

05.02.08
H 634



На правах рукописи

НИКОЛАЕНКО АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПЛОСКОГО ГЛУБИННОГО
ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ**

Специальность 05.02.08 — “Технология машиностроения”

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

Челябинск — 1998

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 – Институт конструкторско-технической информатики Российской академии наук (г.Москва).

Защита диссертации состоится 10 ноября 1998 г., в 10 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.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1998 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
доктор экономических наук, профессор

 И.А. БАЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Опыт стран с развитой рыночной экономикой показывает, что одним из путей позволяющих повысить уровень производства является переориентация массового и крупносерийного производства на серийное и мелкосерийное. Осуществить такой переход быстро и эффективно позволяют станки с ЧПУ.

Расширение области применения станков с ЧПУ происходит одновременно с повышением качества, снижением металлоемкости и стоимости изготавливаемых деталей. Стремление улучшить технико-экономические показатели изделий за счет использования деталей из закаленных, износостойких, коррозионностойких и жаропрочных материалов приводит к снижению производительности обработки из-за низкой стойкости лезвийных режущих инструментов. Одним из путей повышения производительности при механической обработке деталей из таких материалов является замена лезвийной обработки операциями плоского глубинного профильного шлифования (ПГПШ), которые выполняются на станках с ЧПУ.

Станки с ЧПУ для операций ПГПШ выпускает Липецкий станкостроительный завод и ряд зарубежных фирм. Эти станки обладают повышенной жесткостью, мощным главным приводом и относятся к высокоточному оборудованию.

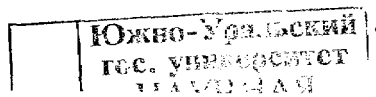
Большая глубина резания и значительная интенсивность съема металла, при высокой точности получаемых размеров и качестве обработанной поверхности, позволяют заменить сочетание фрезерования (протягивания, строгания) и последующего обычного шлифования одной операцией ПГПШ.

Опыт промышленного внедрения операций ПГПШ показал, что при определенных условиях они обеспечивают рост производительности в сравнении с лезвийной обработкой в 2 ... 5 раз при обеспечении заданного качества деталей.

Однако широкое внедрение ПГПШ в промышленность сдерживается из-за отсутствия нормативов режимов резания и теории расчета автоматических циклов для этих операций.

Маркетинговое исследование показало, что в России и СНГ операции ПГПШ используются пока недостаточно широко, но потребность в них значительна и есть предпосылки для их широкого внедрения.

Большая сложность математического и методического обоснования теории расчетно-точностного проектирования операций ПГПШ, выполняемых на стан-



ках с ЧПУ, *превращает задачу в научную проблему*. Решение этой проблемы позволит создать теоретическую и технологическую базу для автоматизированного проектирования операций ПГТШ.

Данная работа выполнена в соответствии с программой ГКНТ 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 0.8.01.А.: «Разработать и внедрить методические рекомендации по расчету норм времени на ЭВМ в едином цикле с автоматизированным проектированием технологических процессов».

Анализ работ в области ПГТШ показал, что для управления процессом необходимо разработать аналитические зависимости, позволяющие рассчитать режимы резания с целью обеспечения точности и других требований по качеству обработки (шероховатости, бесприжоговости и пр.).

Цель работы состоит в разработке теории и методики расчета автоматических циклов плоского глубинного профильного шлифования для станков с ЧПУ в широком диапазоне обработки разных деталей машиностроения.

Научная новизна состоит в разработке методики и нормативной базы размерно – точностного проектирования автоматических циклов ПГТШ, выполняемых на станках с ЧПУ.

Получены аналитические зависимости для расчета составляющих силы резания, учитывающие характеристики круга (зернистость, твердость, структуру), формы профилей круга и заготовки. Эти зависимости получены на основе фундаментальных положений теории пластичности. Выведены зависимости для расчета температуры в зоне шлифования при ПГТШ, которые базируются на теории теплопроводности. Разработана методика взаимозависимого расчета сил резания и температуры в зоне шлифования при ПГТШ. Получены математические модели, устанавливающие функциональные связи между производительностью и требуемой точностью детали. На базе разработанных моделей создан комплекс управления процессом ПГТШ, который позволяет рассчитать оптимальные режимы резания и обеспечить требуемое качество деталей. Приоритетность сделанных разработок подтверждена 10 патентами Российской Федерации.

Практическая ценность. Использование новой расчетной методики позволило разработать технологическую справочную базу данных для автоматизированного проектирования операций ПТПШ. Разработаны табличные нормативы режимов резания. В этих нормативах впервые решена задача определения расчетно-обоснованного минимального основного времени в зависимости от точности заготовки, необходимой точности обработки и других показателей качества. Для этого в нормативах рассчитаны карты для определения необходимого количества стадий шлифования и их качественного содержания: глубины резания и скорости продольной подачи в зависимости от точности заготовок, жесткости станка и других технологических ограничений производительности. Новые нормативы содержат данные по обоснованному выбору всех элементов режима резания, входящих в формулы для расчета основного времени.

На базе математических моделей и новых нормативов разработана автоматизированная система проектирования и нормирования операций ПТПШ, выполняемых на станках с ЧПУ.

Результаты исследования в виде руководящих технических материалов и пакета САПР операций ПТПШ внедрены на 5 предприятиях.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях (НТК), совещаниях и семинарах: «Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств» в Алтайском политехническом институте, г.Барнаул, 1989 г.; на международной НТК «Математическое моделирование в машиностроении» в Куйбышевском авиационном институте, 1990 г.; на семинаре «Состояние, перспективы создания и внедрения в производство абразивных инструментов» в УРАЛВНИИАШ, г.Челябинск, 1991 г.; на международной НТК «Смазочно-охлаждающие технологические средства при механической обработке заготовок из различных материалов» в Ульяновском политехническом институте, 1993 г.; на международной НТК «Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона» в МГМИ, г.Магнитогорск, 1994 г.; на НТК «Проектирование систем» в МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва, 1995–96 гг.; на международной НТК «Машиностроение-97. Прогрессивные технологии» в АО «ЮжУралЭКСПО», г.Челябинск, 1997 г.; на НТК и семинарах Южно-Уральского государственного университета в 1989–98 гг.

Законченная работа обсуждена и одобрена на совместном совещании кафедр «Технология, бизнес и компьютерное управление машиностроительного

производства", "Оборудование и инструмент компьютеризированного производства" Южно – Уральского государственного университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 42 работы (из них 10 патентов) и 5 отчетов по НИР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы и 4 приложений. Работа содержит 349 страниц машинописного текста, включая 11 таблиц, 85 рисунков, список литературы из 225 наименований, приложения на 71 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Маркетинговое исследование и теоретические предпосылки

Маркетинговое исследование для операций ПГПШ проводилось в авиационной, автотракторной, инструментальной и других отраслях промышленности. Критериями оценки служили: потребность предприятий в операциях ПГПШ и технические возможности для внедрения этих операций.

Операции ПГПШ на станках с ЧПУ являются одним из новых видов механической обработки. Внедрение новых технологий в производство в условиях рынка подчинено жестким экономическим требованиям, в основе которых лежат обеспечение высокой эффективности работы предприятия и конкурентоспособности изделий.

Результатом маркетингового исследования явилось, во-первых, заключение с рядом предприятий договоров о НИР и внедрение по этим договорам операций ПГПШ в производство, во-вторых, проведение с другими предприятиями переговоров на разработку технологии ПГПШ для конкретных деталей.

Анализ теоретических работ посвященных ПГПШ показал, что не решена проблема расчетного определения необходимого количества стадий уточнения заготовки с конкретными параметрами для получения готовой детали

Исследуя способы управления точностью обработки отмечено, что благодаря работам Б.С. Балакшина и его последователей выявлены основные преимущества управления точностью обработки путем стабилизации силовой нагрузки на технологическую систему.

Показано, что развитие методов расчета сил резания и теории шлифования было сделано в работах Е.Н. Маслова, Л.В. Худобина, С.Н. Корчака, С.С. Си-

лина, А.Н. Резникова, С.Г. Редько, С.А. Попова, Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, Ю.К. Новоселова, А.К. Байкалова, П.И. Ящерицына, В.И. Островского, Л.Н. Филимонова, В.В. Ефимова, Н.С. Рыкунова, П.П. Переверзева и др

Отмечено, что большой вклад в развитие теории точности изготовления деталей машин внесли Б.С. Балакшин, А.П. Соколовский, К.В. Вотинов, Л.А. Глейзер, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова, Р.К. Мешеряков, Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов и др.

Отмечено, что вопросы расчета оптимальных режимов резания с учетом технологических ограничений разрабатывались Г.И. Темчиным, Г.К. Горанским, Г.Б. Лурье, Э.Г. Грановским, В.Н. Михелькевичем, В.Д. Эльяновым, Б.С. Балакшиным, С.Ц. Корчаком, Ю.М. Соломенцевым, В.Г. Митрофановым, В.И. Островским, В.И. Гузеевым, Д.В. Якимовым и др.

