

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Севастопольский государственный технический университет

На правах рукописи

Торлин Вадим Николаевич

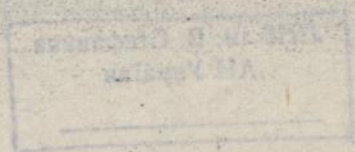
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
САМОНАСТРОЙКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЦНЧ ШЛИФОВАНИИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
НА СТАНКАХ С ЧПУ

Специальность: 05.13.07 - автоматизация
технологических процессов
и производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Севастополь, 1995 г.





00778514 (W)

Диссертацией является рукопись
 Работа выполнена в Севастопольском государственном университете. Научный консультант: доктор технических наук Украины, академик АИИ Украины, доктор технических наук профессор Остафьев Владимир Александрович.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук,
 профессор Костомаров Эдгар Филиппович
2. Доктор технических наук,
 профессор Якубов Февзи Якубович
3. Доктор технических наук,
 старший научный сотрудник Бачурина Майя Дмитриевна

Ведущая организация:

институт проблем машиностроения ЧАН Украины (г. Харьков)

Защита состоялась "16" февраля 1995 г. в _____ час и.
 заседании специализированного ученого совета ДИ.03.01 в Севастопольском государственном техническом университете по адресу:
 335053 г. Севастополь, СевГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СевГУ.

Автор берет разослан "13" августа 1995 г.

Ученый секретарь специализированного совета

кандидат техн. наук, доцент

А.Н. Шерешевский

ЛНБ ім. В. Стефаніка
 АН України

В-31.748

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Проблема автоматизации операций абразивной обработки является наиболее сложной и трудноразрешимой среди проблем автоматизации механообрабатывающего производства. Наибольшие трудности возникают при автоматизации шлифования деталей машин, имеющих сложные поверхности таких как валки прокатных станов, клапаны двигателей внутреннего сгорания, лопатки турбин, детали с R_{ii} - профилями, ходовые винты и червяки, фасонный металлорезающий инструмент, детали штампов, прессформ и т.д.

Сложность обеспечения заданных параметров точности и качества в данном случае заключается в том, что при движении по криволинейной траектории абразивный инструмент подвергается действию сил, переменных по величине и направлению, и постоянно меняется величина площадки контакта его с деталью, что обуславливает непрерывный износ, изменения формы и режущей способности инструмента.

Наиболее универсальным и перспективным способом решения проблемы является применение прямого числового программного управления движением инструмента, но как показывает опыт эксплуатации шлифовальных станков с ЧПУ для обеспечения точности и качества обработки в этом случае требуется нетрадиционный подход к разработке методов и алгоритмов управления. Действительно, существующие методы будут малоэффективны, т.к. основаны на принципах стабилизации силовых и температурных параметров, переменных при обработке сложных поверхностей. В связи с чем возникает необходимость разработки концепций, позволяющих формулировать критерии управления, инвариантные к природе внешних воздействий и обеспечивающие компенсацию возмущений, как систематического, так и случайного характера. Технологическая система, реализующая такую концепцию, будет обладать свойствами самонастройки и адап-

тации к изменяющимся условиям, что позволит в конечном итоге выполнять с помощью таких систем шлифование сложных поверхностей в автоматических станочных системах наряду с другими операциями.

В связи с вышесказанным разработка методов самонастройки технологических систем, выполняющих шлифование сложных поверхностей средствами ЧПУ, является актуальной научной проблемой, имеющей большое народнохозяйственное значение.

Работа выполнена в соответствии с координатным планом АН УССР на 1986 - 90 гг по теме РН16.С5.Ц9.52 "Разработка методов и средств шлифования и заточки инструмента на базе линии станков с ЧПУ", номер госрегистрации №01860127256.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состоит в разработке концепции и методов самонастройки технологических систем, осуществляющих абразивную обработку поверхностей деталей машин сложной конфигурации на программноуправляемом оборудовании, обеспечивающих заданные показатели производительности и качества обработки в автоматизированном производстве.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработка концепции управляемого разрушения поверхности абразивного инструмента.

