию в промышленности более, чем на 30 предприятиях и рекомендованы Государственным комитетом СССР по труду и социальным вопросам для промышленного применения. Методические и программные разработки экспонировались на ВДНХ СССР (золотая медаль Выставки). Материалы диссертации используются при чтении лекций по курсу "Математическое моделирование технологических процессов".

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Влияние интенсивности износа шлифовальных кругов на их производительность // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1976.- С.15-17.- (сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та N 178).

2. Переверзев П.П. Метод измерения площадок износа зерен шлифовальных кругов // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки.- Челябинск: ЧПИ, 1976.- С.43-44.- (темат. сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та N 178).

3. Исследование и определение области применения абразивного

инструмента из прокатанного электрокорунда (отчет), рег. ном. 78028086, инв.ном.Б663849, ЧПИ, Буторин Г.И., Челябинск, 1978, 75с.

4. Исследование физико-механических свойств новых марок электрокорундов, определяющих их работоспособность и область рациональной эксплуатации инструментов из них (отчет), рег. ном. 79017971, инв.ном.Б 742611, ЧПИ, Буторин Г.И., Челябинск, 1978, 60с.

5. Корчак С.Н., Переверзев П.П., Буторин Г.И., Кошин А.А. Моделирование работоспособности кругов разных характеристик и методика выбора кругов и режимов в общемашиностроительных нормативах режимов шлифования // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении: Тез. докл. - Челябинск, 1978. - С.3-11.

6. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Моделирование работоспособности кругов разных характеристик и методика выбора кругов и режимов резания // Тезисы первого Всесоюзного научно - технического семинара "Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении" -г. Челябинск, 1978.

7. Переверзев П.П. Влияние интенсивности износа шлифовальных кругов на их производительность // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1978.- С.20-22.- (темат. сб.науч тр. Челяб. политех. ин-та N 211).

8. Плячков В.П., Переверзев П.П. Высокопроизводительное шлифование крутами из новых абразивных материалов. - В кн.: Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки: Тез. докл. Всесоюз. конф., Полтава : НИИМАШ, 1979, с.38-39

9. Переверзев П.П. Методики оценки качества новых абразивных материалов. // Современный абразивный инструмент и методы повышения эффективности процесса шлифования: Тез. докл. Зональной научно-техн. конф. - Челябинск 1980. - С.11.

10. Корчак С.Н., Кошин А.А., Ключко В.И., Переверзев П.П. Виды разрушения абразивных зерен при шлифовании и методы их определения // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: процессы получения и применения. - Свердловск, 1982. - С.34- 44.

11. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Расчет производительности циклов шлифования и характеристики абразивных кругов // Машиностроитель. - 1982. - N 9. - С.19-20.

12. Переверзев П.П. Расчетное формирование цикла обработки на

операции шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки.- Челябинск: ЧПИ, 1982.- С.21-22.- (темат. сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та N 278).

13. Корчак С.Н., Переверзев П.П., Буторин Г.И. Расчет программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ // Пути повышения технического уровня и конкурентоспособности малогабаритных металлорежущих станков с ЧПУ: Тез. докл. респ. научно-техн. конф. - Каунас, 1983.-С.5253.

14. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Методика формирования автоматических циклов шлифования на основе аналитических моделей управления // Исследования в области технологии механической обработки и сборки.- Тула: ТПИ, 1983.-С.118-124.

15. Корчак С.Н., Переверзев П.П., Буторин Г.И., Расчет управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ // Пути повышения технического уровня и конкурентоспособности малогабаритных металлорежущих станков с числовым программным управлением: Тез. докл. респ. н-т конф. - Каунас, 1983.-С.48.

16. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Формирование автоматических циклов шлифования с учетом новейших технологических ограничений на основе аналитических моделей управления // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. - Пермь: Пермский политех. ин-т, 1983.-С.7-13.

17. Переверзев П.П., Иващеников А.В. Оптимизация циклов круглого врезного шлифования // Процессы и оборудование абразивно- алмазной обработки. - М., 1984.- Вып. 8.- С.73-77.

18. Исаков В.М., Переверзев П.П. Оптимизация автоматических циклов шлифования // Пути повышения производительности и повышения качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала: Тез. докл. зон. научно-техн. конф. - Свердловск, 1984 -С.74-75.

19. Корчак С.Н., Переверзев П.П., Кулыгин В.Л., Исаков В.М. Оптимизация условий обработки для операций круглого шлифования на станках с автоматическим циклом управления // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: Межвуз. сб. - Барнаул: АПИ, 1984.-С.31-35.

20. Переверзев П.П. Основы расчета автоматических циклов шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки.- Челябинск: ЧПИ, 1984.-С.9-10.- (темат. сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та).

21. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Оптимизация режимов резания для

операций круглого врезного шлифования на станках с автоматическим циклом управления // Резание и инструмент.- Харьков: ХГУ, "Вища школа", 1985.- Вып.34.- С.86-90.

22. Общемашиностроительные нормативы времени на операции, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках, с применением автоматизированной системы технического нормирования. Крупносерийное и среднесерийное производство. Часть 1. Указания по эксплуатации.- М.: НИИтруда, 1985.-207 с.