Однако до настоящего времени в теории шлифования остались неразработанными автоматические циклы операций, описывающие закономерности изменения подач по мере снятия припуска на обработку, обеспечивающие получение требуемой точности обработки, шероховатости, бесприжоговости и стойкости кругов разных характеристик, а для операций ПТПШ – учитывающие разную форму профиля круга (детали). В основе таких расчетов лежат закономерности изменения сил резания и вызываемые ими упругие отжатия круга в детали в технологической системе. Существующие эмпирические зависимости для расчета сил резания являются узкодиапазонными и при отступлении от условий экспериментов дают большие погрешности, а аналитические зависимости не учитывают влияние зернистости, твердости и структуры шлифовального круга.

Проведенный анализ существующих систем автоматизированного проектирования технологических процессов показал, что такие разработки отсутствуют для операций ПТПШ, также как отсутствуют нормативные материалы по определению режимов резания.

Для достижения выше сформулированной цели в работе решен комплекс задач:

1. Разработаны аналитические зависимости для расчета сил резания, учитывающие характеристики кругов, формы профилей круга и заготовки.
2. Разработана методика взаимозависимого расчета сил резания и температуры в зоне шлифования при ПТПШ.

3. Разработана методика расчета погрешности обработки при одно и многоходовом шлифовании.
4. Разработана методика оптимизационного расчета режимов резания для операций ПГПШ, выполняемых на станках с ЧПУ.
5. Разработана методика расчета высокопроизводительных автоматических циклов ПГПШ для станков с ЧПУ.
6. Разработаны нормативы режимов резания и САПР для операций ПГПШ.

Моделирование сил резания для процессов ПГПШ

Силы резания. Аналитический расчет сил резания выполнен на базе основных закономерностей теории пластического деформирования металлов и дискретной схемы контакта шлифовального круга с заготовкой.

В работах С.Н. Корчака показано, что обрабатываемый материал в зоне резания характеризуется сложноподвижным состоянием, а сдвиг элементов металла и образование стружки являются результатом пластического течения металла в направлении наименьшего сопротивления, сопровождаемого определенными величинами нормальных и касательных напряжений в этой зоне. Оценка сложноподвижного состояния металла выполняется по критерию интенсивности напряжений σ_1 , численная величина которой зависит от нормальных и касательных напряжений и больше каждой из них, т.е. величины касательных и нормальных напряжений являются частью величины интенсивности напряжений. Таким образом, σ_1 характеризует напряженное состояние во всех объемах металла, воспринимающих силовое воздействие инструмента, а не только в зоне сдвига как зачастую принимается в исследованиях. Поэтому интенсивность напряжений σ_1 более полно характеризует напряженное состояние во всей зоне резания и, следовательно, более правильно отражает сопротивление металла деформации резанием.

Через уравнение баланса мощностей активных и реактивных сил, путем суммирования силовых реакций, возникающих от действия совокупности зерен, находящихся в площади контакта круга с заготовкой, получены аналитические зависимости для расчета тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания:

$$P_{Z_1} = \frac{k_3 \sigma_i \varepsilon_i V_{snp} t_\phi S_x}{V} + \frac{\mu_1 k_2 \sigma_i \pi (k_0 d_0)^2 W_3 W_c k_1 \sqrt{D t_\phi} S_x}{(W_3 + W_c + W_n) 4 W_n d_0^2}, \quad (1)$$

$$P_{Y_1} = \frac{k_1 \sigma_i \varepsilon_i V_{snp} t_\phi S_x}{V} + \frac{k_2 \sigma_i \pi (k_0 d_0)^2 W_1 W_c k_1 \sqrt{D t_\phi} S_x}{(W_1 + W_c + W_n) 4 W_n d_0^2}, \quad (2)$$

$$P_{X_1} = \frac{k_1 \sigma_i \varepsilon_i V_{snp} t_\phi S_x \operatorname{tg} \alpha_i}{V} + \frac{k_2 \sigma_i \pi (k_0 d_0)^2 W_1 W_c k_1 \sqrt{D t_\phi} S_x \operatorname{tg} \alpha_i}{(W_1 + W_c + W_n) 4 W_n d_0^2}, \quad (3)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; ε_i – интенсивность деформаций; d_0 – зернистость круга; k_0 – коэффициент, устанавливающий соотношение между d_0 и длиной площади затупления на зерне; W_3, W_c, W_n – применяемое в абразивной промышленности объемное содержание зерна, связки и пор в обожженном абразивном инструменте; V_{snp} – скорость продольной подачи; S_x – поперечная подача на ход (ширина шлифования); t_ϕ – фактическая глубина резания; V – скорость шлифовального круга; μ_1 – коэффициент трения; α_i – угол наклона образующей профиля шлифовального круга.

Зависимости (1) ... (3) впервые непосредственно учитывают характеристики шлифовального круга (зернистость, твердость, структуру).

Путем деления сложного профиля шлифовальных кругов (деталей) и заготовок на простые по форме участки произведена классификация возможных схем шлифования при ПГПШ. Выделены 10 схем шлифования: схемы шлифования 1, 2, 3, 4 (рис.1) соответствуют обработке плоской заготовки, когда глубина резания равна глубине профиля круга; схемы шлифования 1, 5, 6, 7 (рис.2) соответствуют обработке плоской заготовки, когда глубина резания больше глубины профиля круга; схемы шлифования 1, 8, 9, 10 (рис.3) соответствуют обработке профилированной под готовую деталь заготовки (штамповка, отливка), когда глубина резания постоянна.

Для каждой схемы шлифования получены формулы для расчета площади контакта круга с заготовкой F_1 и интенсивности съема металла Q_i . Эти формулы являются составляющими зависимостей для расчета сил резания и таким образом устанавливают влияние формы профилей круга и заготовки на силы резания.

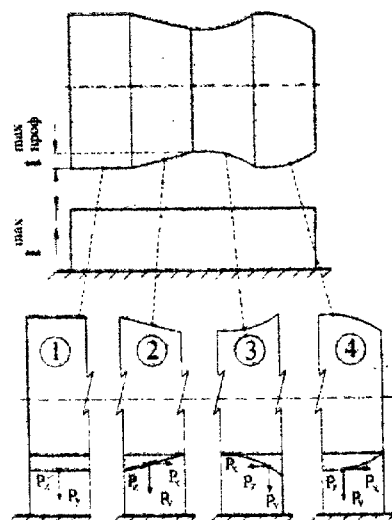


Рис. 1. Схемы шлифования 1, 2, 3, 4

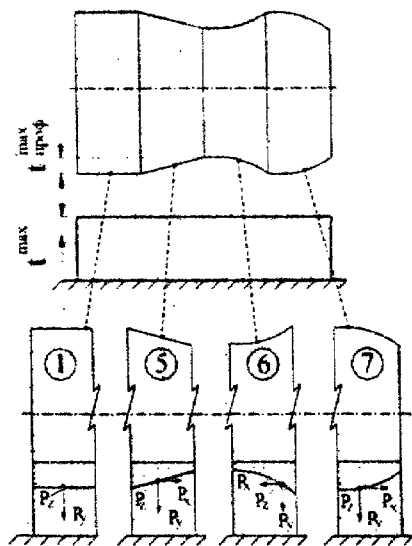


Рис. 2. Схемы шлифования 1, 5, 6, 7

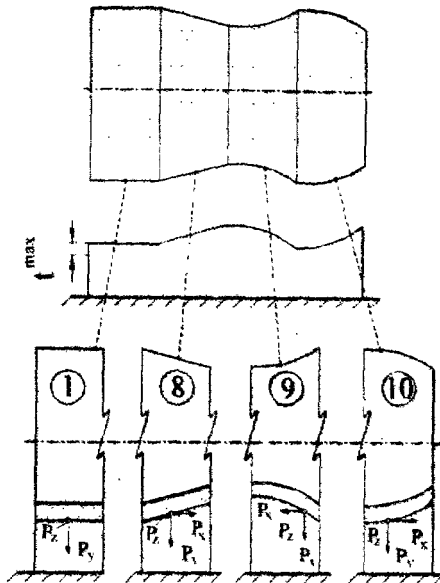


Рис.3. Схемы шлифования 1, 8, 9, 10

Экспериментальная проверка силовых зависимостей проводилась на стенде смонтированном на базе станка с ЧПУ для ПГПШ модели ЛШ-220. Отклонение среднестатистических экспериментальных и теоретических значений сил резания составило $\pm 10\%$.