2. Разработка методов исследования и математических моделей элементов технологической системы, содержащей абразивный инструмент, базирующихся на основе фундаментальных решений краевых задач математической физики.

3. Разработка и исследование методов самонастройки технологических систем, осуществляющих абразивную обработку сложных поверхностей, основанных на концепции управляемого разрушения поверхности абразивного инструмента.

4. Разработка эффективных алгоритмов адаптивного управления

шлифовальными станками с ЧПУ.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Разработанные методы исследования, математические модели и алгоритмы управления основаны на фундаментальных решениях краевых задач математической физики для различных звеньев объекта управления и соответствующих процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных четвертого порядка с переменными коэффициентами. Для исследования поведения тел сложной конфигурации использовался метод конечных элементов, как вариационный метод математической теории упругости. При решении задач оптимизации применялись методы теории исследования операций (задача нелинейного программирования). Экспериментальная проверка полученных результатов осуществлялась с использованием оригинальных устройств, защищенных авторскими свидетельствами, на высокоточных станках.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложен подход, позволяющий разрабатывать методы и алгоритмы самонастройки технологических систем, осуществляющих абразивную обработку сложных поверхностей на станках с ЧПУ, в основе которого лежит разработанная и доказанная концепция управляемого разрушения поверхности абразивного инструмента.

2. Получены фундаментальные решения краевых задач математической физики для различных звеньев объекта управления и соответствующих процессов, на базе которых разработаны методы исследования и управления технологическими системами, содержащими абразивный инструмент.

3. С помощью разработанных методов получены результаты:

а) определены условия управляемого распространения трещин в абразивном зерне под действием силовой и температурной нагрузок;

б) определены условия управляемого разрушения связки, удерживающей зерно;

в) исследовано влияние зернистости, структуры, пористости, глубины заделки зерен, физико-механических свойств абразивного зерна и связующего, а также режимов обработки на механизм разрушения активной зоны инструмента;

г) установлена функциональная зависимость между ростом силы резания при износе инструмента и увеличением угла χ на активных зернах.

4. Разработаны критерии и алгоритмы самонастройки технологических систем, удерживающих абразивный инструмент, позволяющие компенсировать систематические и случайные возмущающие воздействия, возникающие при обработке сложных поверхностей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТ. Разработанные методы, модели, алгоритмы и управляющие программы позволили автоматизировать процессы настройки, наладки и обработки на станках с ЧПУ деталей, имеющих сложные поверхности большой протяженности. Самонастройка технологической системы в процессе обработки позволяет повысить качество шлифуемых поверхностей, а сокращение простоев станка и поднастройку и правку инструмента повышает производительность дорогостоящего оборудования в 2 - 2,5 раза. Разработанное программное обеспечение реализовано в технологической системе ИНСАП - П, предназначенной для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Инженерные методики исследования износа инструмента и практические рекомендации по методам настройки шлифовальных станков с ЧПУ использованы в разработках темы №16.05.Ц9.52 "Разработка методов и средств шлифования и заточки инструмента на базе линии станков с ЧПУ" координационного плана АН УССР на 1986 - 90 гг (Г.Р. №01860127256).

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РА. Мл. Результаты, полученные в