23. Общемашиностроительные нормативы времени на операции, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках, с применением автоматизированной системы технического нормирования. Крупносерийное и среднесерийное производство. Часть 2. Контрольные примеры.- М.: НИИтруда, 1985.-147с.

24. Свидетельство ГОСФАП N25 от 11 марта 1985г., инв. N156 о приеме в фонд ППП "ТАО".

25. Переверзев П.П. Оптимизация циклов круглого врезного шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки.- Челябинск: ЧПИ, 1986.-С.98-99.- (темат. сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та).

26. Переверзев П.П. и др. Описание методики и математических моделей оптимизации режимов резания для операций, выполняемых в автоматическом цикле на круглошлифовальных станках // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: Межвуз. сб. науч. тр.- Барнаул: АПИ, 1987.- С.103-109.

27. Корчак С.Н., Переверзев П.П., Рассказов В.Н., Исаков В.М. Оптимизация режимов резания для операций шлифования, выполняемых на станках с автоматическим циклом управления // Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и гибких производственных систем: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф.- Челябинск, 1988.- С.20-21.

28. Переверзев П.П. Моделирование процесса съема металла при шлифовании // Технологическое и нормативное обеспечение станков с ЧПУ и гибких производственных систем: Тез. докл. Всесоюз. научнотехн. конф.- Челябинск, 1988.- С.25-27.

29. Переверзев П.П. Оптимизация автоматических циклов шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки.- Челябинск: ЧГТУ, 1988.- С.91-93.- (темат. сб. науч. тр. Челяб. гос. техн. ун-та).

30. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для нормирования работ, выполняемых на шлифовальных станках с программным

управлением. - М.: Экономика, 1989.

31. Переверзев П.П. Оптимизация циклов шлифования методом динамического программирования // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Межвуз. сб. науч. тр. - Пенза: Пенз. политехнич. ин-т, 1989. - Вып. 17. - С. 26-29.

32. Переверзев П.П., Рассказов В.Н. Оптимизация циклов шлифования методом динамического программирования // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: Межвуз. сб. науч. тр. - Барнаул: АПИ, 1989. - С. 68-71.

33. Переверзев П.П. Моделирование силового управления точностью обработки при круглом врезном шлифовании // Механика и технология машиностроения: Тез. докл. научно-техн. конф. - Свердловск, : УО АН СССР 1990. - С. 96.

34. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть 2. Нормативы режимов резания. - М.: Экономика, 1990. - с. 261-298.

35. Общемашиностроительная система автоматизированного нормирования и проектирования операций, выполняемых на металлорежущих станках (Пакет прикладных программ "Норма-1"). Крупносерийное и среднесерийное производство. Часть 1. Руководство по эксплуатации. - М.: Экономика, 1990. - 61 с.

36. Переверзев П.П. Оптимизация автоматических циклов круглого врезного шлифования методом динамического программирования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1993. - С. 3-9. - (темат. сб. науч. тр. Челяб. политех. ин-та).

37. Математическое моделирование производительности и качества станочной обработки (на основе закономерностей механики и теплофизики) для программного и технологического обеспечения нового поколения проектирующе-управляющих станочных компьютеров для систем ЧПУ (отчет), 84.94, ЧГТУ, Переверзев П.П., Челябинск, 1994, 72 с.

38. Переверзев П.П. Использование метода динамического программирования при проектировании автоматических циклов круглого врезного шлифования для станков с программным управлением // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - С. 22-30. - (темат. сб. науч. тр. Челяб. гос. тех. ун-та).

39. Переверзев П.П. Алгоритм проверки ограничения по точности

обработки при оптимизации автоматических циклов круглого врезного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении- Челябинск: ЧГТУ, 1996.-С.77-80- (темат. сб. науч. тр. Челяб. гос. тех. ун-та)

40. Переверзев П.П. Алгоритм проверки ограничения по точности обработки при оптимизации автоматических циклов круглого врезного шлифования// Прогрессивные технологии в машиностроении- Челябинск: ЧГТУ, 1996.-С.77-80- (темат. сб. науч. тр. Челяб. гос. тех. ун-та).

41. Переверзев П.П. Моделирование ограничений по точности обработки при оптимизации циклов шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении- Челябинск: ЧГТУ, 1997.- С.131-138- (темат. сб. науч. тр. Челяб. гос. тех. ун-та).

42. Переверзев П.П. Оптимизация автоматических циклов круглого врезного шлифования методом динамического программирования // I Международная специализированная выставка. Машиностроение. Прогрессивные технологии - Челябинск: 17 - 20 июня 1997г.- С.48- (сб. тезисов докладов конференции).

43. Переверзев П.П. Оптимизация циклов врезного шлифования методом динамического программирования // II Международная специализированная выставка Машиностроение. Прогрессивные технологии - Челябинск: 17 - 20 марта 1998г.- С.60- (сб. тезисов докладов конференции).

44. Переверзев П.П. Моделирование ограничений при оптимизации автоматических циклов круглого врезного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении- Челябинск: ЮУрГУ, 1998.- С.81-84- (темат. сб. науч. тр. Южно-Ур. гос. ун-та).

45. Переверзев П.П. Применение метода динамического программирования для оптимизации автоматических циклов круглого врезного шлифования // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении-Пермь: ПермГТУ, 1998.-С95-102