Температура в зоне шлифования. Основой для расчета температурного поля в зоне шлифования заготовки принято уравнение теплопроводности Фурье, которое для выполнения условий однозначности дополнено начальными и граничными условиями. Для схематизации процесса принят ряд известных допущений. За дискретный источник тепла принята зона контакта каждого работающего в зоне резания абразивного зерна круга, а общее тепловое поле всей зоны шлифования (по экспериментальной методике С.Г. Редько и теоретической С.Н. Корчака) представлено суммой тепловых импульсов действующих в каждый момент времени. Число импульсов равно числу зерен работающих в зоне контакта и зависит от характеристик круга и площади контакта (режимов резания). Такой подход (в отличие от принятия в качестве источника тепла всей зоны контакта) наиболее реально отражает тепловое воздействие круга на металл. Таким образом, температурное поле рассматривалось как результат наложения тепловых импульсов от

следующих друг за другом абразивных зерен. Для аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности выбран метод функций Грина. Получено решение тепловой задачи в следующем виде:

$$U(x, t) = U_0 + \frac{2q}{\sqrt{\lambda C \rho}} \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{t - T_k} \cdot i \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4a_i(t - T_k)}} H(t - T_k) - \sqrt{t - \tau - T_k} \cdot i \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4a_i(t - \tau - T_k)}} H(t - \tau - T_k) \right], \quad (4)$$

где U_0 – исходная температура заготовки; x – расстояние от обрабатываемой поверхности заготовки до рассматриваемой точки в глубине заготовки; t – время действия теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки; C – теплоемкость материала заготовки; ρ – плотность материала заготовки; $i \operatorname{erfc}(x)$ – интегральная функция ошибок (значения которой затабулированы).

Зависимость коэффициента теплопроводности λ и теплоемкости C от температуры $U(x, t)$ привела к необходимости решать существенно нелинейное уравнение теплопроводности. Для учета в первом приближении влияния температуры $U(x, t)$ на λ и C применен метод кусочно – постоянной аппроксимации на $\lambda(U)$ и $C(U)$, т.е. непрерывные зависимости заменены кусочно – постоянными. Это позволило воспользоваться линейным решением выражения (4), применяя его к небольшим интервалам времени, за которые температура рассматриваемой точки не успевает сильно измениться, и корректируя каждый раз значения λ и C . Значения теплофизических характеристик (λ и C) при различных температурах взяты из марочника сталей и сплавов В.Г. Сорокина.

С учетом $\lambda(U)$ и $C(U)$, после подстановки в выражение (4) зависимости для расчета плотности теплового потока q_i , получена формула для расчета температуры в поверхностном слое заготовки (в зоне шлифования).

$$U(x, t_i) = U_0 + \frac{2}{\sqrt{\rho}} \sum_{i=1}^{N_i} \left[\frac{\sigma_i(U_i) \cdot V_{\text{шп}} \cdot k_{14}}{k_{15} \sqrt{a_i(U_i)} \cdot C_i(U_i)} \sqrt{t - T_k} \cdot i \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4a_i(t - T_k)}} H(t - T_k) - \sqrt{t - \tau - T_k} \cdot i \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4a_i(U_{i-1})(t - \tau - T_k)}} H(t - \tau - T_k) \right], \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет рассчитать температуру самоподогрева металла при шлифовании для любого момента времени t_i на глубине x . В нем учтено:

изменение теплофизических (λ_n, C_n) характеристик металла заготовки от изменяющейся во время шлифования температуры (U_{i-1}), влияние режима резания ($V_{s, \text{шр}}, t_{\text{ф}, i}$) и характеристик круга (зернистости, твердости, структуры).

Таким образом, выражение (5) позволяет рассчитать температуру в поверхностном слое заготовки как для времени нагрева от действия зерен – импульсов, так и для времени охлаждения между действием зерен (т.е. для любого момента времени). Пиковые максимальные температуры нагрева используются для расчета температуры, при которой возможно появление прижога, а температуры самоподогрева для расчета интенсивности напряжений σ_i (действительного сопротивления шлифованию).

Теоретически рассчитанные температуры сравнивались с экспериментальными, которые определялись на станке ЛШ – 220 по методике С.Г. Релько (при помощи термопар). Расхождение экспериментальных и теоретических значений температуры не превысило $\pm 10\%$.

Взаимозависимый расчет сил резания и температуры в зоне шлифования. На базе зависимостей для расчета сил резания (1) ... (3) и температуры (5) разработана методика поэтапного, взаимозависимого расчета сил резания и температуры при ПГТШ.

Сущность методики взаимозависимого расчета заключается в следующем. На поверхности заготовки выбирается точка. Для первого абразивного зерна, срезающего металл над рассматриваемой точкой, расчет тангенциальной составляющей силы резания $Pz_{i=1}^3$ производится при значениях интенсивности напряжений $\sigma_{i=1}(U_{i-1})$ соответствующей исходной температуре заготовки U_{i-1} равной U_0 . По полученному значению тангенциальной силы $Pz_{i=1}^3$ рассчитывается плотность теплового потока $q_{i=1}$ и новая температура $U_{i=1}$ в рассматриваемой точке. Для полученной температуры $U_{i=1}$ производится перерасчет значений теплофизических характеристик металла $\lambda_{i+1}(U_{i=1}), C_{i+1}(U_{i=1})$ (перерасчет производится по данным марочника В.Г. Сорокина, в котором значения λ_i и C_i приведены для сталей и сплавов при различных температурах) и интенсивности напряжений $\sigma_{i=1}(U_{i-1})$

(значения σ_i для разных сталей и сплавов при разных температурах приведены в работах С.Н. Корчака и В.И. Клочко). Таким образом, для второго абразивного зерна расчет тангенциальной составляющей силы резания Pz_{i+1}^1 производится при новом значении интенсивности напряжений $\sigma_{i+1}(U_{i+1})$. По полученному значению тангенциальной силы Pz_{i+1}^1 вновь рассчитывается плотность теплового потока q_{i+1} и новая температура U_{i+1} в рассматриваемой точке. Для полученной температуры U_{i+1} производится такой же перерасчет значений теплофизических характеристик $\lambda_{i+2}(U_{i+1})$, $C_{i+2}(U_{i+1})$ и интенсивности напряжений $\sigma_{i+2}(U_{i+1})$. Последовательность расчета повторяется для всех абразивных зерен срезавших металл над рассматриваемой точкой заготовки.

Разработанная методика поэтапного расчета сил резания (с учетом температуры зоны шлифования в момент входа очередного зерна в металл) позволила определить более точные значения сил резания с учетом температурно – скоростного интервала деформаций, характерных для шлифования, т.е. с учетом действительного сопротивления шлифованию многих марок сталей и сплавов (разбитых на 7 групп обрабатываемости).

Расчет упругих перемещений в технологической системе

Одной из основных задач технологии машиностроения является установление взаимосвязи между производительностью и точностью обработки, которая во многом определяется податливостью (жесткостью) технологической системы.

Податливость технологической системы. Основные принципы моделирования податливости технологической системы сформулированы В.С. Корсаковым. Для расчета податливости отдельных элементов технологической системы был использован интеграл О. Мора.

Анализ 10 приведенных выше схем шлифования показал, что при ПГШ можно выделить три простые схемы нагружения технологической системы силами резания (I, II, III) и схему смешанного нагружения.

Схемы нагружения I, II, III представлены на рис.4.

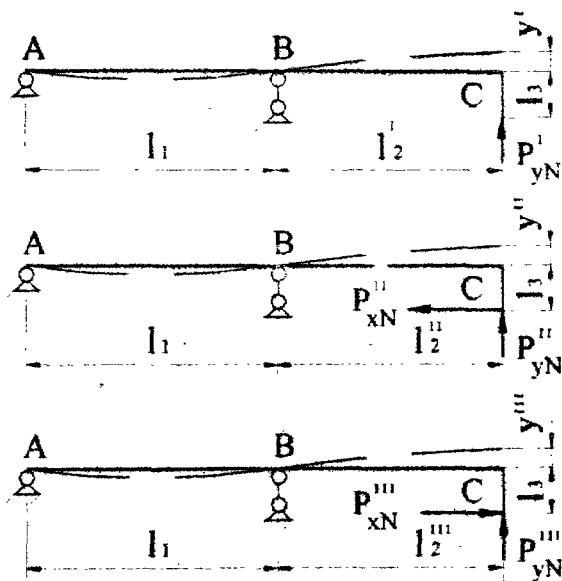


Рис.4. Схемы нагружения I, II и III

Для каждой схемы нагружения выведены зависимости для расчета упругого перемещения y^I с учетом соответствующей податливости f^I :

Схема нагружения I

$$y^I = P_{yN} \cdot f^I = P_{yN} \cdot \left(\frac{l_2^2 \cdot [l_2 + l_1]}{3EJ_X} \right) \cdot k_{\text{мг}}, \quad (6)$$

где P_{yN} – радиальная сила вызывающая упругое перемещение; f^I – податливость технологической системы при I – ой схеме нагружения:

Схема нагружения II

$$y^{\text{II}} = P_{yN} \cdot \left(\frac{l_2^2 [l_2 + l_1]}{3EJ_X} \right) \cdot k_{\text{мг}} - P_{xN} \cdot \left(\frac{l_3 \cdot l_2 \left[l_2 + \frac{l_1}{1.5EJ_X} \right]}{2EJ_X} \right) \cdot k_{\text{мг}}. \quad (7)$$

Схема нагружения III

$$y^{\text{III}} = P_{\text{XN}} \left(\frac{l_3 \cdot l_2^2}{2EJ_X} + \frac{l_3 \cdot l_2 \cdot l_1}{3EJ_X} \right) \cdot k_{\text{из}} + P_{\text{YN}} \left(\frac{l_2^3}{3EJ_X} + \frac{l_2^2 \cdot l_1}{3EJ_X} \right) \cdot k_{\text{из}}, \quad (8)$$

где l_1 – длина пролета; l_2 – длина консоли; l_3 – длина плеча; E – модуль упругости; J_X – момент инерции сечения; α_1 – угол наклона образующей профиля круга; P_{YN} – нормальная сила к радиальной составляющей силы резания; P_{XN} – нормальная сила к осевой составляющей силы резания; $k_{\text{из}}$ – коэффициент, учитывающий износ станка

В приведенных уравнениях (6) ... (8) выражения заключенные в круглые скобки представляют собой податливость технологической системы от соответствующей составляющей силы резания.