диссертационной работе, использовались при разработке технологической системы ТЕХИСИ (департамент САПР Севастопольского приборостроительного института, 1990г) и интеллектуальной системы автоматизированного проектирования ИКСАП - II (СИИ, 1993г.), на предприятия: завод "Орион", г.Симферополь Мелитопольский моторный завод, Новокаховский электромашзавод, ПП морской завод им. С.Орджоникидзе, г.Севастополь. Общий экономический эффект от внедрения программного обеспечения и управляющих программ составил 400 тыс р.б. (в ценах 1990 г.) Часть результатов используется в учебном процессе по дисциплинам, закрепленным за департаментом САПР СевИТУ.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения работы докладывались на Всесоюзных конференциях: по резанию металлов, г.Жданов, 1980г, "Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов", г.Харьков, 1981г, по технологии металлообработки, г.Челябинск, 1983г, по технологии чистовой и отделочной обработки, г.Барнаул, 1985г, "Оптимизация процессов алмазно-абразивной обработки", г.Золгоград, - 1986г, "Конструкторско-технологическая информатизация, автоматизированное создание машин и технологий", г.Москва, 1987г, "Технологическое обеспечение станков с ЧПУ и ПЧ", г.Челябинск, 1988г, "Повышение надежности технологических средств как основа создания ПЧ", г.Москва, 1988г, на Республиканской конференции "Повышение производительности и качества продукции в условиях ПЧ", г.Севастополь, 1988г, на Международной конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук", г.Москва, 1991г, на научно-технической конференции "Высокоточная керамика", г.Севастополь, 1993г, а также на научных конференциях профессорско-преподавательского состава СПИ 1977 - 92 гг.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликованы 32 работы, в том числе одна монография и три авторских свидетельства, результаты диссертации отражены в восьми отчетах по НИР.

С. СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Изложена на 252 страницах (введение, 7 глав, заключение, список литературы 146 наименований, приложения). Содержит 55 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Появление шлифовальных станков с ЧПУ, оснащенных УЧПУ типа CNC на базе персональных ЭВМ создает реальные предпосылки для комплексной автоматизации операций шлифования сложных поверхностей, наиболее трудоемких среди операций механической обработки деталей машин. Сложность процесса шлифования обуславливает необходимость непрерывного слежения за состоянием параметров технологической системы, что обычно исполняет рабочий. При обнаружении отклонений он принимает решения по регулировке системы. В связи с чем устранение рабочего из процесса порождает проблему разработки алгоритмов, позволяющих системе управления выполнять названные функции. Обеспечение при этом высокого уровня производительности и качества обработки требует решения комплекса задач, связанных разработкой специальных методов непрерывной самоподстройки технологической системы, учитывающих особенности технологии, оборудования и инструмента. Фундаментальным исследованиям в этой области посвящены работы Базрова Б.М., Байгулова И.К., Бокучава Г.В., Гавриша А.И., Грабченко А.И., Королева А.В., Корчаг С.И., Кудинова В.А., Маслова Е.И., Митрофанова Б.Г.,

Михелькевича Р.И., Новоселова Б.К., Остафьевич В.А., Ратникова В.А., Резникова А.Н., Силина С.С., Тьерского М.М., Филимонова Л.Н., Якимова А.В., Якубова Ф.Я. и др., в которых разработаны основы теории шлифования и технологические предпосылки автоматизации этих процессов. Описанные в этих работах алгоритмы адаптивного управления шлифованием в основном базируются на принципах стабилизации силовых и температурных параметров. При обработке сложных поверхностей силы резания и другие параметры являются функцией координат, в связи с чем для управления процессами в данном случае требуется разрабатывать критерии, инвариантные изменяющимся внешним условиям и позволяющие компенсировать при этом возмущения, вызванные износом инструмента.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в этом направлении ведутся интенсивные исследования. Разработано множество критериев управления процессами шлифования, которые представляют собой алгебраические выражения из таких параметров как скорость резания, мощность, силы резания, крутящий момент и т.д. Но т.к. эти выражения не имеют определенного физического смысла, то при определении их критических значений возникает неопределенность. Решение проблемы следует искать в разработке комплексных показателей процесса, имеющих четкий физический смысл и связывающих большинство параметров процесса. Для реализации такого подхода необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать концепцию формирования критериев управления процессом шлифования сложных поверхностей, наиболее полно отражающую характер физико-механических процессов, происходящих в технологической системе и позволяющую обеспечить заданные показатели качества обработки в автоматизированном производстве.
2. Разработать методы анализа и соответствующие математи-

ческие модели элементов технологической системы, позволяющие установить аналитические зависимости между входными и выходными параметрами, обеспечивающими заданную точность вычислений.