Полученные зависимости (6) ... (8) для расчета упругих перемещений учитывают составляющие силы резания, конструкцию стайков для ПГПШ, геометрию входящих в них элементов и физико-механические свойства материалов их которых они изготовлены.

Экспериментальное определение податливости технологической системы при различных схемах нагружения производилось на станке ЛШ-220 при помощи запатентованного автором устройства [33]. Расхождение экспериментальных и теоретических значений податливости не превысило 10 %

Смешанная схема нагружения состоит из различных комбинаций простых схем нагружения. Расчет упругих перемещений технологической системы при смешанной схеме нагружения производился по методике В.С. Корсакова, в основе которой лежит принцип независимости действия сил. Это означает, что смешанная схема нагружения делится на простые схемы. Для каждой простой схемы, по приведенным выше моделям (6) ... (8), рассчитывается упругое перемещение. Общее упругое перемещение при смешанной схеме нагружения определяются суммированием соответствующих значений простых схем нагружения.

Точность обработки при одно и многоходовом шлифовании

В основу моделей для расчета точности обработки положен расчет упругих перемещений рабочей поверхности шлифовального круга.

Расчетная схема для определения упругих перемещений при одноходовом ПГПШ показана на рис.5.

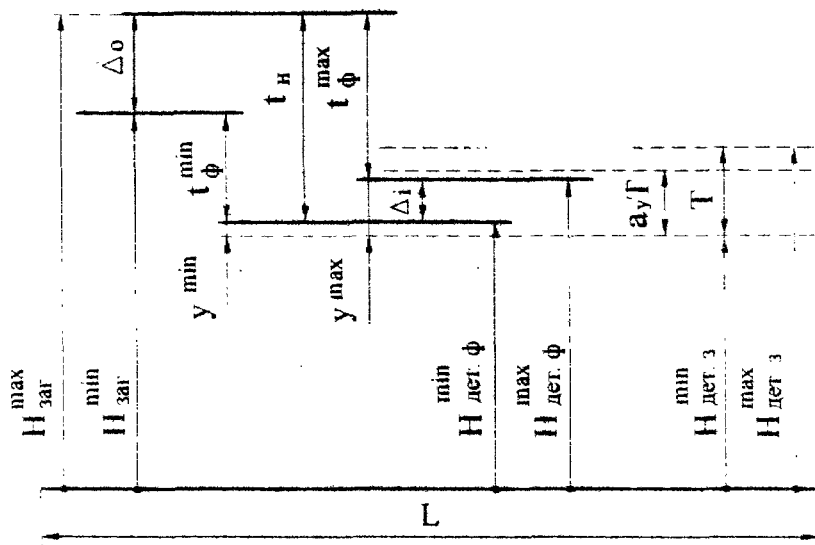


Рис.5. Расчетная схема для определения упругих перемещений при одноходовом ПГПШ

Колебание припуска, обусловленное погрешностью заготовки, вызывает при резании колебание глубины резания, а следовательно и колебание сил резания и величины упругого перемещения рабочей поверхности шлифовального круга. В целом погрешность заготовки копируется на детали в виде одноименной погрешности меньшей величины.

Для расчета максимального и минимального упругого перемещения рабочей поверхности шлифовального круга получены следующие аналитические зависимости:

$$y_i^{\max} = t_{ni} - t_{\phi,i}^{\max} = t_{ni} - \left[\frac{-f^i \cdot B_i + \sqrt{(f^i \cdot B_i)^2 + 4t_{ni}(1+f^i \cdot A_i)}}{2(1+f^i \cdot A_i)} \right]^2 \quad (9)$$

$$y_i^{\min} = t_{ni} - t_{\phi,i}^{\min} = t_{ni} - \left[\frac{-f^i \cdot B_i + \sqrt{(f^i \cdot B_i)^2 + 4(t_{ni} - \Delta)(1+f^i \cdot A_i)}}{2(1+f^i \cdot A_i)} \right]^2 \quad (10)$$

Для обеспечения заданной точности размеров детали принято следующее условие:

$$y^{\max} \leq a_y \cdot T, \quad (11)$$

где y^{\max} – максимальное упругое перемещение в технологической системе; $a_y < 1$ – часть допуска на размер детали, используемая для упругих перемещений; T – допуск на размер детали.

В тех случаях когда на чертежах деталей допуски прямолинейности или параллельности устанавливаются меньше допуска на размер, то они оказываются главными ограничениями при расчете режимов резания и сил вызывающих упругие отжатия в технологической системе.

Для обеспечения заданной прямолинейности поверхности детали принято следующее условие:

$$\Delta_{\perp} = y^{\max} - y^{\min} \leq T_{\perp} = a_{\perp} \cdot T, \quad (12)$$

где Δ_{\perp} – расчетное отклонение поверхности детали от прямолинейности; T_{\perp} – допуск прямолинейности; T – допуск на размер детали; a_{\perp} – коэффициент, устанавливающий соотношение между допуском формы и допуском размера.

Для обеспечения заданной параллельности поверхностей детали принято следующее условие:

$$\Delta_{\parallel} = H_{\text{дет.ф}}^{\max} - H_{\text{дет.ф}}^{\min} \leq T_{\parallel} = a_{\parallel} \cdot T, \quad (13)$$

где Δ_{\parallel} – расчетное отклонение поверхностей детали от параллельности; $H_{\text{дет.ф}}^{\max}$ и $H_{\text{дет.ф}}^{\min}$ – соответственно максимальная и минимальная фактическая высота детали; T_{\parallel} – допуск параллельности; T – допуск на размер детали; a_{\parallel} – коэффициент, устанавливающий соотношение между допуском параллельности и допуском размера.

Модели (9) ... (13) позволяют рассчитать погрешность обработки для любой из описанных выше схем нарушения технологической системы при одноходовом ПТПШ.

Колебания глубины резания и упругого перемещения в технологической системе происходят синхронно колебанию припуска. Однако, из-за жесткости технологической системы амплитуда ее упругих колебаний меньше, чем ампли-

туда колебаний припуска. Поэтому исходная погрешность заготовки копируется на детали в виде эквидистантной погрешности меньшей величины. Эквидистантная погрешность детали уменьшается с увеличением количества рабочих ходов.

Для расчета упругих перемещений, а значит и отклонений размеров, формы, взаимного расположения поверхностей детали после n -го рабочего хода, начиная с первого хода, последовательно учитывались фактические глубины резания и упругие перемещения на всех рабочих ходах.

Расчетная схема для определения упругих перемещений при многоходовом ПГШ показана на рис. 6.

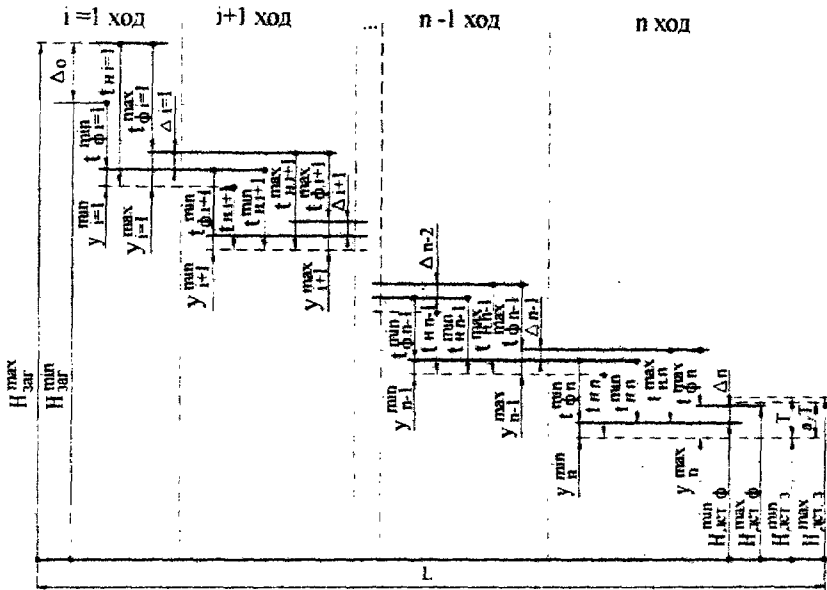


Рис. 6. Расчетная схема для определения упругих перемещений при многоходовом шлифовании

Для расчета упругих перемещений в технологической системе на n -м рабочем ходе многоходового шлифования получены следующие зависимости:

$$y_n^{\max} = t_{Hn} + y_{n-1}^{\max} - \left[\frac{-f^i \cdot B_i + \sqrt{(f^i \cdot B_i)^2 + 4t_{ni}(1+f^i \cdot A_i)}}{2(1+f^i \cdot A_i)} \right]^2, \quad (14)$$

$$y_n^{\min} = t_{Hn} + y_{n-1}^{\min} - \left[\frac{-f^i \cdot B_i + \sqrt{(f^i \cdot B_i)^2 + 4(t_{ni} - \Delta_{n-1})(1+f^i \cdot A_i)}}{2(1+f^i \cdot A_i)} \right]^2. \quad (15)$$

Введение зависимостей (14) и (15) в описанные выше условия (11) ... (13) позволило рассчитать точность обработки при многоходовом шлифовании.

Экспериментальное* определение точности обработки (для сравнения с расчетными значениями) производилось при помощи запатентованного автором способа [37]. Экспериментальные графики зависимости параметров точности обработки от скорости продольной подачи показаны на рис. 7, 8 (сплошные черные точки и треугольники соответствуют расчетным значениям, а не заштрихованные – экспериментальным).

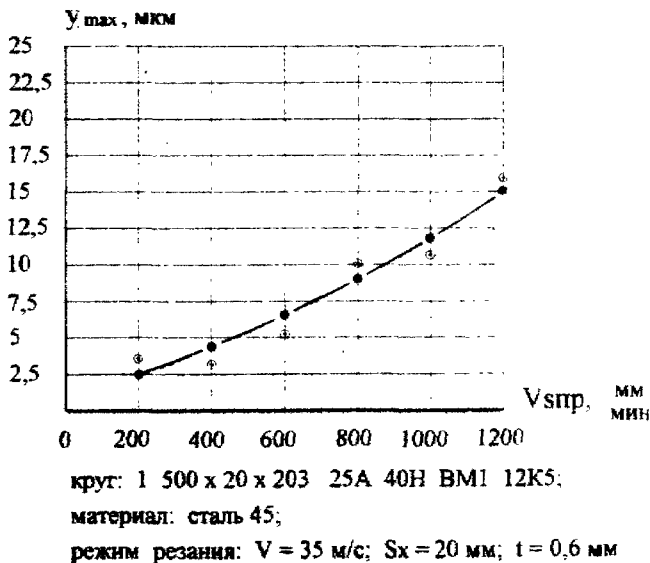
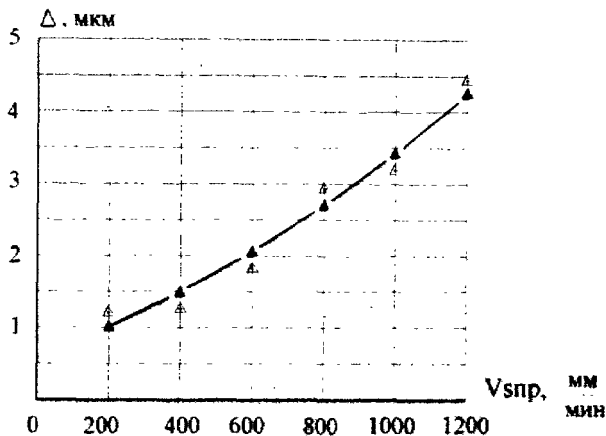


Рис.7. Зависимость отклонений размеров детали от скорости продольной подачи



круг: 1 500 x 20 x 203 25A 40H BM1 12K5;
материал: P18;

режим резания: $V = 35$ м/с; $S_x = 20$ мм; $t_n = 0,6$ мм.

Рис.8. Зависимость отклонений формы детали
от скорости продольной подачи

Расхождение экспериментальных и теоретических значений погрешности обработки составило не более 10 ... 15 %.

Проведенные исследования показали, что при работе с постоянной скоростью продольной подачи (если она не изменяется на протяжении всего рабочего хода) на участках входа и выхода круга из детали образуются «завалы», т.е. отклонение поверхности детали от прямолинейности. Было установлено, что наиболее рациональным методом обеспечения заданной прямолинейности деталей на плоскопрофилешлифовальных станках с ЧПУ является использование переменной скорости продольной подачи, изменение которой производится обратно пропорционально площади контакта круга с заготовкой. Для этого на участках врезания круга в заготовку скорость продольной подачи была рассчитана плавно уменьшающейся, а на участках выхода – плавно увеличивающейся. Это позволило поддерживать силу P_y постоянной по всей длине заготовки.

Расчет оптимальных режимов резания

Полученные силовые и точностные матмодели параметров процесса ПГПШ позволяют рассчитать погрешность обработки и качественные показатели поверхности детали. Однако в технологии машиностроения актуальна обратная задача – назначить максимально допустимые режимы резания, обеспечивающие заданную точность и качество деталей.

Производительность на операциях ПГПШ значительным образом определяется количеством стадий обработки необходимым для достижения заданной точности детали из заготовок той или иной точности. В связи с упругостью технологической системы, обуславливающей наследственность погрешности детали от погрешности заготовки, необходимое количество стадий уточнения заготовки зависит как от свойств самой технологической системы, так и от степени разброса входных параметров заготовки и режимов ее обработки.

Для операций ПГПШ стадии шлифования (предварительная, чистовая и тонкая) приняты по аналогии со стадиями традиционного (маятникового) шлифования, введенными А.Г. Косиловой. При этом в зависимости, главным образом, от требуемой точности и шероховатости поверхности операции ПГПШ могут выполняться в одну (например, предварительную) стадию (т.е. она может быть и окончательной) или в две, или в три стадии.

Для расчета оптимальных режимов резания для каждой стадии ПГПШ разработаны система ограничений и критерий оптимальности.

Для предварительной стадии шлифования доминирующими являются ограничения на режимы резания по точности обработки и шероховатости поверхности, а в ряде случаев по мощности главного привода станка. Для чистовой стадии шлифования доминирующими являются ограничения на режимы резания по точности размеров, формы, взаимного расположения поверхностей деталей и шероховатости поверхности. Для тонкой стадии шлифования доминирующими являются ограничения на режимы резания по точности обработки и шероховатости поверхности детали (или по одному из них).

Критерием оптимальности для всех стадий шлифования выбрана технологическая себестоимость операции, т.е. та часть себестоимости, которая непосредственно зависит от режимов резания:

$$C = F_c \left[\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_{s_i} n p_i} + \sum_{j=1}^m \frac{L_j}{V_{s_j}} \right] + \frac{F_n \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_{s_i} n p_i}}{T} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где F_c – стоимость станкоминуты; L_i – длина i -го рабочего хода; $V_{s\text{ пр } i}$ – скорость продольной подачи на i -м рабочем ходе; n – количество рабочих ходов; L_j – длина j -го вспомогательного хода; $V_{s j}$ – скорость подачи на j -м вспомогательном ходе; m – количество вспомогательных ходов; $F_{\text{и}}$ – затраты на инструмент; T – стойкость инструмента.

Расчет оптимальных режимов резания производился методом динамического программирования.

Область допустимых режимов резания для стадии предварительного шлифования (рис.9) определяется на плоскости линиями ограничений (технических – по диапазону подач станка $V_{s\text{ пр}}^{\text{min}}$ и $V_{s\text{ пр}}^{\text{max}}$, по допустимой мощности резания $t_{\phi, i}^n [N_{\text{р}}^{\text{max}}]$; технологических – по точности размеров $t_{\phi, i}^n [a_{\gamma T}]$, шероховатости поверхности $t_{\phi, i}^n [R_a]$, отсутствию прижога $t_{\phi, i}^n [T_{\Delta i}]$, нессыпаемости круга $t_{\phi, i}^n [P_{\text{доп}}]$). Задача оптимизации заключалась в отыскании в этой области таких $t_{\phi, i}$ и $V_{s\text{ пр } i}$ для которых выбранный критерий оптимальности имеет экстремальное значение ($C \rightarrow \min$).

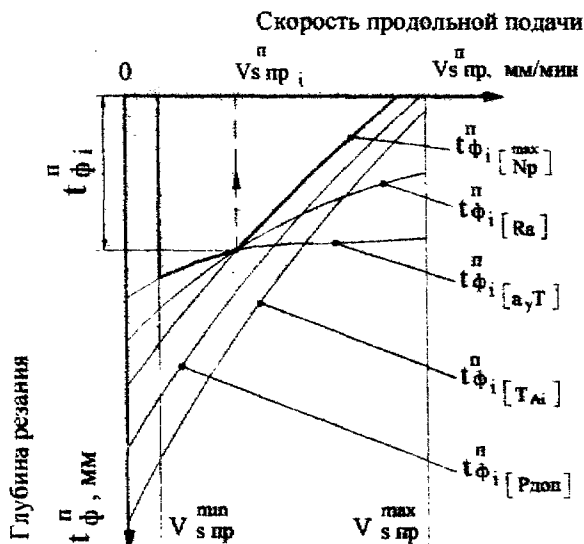


Рис.9. Область допустимых режимов резания для стадии предварительного шлифования

Область допустимых режимов резания для стадии чистового шлифования (рис. 10) определяется на плоскости линиями ограничений (технических – по диапазону подач станка $V_{s\text{пр}}^{\min}$ и $V_{s\text{пр}}^{\max}$; технологических – по точности размеров $t_{\phi 1[a, T]}^{\text{ч}}$, точности формы $t_{\phi 1[T_{\perp}}^{\text{ч}}$ (или точности расположения $t_{\phi 1[T_{\perp}}^{\text{ч}}$), шероховатости поверхности $t_{\phi 1[Ra]}^{\text{ч}}$, по отсутствию прижога $t_{\phi 1[T_{A1}}^{\text{ч}}$, а в ряде случаев – по неосыпаемости круга $t_{\phi 1[P_{\text{доп}}]}^{\text{ч}}$).