3. Разработать методы оптимизации состояния технологической системы с учетом ограничений по установленным физическим закономерностям.

4. Разработать и исследовать методы и алгоритмы самонастройки технологических систем, осуществляющих автоматизированную обработку сложных поверхностей на проточно-управляемом оборудовании.

5. Разработать методы и алгоритмы автоматизации наладки шлифовальных станков с ЧПУ.

6. Провести экспериментальную проверку полученных результатов и внедрить их в производство.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для решения поставленных задач был разработан комплекс математических моделей, описывающих типовые элементы технологической системы и происходящие в ней процессы. Технологическая система шлифовального станка представлена набором упругодеформируемых тел сложной конфигурации: шпиндельная бабка, шпиндель с подшипниками, шлифовальный круг как упругое неоднородное цилиндрическое тело, состоящее из композиционного материала, единичное абразивное зерно, удерживаемое связкой, набор зерен в связке содержащей поры, технологические трещины, включения. Анализ выполнен для методов механики твердого деформируемого тела, в связи с чем были решены краевые задачи математической физики в следующей постановке. Для системы единичное зерно - связка интегрируется уравнение теплопроводности в биполярных координатах

натах d, β :

$$(\operatorname{ch} d + \cos \beta)^2 \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial d^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial \beta^2} \right) = \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \tau^2}, \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

где T_i - температурное поле в i -ой фазе, α - коэффициент температуропроводности, β - размерный параметр биполярных координат, τ - время.

Начальное условие задачи

$$T_1(d, \beta, 0) = T_2(d, \beta, 0) = T_0 \quad (2)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} T_1(d, \delta_1) &= \Theta_1^0(d), \\ T_2(d, \delta_3) &= \Theta_2^0(d), \\ T_1(d, \delta_2) &= T_2(d, \delta_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где T_1 - температурное поле в зерне, T_2 - в связке, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - их границы, Θ_1^0, Θ_2^0 - температура на поверхности зерна и связки.

Температурные напряжения в зерне, связке и на их границах определяются из системы уравнений

$$\left(\frac{\partial^4}{\partial d^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial d^2 \partial \beta^2} + \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} - 2 \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} + 1 \right) \left(\frac{\psi_i}{\lambda} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial d^2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) \psi_i = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \alpha_i T_i.$$

Здесь λ - коэффициент Ляме; ψ_i, Ψ_i - сгармоническая и гармоническая функции, ν_i, α_i - коэффициент Пуассона и теплопроводности i -ой фазы, T_i - температурное поле, найденное в задаче (1) - (3). На границах заданы распределенные нагрузки - нормальная $q_N(d)$ и тангенциальная $q_T(d)$.

Решение задачи теплопроводности получено в виде

$$\begin{aligned} T_i(d, \beta, \tau) &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [A_{ink} f_{ink}(\beta) + B_{ink} p_{ink}(\beta)] \times \\ &\times \exp(in d) \exp(k \tau), \quad (i = 1, 2). \end{aligned} \quad (5)$$

Функции $f_{in\bar{k}}$ и $\bar{h}_{in\bar{k}}$ находятся из двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (уравнения Хилля), для постоянных интегрирования $A_{in\bar{k}}$ и $B_{in\bar{k}}$ условия (2) - (3) дают простую систему алгебраических уравнений.

Решения задачи (4) найдено в виде

$$\frac{\Psi_i}{h} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_m f_{mn}(\beta) e^{in\alpha}, \quad (m=1,2,3, \dots),$$

$$\Psi_i = \sum_{k=1}^{\infty} [P_k(\beta) \cos k\beta + Q_k(\beta) \sin k\beta]. \quad (6)$$