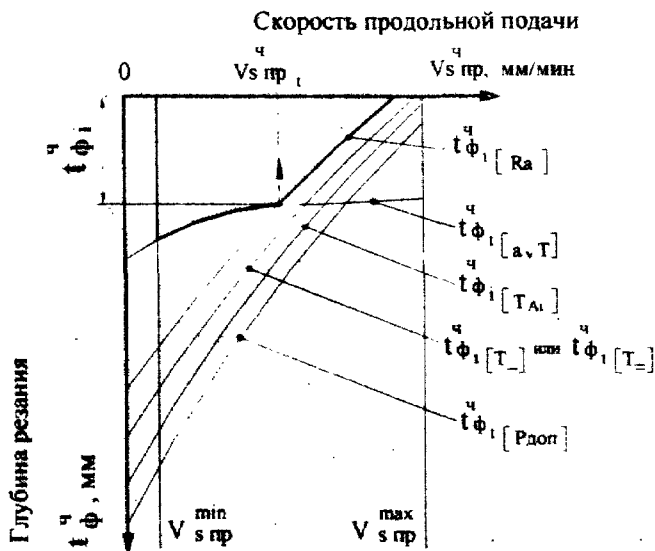


Рис. 10. Область допустимых режимов резания для стадии чистового шлифования

Область допустимых режимов резания для стадии тонкого шлифования (рис. 11) определяется на плоскости линиями ограничений (технических – по диапазону подач станка $V_{s\text{пр}}^{\min}$ и $V_{s\text{пр}}^{\max}$; технологических – по точности формы $t_{\phi 1[T_{\perp}}^{\text{т}}$ (или точности расположения $t_{\phi 1[T_{\perp}}^{\text{т}}$), по шероховатости поверхности $t_{\phi 1[Ra]}^{\text{т}}$ и неосыпаемости круга $t_{\phi 1[P_{\text{доп}}]}^{\text{т}}$).

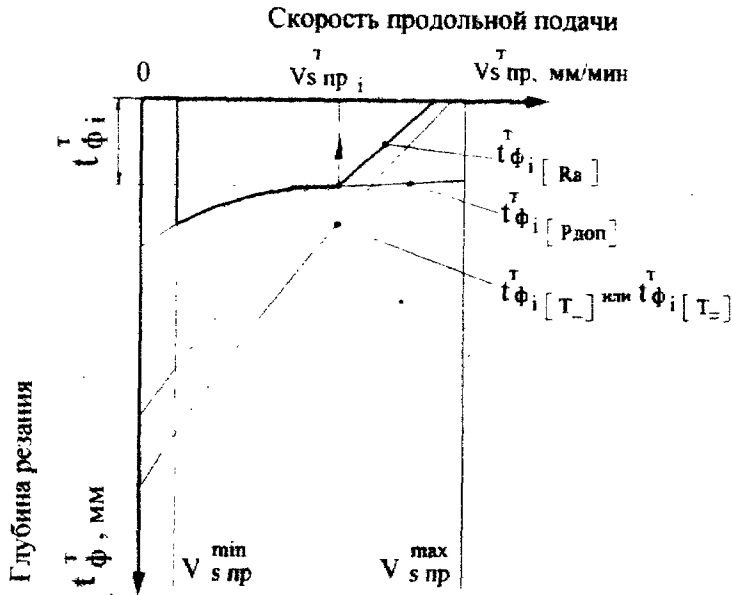


Рис.11. Область допустимых режимов резания
для стадии тонкого шлифования

Задача расчета последовательности стадий ПГПШ и соответствующих им оптимальных режимов резания сводится к дискретной задаче определения кратчайшего варианта уточнений заготовки до заданной точности детали. Данная задача решена методом динамического программирования по рекуррентному уравнению:

$$f_n(S) = \min [C_{sj} + f_{n-1}(j)], \quad \text{при } n=1, 2, 3, 4, \dots, \quad (17)$$

На базе полученных математических моделей сил резания, температуры в зоне шлифования, точности обработки и других ограничений разработана САПР ПГПШ, по которой рассчитаны режимы резания для разных стадий шлифования в широком диапазоне варьирования ограничений и марок обрабатываемых сталей. Пакет программ на выходе заполняет в соответствии с ГОСТ 3.1404 - 86 операционные карты (форма 3 и 5) и впервые автоматически формирует управляющие программы для станков с ЧПУ.

Расчет высокопроизводительных автоматических циклов ПГПШ для станков с ЧПУ

Минимальное время автоматического цикла ПГПШ равно:

$$T_{\text{ца}}^{\text{min}} = T_0^{\text{min}} + T_{\text{мв}}^{\text{min}}, \quad (18)$$

где T_0^{min} – минимальное основное время цикла; $T_{\text{мв}}^{\text{min}}$ – минимальное машинно – вспомогательное время цикла.

Сокращение основного времени цикла T_0 . Одна из проблем ПГПШ заключается в том, что на участках врезания и выхода круга происходит изменение силы резания, что вызывает образование на концах деталей “завалов”, т.е. участков, где горизонтальная образующая обработанной поверхности становится наклонной. Это зачастую приводит к необходимости выполнения дополнительных рабочих ходов. Сущность запатентованного автором способа сокращения числа и времени рабочих ходов [34] заключается в следующем. На участках врезания и выхода круга используется переменная скорость продольной подачи $V_{s \text{ пр}}$. Изменение $V_{s \text{ пр}}$ производится в кадрах управляющей программы (УП) обратно пропорционально силе резания или площади контакта круга с заготовкой. На участке врезания $V_{s \text{ пр}}$ уменьшается от значения вспомогательного хода до значения рабочего хода. На участке выхода $V_{s \text{ пр}}$ увеличивается от значения рабочего хода до значения вспомогательного хода. Использование переменной скорости продольной подачи позволяет стабилизировать интенсивность съема металла, а значит силу резания и натяг в технологической системе. Этот способ позволяет в зависимости от длины шлифования сократить основное время автоматического цикла на 20 ... 50 % и устранить «завалы» на деталях.

Сокращение машинно – вспомогательного времени цикла $T_{\text{мв}}$

Для сокращения времени вспомогательных ходов при ПГПШ разработан и запатентован следующий способ [36]. На операциях ПГПШ с нечетным количеством рабочих ходов сокращение времени вспомогательных ходов достигается путем аннулирования последнего вспомогательного хода, выполняемого шлифовальным кругом для возврата в нулевую точку УП. Это производится за счет остановки шлифовального круга в том месте, где закончился последний рабо-

ный ход и переноса в это место нулевой точки следующей УП. Этот способ позволяет сократить машинно-вспомогательное время цикла на 20 ... 30 %.

Высокая производительность автоматических циклов ПГПШ достигнута главным образом за счет следующих разработок:

1. Расчет оптимальных режимов резания для разных стадий ПГПШ минимизирующих основное время на основе использования разработанных математических моделей основных ограничений (точность, шероховатость, бесприжоговость, неосыпаемость круга).

2. Сокращение времени рабочих ходов за счет применения на участках врезания и выхода круга переменной скорости продольной подачи.

3. Сокращение времени вспомогательных ходов за счет введения в управляющие программы переменных нулевых точек.

Примеры автоматических циклов для предварительной (рис.12), чистовой (рис.13) и тонкой стадий ПГПШ (рис.14) приведены ниже. На графиках линии 1 соответствуют экспериментально подобранным нами циклам внедренным на предприятиях до разработки теории расчета автоматических циклов ПГПШ, а линии 2 – циклам построенным по разработанной теории.

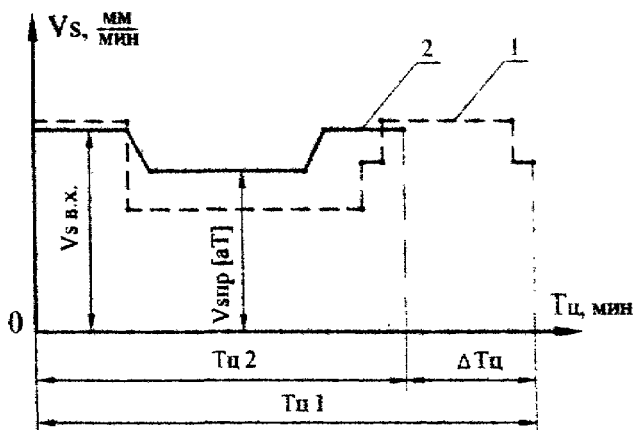


Рис.12. Автоматический цикл с одним рабочим ходом

Автоматический цикл с одним рабочим ходом (предварительной стадия шлифования) рассчитан следующим образом. Скорость продольной подачи, обеспечивающая заданную точность размера $V_{sup(aT)}$ и другие ограничения, рассчитывалась на ЭВМ. Для сокращения основного времени T_0 на участке врезания круга в заготовку производилось плавное уменьшение скорости продольной подачи от значения продольной подачи вспомогательного хода $V_{sv.x}$ до расчетного значения скорости рабочего хода $V_{sup(aT)}$. На участке выхода круга из заготовки производилось плавное увеличение скорости продольной подачи от значения продольной подачи рабочего хода $V_{sup(aT)}$ до значения скорости подачи вспомогательного хода $V_{sv.x}$. [34]. Для сокращения машинно-вспомогательного времени T_{mv} использовался способ смены нулевых точек в управляющих программах [36], т.е. все основные ходы стали рабочими.

Автоматический цикл с двумя рабочими ходами (чистовая стадия шлифования, рис.14) рассчитан следующим образом. Скорости продольных подачи для первого и второго рабочих ходов рассчитывалась на ЭВМ из условия обеспечения заданных ограничений. На первом рабочем ходе на участках врезания и выхода круга использовалась переменная скорость продольной подачи [34].

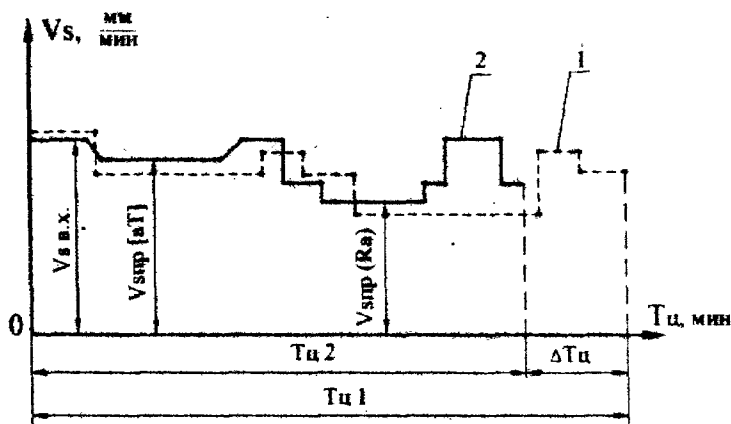


Рис.13. Автоматический цикл с двумя рабочими ходами

Автоматический цикл с тремя рабочими ходами (тонкая стадия шлифования, рис.14) был рассчитан следующим образом. Скорости продольных подач для всех рабочих ходов рассчитывалась на ЭВМ с учетом соответствующих ограничений. Для сокращения машинно-вспомогательного времени был использован способ смены нулевых точек в чередующихся управляющих программах [36].

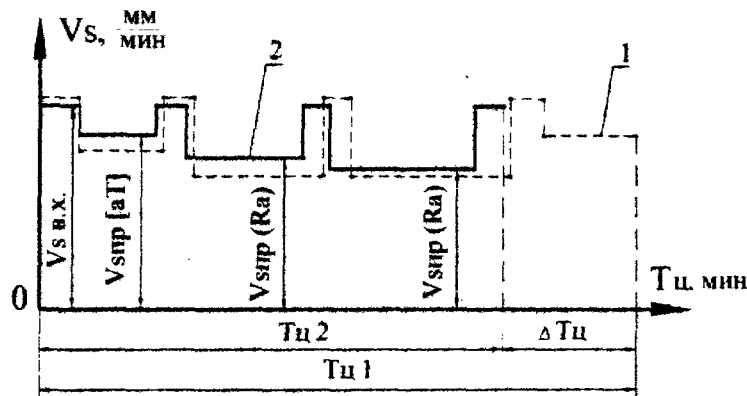


Рис.14. Автоматический цикл с тремя рабочими ходами

Промышленная проверка методики расчета высокопроизводительных автоматических циклов ПТПШ показала, что ее использование позволяет повысить производительность операций, по сравнению с циклами содержащими экспериментально подобранные режимы резания, в 1,3 ... 1,5 раза.

Нормативы режимов резания для операций ПТПШ

Нормативы режимов резания для операций ПТПШ разработаны двух видов: компьютерные и табличные.

Компьютерные нормативы — это пакет программ для расчета режимов резания автоматических многоходовых циклов ПТПШ, обеспечивающих требуемую точность, шероховатость, бесприжоговость и неосыпаемость круга.

Табличные нормативы выполнены в форме карт, по которым определяются характеристики шлифовальных кругов и режимы резания. Обычно набор управляющих программ, с входящими в них режимами резания, осуществляется наладчиком на пульте станка с ЧПУ по таблицам режимов резания, традиционно представленных в нормативах режимов резания. Для этих целей по разработанному пакету программ рассчитаны таблицы режимов резания для операций ПГПШ

Станки для ПГПШ, серийно выпускаемые Липецким станкостроительным заводом и рядом зарубежных фирм, обладают повышенной мощностью главного привода и большой жесткостью. *Введение в нормативы поправок на жесткость и мощность станков* позволяет технологам правильно выбирать оборудования и повышает точность расчета режимов резания.

Современные станки с ЧПУ для ПГПШ имеют четырехкоординатную систему и обеспечивает правку круга алмазным правящим роликом в процессе резания. *Новый параметр обработки* – автоматическая правка шлифовального круга введен в нормативы для ПГПШ. Режим автоматической правки круга зависит от стадии шлифования и характеристик шлифовального круга. Введение в нормативы для ПГПШ режима автоматической правки круга отвечает техническим возможностям станков и обеспечивает повышение эффективности и точности обработки при снижении теплонапряженности процесса.

В существующих нормативах для разных операций шлифования (не для ПГПШ) рекомендованы к применению круги степеней твердости в диапазоне от М2 до Т1. Проведенные исследования и опыт внедрения операций ПГПШ показали, что при предварительном шлифовании наиболее эффективны круги степеней твердости ВМ1 и ВМ2. Поэтому *в новые нормативы для ПГПШ введены круги степеней твердости ВМ1 и ВМ2*, что позволяет значительно повысить производительность предварительной обработки и снизить теплонапряженность процесса.

Нормативы охватывают обработку заготовок из жаропрочных и жаростойких, инструментальных и коррозионностойких, конструкционных и легированных сталей, медных и алюминиевых сплавов, чугунов. Разработанные нормативы предназначены для серийного и мелкосерийного производства.

Общие выводы и результаты работы

1. На базе теории пластического деформирования металла и баланса активных и реактивных сил при шлифовании разработаны аналитические зависимости для расчета тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания при ПТПШ. Полученные силовые зависимости впервые непосредственно учитывают характеристики шлифовального круга (зернистость, твердость, структуру). Путем деления сложного профиля деталей и соответственно профиля шлифовальных кругов на простые по форме участки произведена классификация схем шлифования для ПТПШ. Для каждой схемы шлифования получены формулы для расчета площади контакта круга с заготовкой и интенсивности съема металла. Эти формулы являются составляющими зависимостей для расчета сил резания и таким образом устанавливают влияние формы профилей круга и детали на силы резания. Приоритетность сделанных разработок защищена 3 патентами Российской Федерации [39, 40, 42].

2. Путем решения классического уравнения теплопроводности получена аналитическая зависимость для расчета температуры заготовки при шлифовании. Полученная зависимость позволяет для любого момента времени рассчитать температуру в зоне контакта круга с заготовкой на интересующей глубине от шлифуемой поверхности. На этой основе решены две задачи: рассчитаны пиковые максимальные температуры, по которым проверяется вероятность появления прижога, и температуры самоподогрева для определения интенсивности напряжений σ_1 , т.е. действительного сопротивления разных сталей и сплавов шлифованию.

3. Полученные зависимости для расчета составляющих силы резания и температуры заготовки позволили разработать методику их взаимозависимого расчета: рассчитанная как функция температуры интенсивность напряжений $\sigma_1(t_i, t_j)$ определяет действительное сопротивление металлов шлифованию, т.е. силы резания, а силы резания в свою очередь определяют плотность теплового потока и температуру в поверхностном слое заготовки.

4. При анализе схем шлифования ПТПШ выявлены возможные схемы нагружения технологической системы силами резания. Для каждой схемы нагружения получены аналитические зависимости для расчета податливости технологической системы, которые учитывают конструкцию системы, геометрию входящих в нее элементов и физико-механические свойства материалов, из которых изготовлены эти элементы. Полученные матмодели сил резания и податливости технологической системы позволили разработать теорию и методику расчета точности обработки при одно и многоходовом ПТПШ. Основой расчета

является определение упругих перемещений в технологической системе под действием сил резания. Ограничивающим фактором на величину упругих перемещений принята заданная точность обработки. Приоритетность сделанных разработок защищена 2 патентами Российской Федерации [33, 37].

5. Разработаны системы ограничений на режимы резания для предварительной, чистовой и тонкой стадий ПГПШ. Используемые в системах ограничений матмодели получены на базе выведенных зависимостей для расчета сил резания, температуры в зоне шлифования, точности обработки, бесприжоговости и др. Системы ограничений автономны, что позволяет использовать каждую из них в отдельности (для соответствующей стадии шлифования). При этом системы ограничений совместимы между собой, что дает возможность производить расчет при любом сочетании стадий. В качестве критерия оптимальности принята технологическая себестоимость операции, т.е. себестоимость непосредственно зависящая от режимов резания. В качестве метода расчета оптимальных режимов резания использовано динамическое программирование. На этой основе разработана САПР операций ПГПШ, которая рассчитывает режимы резания для разных стадий шлифования. Разработанная САПР ПГПШ впервые включает блок по расчету управляющих программ, что позволяет выйти на новый технологический уровень – использование самопроектирующих систем для станков с ЧПУ.