Здесь A_{mn} - коэффициенты, определяемые из системы алгебраических уравнений, f_{mn} - набор гиперболических функций, P_k, Q_k - определяются из уравнений Эйлера. Через функцию напряжений определяются компоненты напряженного состояния $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, с помощью которых бы определены перемещения u и v , а также интенсивность напряжений σ_i . Исследована сходимость рядов (6), показано, что при $n=6$ (тоже по k) процесс приближения стабилизируется и далее увеличение n влияет только на четвертую значащую цифру после занятой (0.01%). Разработанная таким образом модель с диничным зерном была далее трансформирована т.к. в таких моделях обычно не учитывается: а) влияние соседних зерен и расстояния между ними (концентрация); б) влияние пор и включений; в) влияние технологических трещин. Исследование влияния указанных факторов, а также глубины заделки и формы зерен было проведено с помощью метода конечных элементов, при этом использовалась программа ИИМ НАН Украины. Методика исследования заключается в следующем. Сначала с помощью МКЭ проводятся численные эксперименты для различных структур абразивных кругов, размеров зерен, типа связей, пористости др. параметров, варьируемых в широких пределах. Получаемые при этом численные значения переменных затем интерполируются с помощью метода наимень-

ших квадратов тепенными зависимостями. Фрагмент абразивного пространства, исследуемый методом конечных элементов, представлен на рис. 1, где 1,2,4,5,6,7 - зерна основной фракции, 3 - связка, 8 - включение, 9 - 12 - поры, 13 - технологическая трещина в связке, 14 - в зерне. Здесь же дана картина распределения интенсивности напряжений σ_{ij} , осложненная наличием пор, включений и соседних зерен. Заданием различных значений координат узлов сетки конечных элементов можно варьировать геометрию чешки паг метр. (размеры зерен и расстояния между ними, размеры пор и т.д.). В массивах исходных данных задаются также физико-механические свойства компонентов, при этом значения силовых и температурных нагрузок. Анализ картины напряженно-деформированного состояния позволяет определить, зерне и связке точки, в которых может начаться рост технологических трещин, при этом возможность роста каждой трещины определяется коэффициентом интенсивности K_I , который является функцией напряжений (перемещений): $K_I = f(U_{ij})$, где U_{ij} - перемещения в направлении нормали к вектору скорости резания. С помощью данных (первичных) моделей было исследовано влияние на величину K_I в зерне и связке характеристик абразивного инструмента и режимов резания. Зависимости K_I от номера структуры и зернистости представлены на рис. 2 (круг 24A25CM145; обрабатываемый материал сталь 40X). Кривые 1 - 4 для связки и кривые 5 - 8 для зерна соответствуют зернистости 50,40,25,16. На рис. 3 представлены зависимости от скорости и глубины резания. Кривые 1-3 для связки и 4-6 для зерна определены при следующих значениях глубины резания: 0.06 мм, 0.4 мм, 0.02 мм.

Интерполируя данные численных экспериментов с помощью метода наименьших квадратов получим зависимости

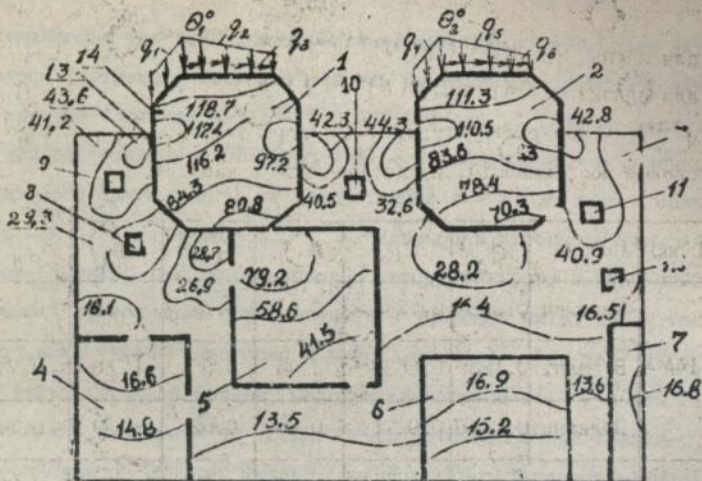


Рис. 1. Фрагмент образивного пространства, исследуемый методом к нечичным элементам

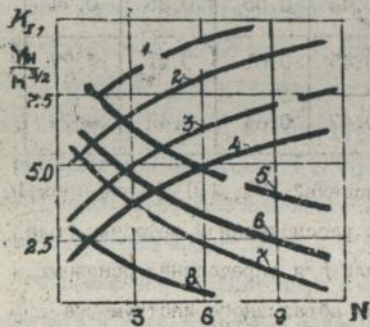


Рис. 2. Зависимость K_1 в зерне и связке от номера структуры и зернистости

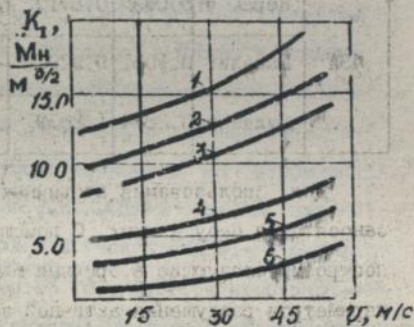


Рис. 3. Зависимость K_1 в зерне и связке от скорости разлива

- для зерна $K_I' = C_z(N)^{d_1}(\xi)^{d_2}$, (7)

- для связки $K_I'' = C_{сб}(N)^{d_3}(\xi)^{d_4}$, (8)

где N - номер структуры, ξ - зернистость, $C_z, C_{сб}, d_1$ - числовые коэффициенты, представленные в табл. I.

Таблица I

Э до	Связка	C_z	$C_{сб}$	d_1	d_2	d_3	d_4
14А	Керамич.	0.0254	0.7243	0.41	0.57	0.36	0.72
	Бг эли.	0.1236	0.8638	0.44	0.57	0.38	0.71
	Вулканит	0.2448	0.9271	0.46	0.62	0.39	0.74
24А	Керамич.	0.0872	0.7666	0.42	0.57	0.37	0.75
	Бакелит.	0.1499	0.8917	0.44	0.59	0.39	0.75
	Вулканит	0.2627	0.1738	0.47	0.63	0.42	0.76
43А	Керам. ч.	0.0937	0.8719	0.45	0.58	0.38	0.74
	Бакелит.	0.1561	0.9296	0.45	0.61	0.41	0.77
	Вулканит	0.2884	1.2639	0.47	0.64	0.42	0.79

Для использования вторичных моделей (7), (8) данные табл. I заносятся в базу данных. С помощью рассмотренной методики были построены следующие вторичные модели для определения основных параметров разрушения активной зоны абразивного инструмента

$$K_I' = C_k' P_N^{m_1} v_{кр}^{m_2} v_g^{m_3} S^{m_4} t^{m_5}, \quad (9)$$

$$K_I'' = C_k'' P_y^{k_1} P_z^{k_2} v_{кр}^{k_3} v_g^{k_4} S^{k_5} t^{k_6}, \quad (10)$$

$$C = C_k''' P_y^{q_1} P_z^{q_2} v_{кр}^{q_3} v_g^{q_4} S^{q_5} t^{q_6}, \quad (11)$$

$$\epsilon_k = C_\epsilon d_z^{k_1} K^{k_2} S_{np}^{k_3} S_{non}^{k_4} v_{рез}^{k_5} (1+p)^{k_6} (1+N_b)^{k_7}, \quad (12)$$

$$\delta_i = C_\gamma P_N^{n_1} v_{кр}^{n_2} v_q^{n_3} S^{n_4} t^{n_5} \quad (13)$$

Здесь обозначено K_I^I, K_{II}^{II} - коэффициенты интенсивности с - ти напряжений в зерне и связке (керамической), β_i - интен - сивность напряжений в пластичных связках, ϵ_k - относительная критическая заделка зерна, f_i - текущие значения переднего угла на активных зернах, P_N, P_γ, σ_x - нормальная, ради - альная и тангенциальная составляющие сил резания, $v_{рез}, v_{кр}, v_q$ - скорости резания, круга и детали, S - продольная пода - ча, t - глубина резания, d_z - характерный размер зерна, K - концентрация, P - пористость, N_b - содержание включений в связ - ке, $C_i, m_i, k_i, q, \chi_i, n_i$ - массив числовых парамет - ров вторичных моделей.