6. Для сокращения времени автоматических циклов ПГПШ разработан и запатентован способ сокращения времени рабочих ходов за счет использования на участках врезания и выхода круга переменной скорости продольной подачи [34]. Способ позволяет сократить время рабочих ходов на 20 ... 50 %. Разработан и запатентован способ сокращения времени вспомогательных ходов [36]. Сокращение времени вспомогательных ходов достигается за счет использования переменных нулевых точек в управляющих программах. Способ позволяет сократить время вспомогательных ходов до 30%. На этой основе разработана методика расчета автоматических циклов ПГПШ, которая обеспечивает повышение производительности обработки в 1,2 ... 1,5 раза.

7. На базе пакета прикладных программ разработаны табличные нормативы режимов резания, которые используются для традиционного нормирования операций ПГПШ, выполняемых на станках с ЧПУ. Нормативы внедрены на государственном Челябинском автоматизированно-механическом заводе. В результате внедрения нормативов трудоемкость операций ПГПШ снизилась на 20 ... 30 %.

8. Внедрение ПГПШ вместо традиционных операций в действующие технологические процессы проведено на 5 предприятиях Российской Федерации. В результате внедрения операций ПГПШ производительность обработки на модернизированных участках повысилась в 1,5 ... 2 раза.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Исследование колебаний сил резания при глубинном плоском фасонном шлифовании // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Барнаул: АлПИ, 1989. – С. 50 – 51.

2. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Математическое моделирование процесса плоского глубинного шлифования // Математическое моделирование в машиностроении: Тез. докл. – Куйбышев: КАИ, 1990. – С. 48 – 49.

3. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Особенности процесса резания при плоском глубинном и маятниковом шлифовании // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Сб. науч. тр. – Пенза: ППИ. – 1991. – С.40 – 44.

4. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Повышение производительности и точности обработки плоского глубинного шлифовании: Сб. науч. тр. – Барнаул: АлПИ, 1991. – С.27 – 32.

5. Николаенко А.А., Кулыгин В.Л. Обеспечение точности обработки деталей шлифованием / Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Агропром. – № 7. – 1991. – С.58.

6. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Глубинное шлифование при восстановлении деталей / Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Агропром. – № 10. – 1991. – С.51.

7. Николаенко А.А., Кулыгин В.Л. Абразивные круги для глубинного шлифования // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Агропром. – № 3-4. – 1992. – С.45.

8. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Расчет режимов резания при плоском глубинном шлифовании периферией круга // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Сб. науч. тр. – Пенза: ППИ, 1992. – С.7 – 11.

9. Николаенко А.А. Автоматические циклы профильного глубинного шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – С.27–29.

10. Кулыгин В.Л., Николаенко А.А. Характеристика шлифовальных кругов для глубинного профильного шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – С.29–30.

11. Николаенко А.А., Фадюшин С.А. Влияние профиля шлифовального круга на силы резания // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – С.35–37.

12. Николаенко А.А., Кулыгин В.Л. Техника применения СОЖ при глубинном профильном шлифовании // Смазочно-охлаждающие технологические средства при механической обработке заготовок из различных материалов: Тез. докл. – Ульяновск: УлПИ, 1993. – С.72–75.

13. Николаенко А.А., Фадюшин С.А., Медведев Е.Г. Направление использования глубинного профильного шлифования с правкой круга эльборовыми карандашами // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона: Тез. докл. – Магнитогорск: МГГМИ, 1994. – С.22 – 24.

14. Николаенко А.А. Методика сокращения циклов глубинного профильного шлифования // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – С.45 – 47.

15. Николаенко А.А., Медведев Е.Г. Современная технология глубинного шлифования с применением алмазных и эльборовых роликов // Современные технологии изготовления и сборки изделий: Сб. науч. тр. – Санкт-Петербург: ПИМаш, 1995. – С.37 – 39.

16. Николаенко А.А. Расчет температурных полей при глубинном шлифовании // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С.121 – 124.

17. Николаенко А.А. Разработка методики поэтапного, взаимозависимого расчета сил резания и температурного поля заготовки при глубинном шлифовании: Тез. докл. – Рыбинск: РГАТА, 1996. – С.69–70

18. Николаенко А.А. Разработка циклов глубинного профильного шлифования, обеспечивающих повышение производительности и точности обработки // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 3020–В94, 1994. – С.9.

19. Николаенко А.А. Нормирование операций профильного глубинного шлифования // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 3022–В94, 1994. – С.10.

20. Николаенко А.А. Ограничения накладываемые на режимы резания при профильном глубинном шлифовании // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 3376–В95, 1995. – С.13.

21. Николаенко А.А. Моделирование и расчет упругих перемещений технологической системы при глубинном шлифовании. // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 3377–В95, 1995. – С.11.
22. Николаенко А.А. САПР операций профильного глубинного шлифования // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 1154–В95, 1995. – С.14.
23. Николаенко А.А. Расчет податливости технологической системы при профильном глубинном шлифовании // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 1155–В95, 1995. – С.10.
24. Николаенко А.А. Использование ЭВМ для операций профильного шлифования // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 1156–В95, 1995. – С.8
25. Николаенко А.А. Контроль размеров деталей после глубинного шлифования // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 1235–В96, 1996. – С.15.
26. Николаенко А.А. Разработка нормативных материалов для назначения режимов резания на операциях глубинного профильного шлифования // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 1236–В96, 1996. – С.38.
27. Николаенко А.А. Уровни оптимизации режимов резания для операций глубинного профильного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1997. – С.88 – 91.
28. Николаенко А.А., Савинская В.Г. Методика определения компонентов абразивной смеси для шлифовальных кругов, используемых при обработке труднообрабатываемых материалов // Депонированные рукописи – М.: ВИНТИ, № 835–В97, 1997. – С.14.
29. Николаенко А.А. Повышение производительности и точности обработки при профильном глубинном шлифовании // Вестник машиностроения, N 2.- 1997. – С.21 – 23.
30. Николаенко А.А. Технология глубинного профильного шлифования и ее перспективы: Тез. докл. – Челябинск: ЮжУралЭКСПО, 1997. – С.49.
31. Николаенко А.А. Этапы обработки в операциях плоского глубинного профильного шлифования // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С.30 – 33.
32. Николаенко А.А. Стадии обработки для операций плоского глубинного профильного шлифования // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и управляющей обработки в машиностроении: : Сб. научн. тр. – Пермь: ПГТУ, 1998. – С.20 – 26.

33. Патент СССР № 1833249, В23 В25/00. Устройство для определения жесткости шпинделей / В.Л.Кулыгин, А.А.Николаенко – М.: ГОСПАТЕНТ СССР, 1993.

34. Патент РФ № 2014209, В24 В51/00. Способ автоматического управления плоским глубинным шлифованием периферией круга / В.Л.Кулыгин, А.А.Николаенко – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1994.

35. Патент РФ № 2069483, В24 D5/06. Сборный шлифовальный инструмент / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова, В.Г.Савинская – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1996.

36. Патент РФ № 2080983, В24 В51/00. Способ плоского глубинного шлифования с нечетным количеством рабочих ходов / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова, О.С.Фадюшни – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1996.

37. Патент РФ № 2087293, В24 В51/00. Способ определения погрешности формируемых размеров детали на заданном режиме обработки при плоском глубинном профильном шлифовании / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова, О.С.Фадюшни – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1996.

38. Патент РФ № 2071901, В24 В51/00. Способ торцевого двустороннего шлифования / В.Г.Савинская, А.М.Сарайкии, А.А.Николаенко, Г.В.Лебедев – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1996.

39. Патент РФ № 2086938, G24 L5/12. Способ определения радиальной составляющей силы резания при глубинном плоском шлифовании периферией круга / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1997.

40. Патент РФ № 2084867, G24 N19/02. Способ определения коэффициента трения при плоском шлифовании периферией круга / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1997.

41. Патент РФ № 208881, G01 L05/13. Способ определения максимально допустимого по мощности привода шпинделя значения главной составляющей силы резания при плоском шлифовании / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова, В.Г.Савинская. – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1997.

42. Патент РФ № 2099173, В24 В51/00. Способ определения коэффициента, учитывающего влияние СОЖ на силы резания при плоском глубинном профильном шлифовании периферией круга / А.А.Николаенко, Н.В.Сырейщикова, О.С.Фадюшни – М.: Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1997.

НИКОЛАЕНКО АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПЛОСКОГО ГЛУБИННОГО
ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ**

Специальность 05.02.08 — “Технология машиностроения”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ЛР N 020364 от 10. 04. 97. Подписано в печать 23.09.98. Формат
60 * 84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2.09. Уч.-изд. л. 2.
Тираж 80 экз. Заказ 251/343

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.