Для построения макромодели шлифовального круга, как неоднородного цилиндрического тела, с толщого из композиционного ма - териала, было проинтегрировано уравнение

$$\begin{aligned} E_0 \nabla^2 \nabla^2 \varphi = & \frac{2}{3} (f_r' \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 \varphi + \frac{1}{r^2} f_\theta' \frac{\partial}{\partial \theta} \nabla^2 \varphi) + \\ & + \frac{1}{r^2} (f_r'' + \frac{1}{r} f_\theta'' - \frac{2}{r} (f_\theta')^2) L_1 \varphi + \frac{1}{r^2} [f_r f_r'' - \\ & - 2(f_r')^2] L_2 \varphi + \frac{2}{r^2} \frac{1+v}{f^2} [f (f_{r\theta}'' - \frac{1}{r} f_\theta') - \\ & - 2 f_r' f_\theta'] L_3 \varphi + f \nabla^2 (d_r \varphi) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} L_1 = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - v \frac{\partial^2}{\partial r^2}, \quad L_2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} - v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right), \quad L_3 = \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \end{aligned}$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \text{при } r=R \quad \sigma_r &= q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cos n\theta, \\ \text{при } r=r \quad \sigma_r &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где φ - функция напряжений термоупругой задачи, f, f_r, f'_θ - функция распределения упругих свойств и ее производные, E_0, ν, α - физико-механические свойства композиционного материала круга, рассчитанные по правилу смесей, R, r - наружный и внутренний радиусы круга, q_n - нагрузка в зоне контакта с деталью, φ, r, θ - функция термоупругих напряжений, r, θ - полярные координаты. В результате было получено и исследовано аналитическое решение задачи

$$\begin{aligned} \sigma_r(r, \theta) &= \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 (b^2 + a - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2) + (\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - \int_a^b T r dr) \frac{d_1 E_0}{r^2} + \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \times \\ &\times (\frac{1+\nu}{4} a_1 b_0 (\frac{1}{b} - \frac{1}{a}) + b_1 (\frac{a_0}{b^2} \ln \frac{b}{a} + \gamma \ln \frac{b}{a})) \cos \theta + \\ &+ \frac{1-\nu}{4} b_0 (\frac{4}{3} a_1 (b-a) - \frac{3}{4} a_2 (b^2 - a^2)) - b_1 \times \\ &\times (a_0 \frac{\ln(ba)}{2} \ln \frac{b}{a}) + \frac{a^2}{b^2 - a^2} ((1+\nu) \frac{a_0}{2} \frac{\ln^2 a}{2} - 5 \ln a) - \\ &- \frac{a^2}{2} (3(\ln a)^2 + \gamma \ln a + \frac{5}{2}) \cos \theta, \\ \sigma_\theta(r, \theta) &= \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 (b^2 - a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+3\nu}{3+\nu} r^2) + \\ &+ (\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \int_a^b T r dr - T r^2) \frac{d_1 E_0}{r^2} - \\ &- \frac{a^2 b}{b^2 - a^2} (\frac{1+\nu}{4} a_1 b_0 (\frac{1}{b} - \frac{1}{a}) + b_1 (\frac{a_0}{b^2} (\frac{5(\ln b)^2}{2} - \\ &- 5 \ln b + 1) - \frac{a_0}{a^2} (\frac{3(\ln a)^2}{2} - 5 \ln a + 1)) \cos \theta + \\ &+ \frac{1-\nu}{4} b_0 (\frac{4}{3} a_1 (b-a) - \frac{3}{4} a_2 (b^2 - a^2)) + b_1 (\frac{a_0}{2} \frac{\ln(ba)}{2} \times \\ &\times \ln \frac{b}{a} + a^2 (b^2 - a^2)) \cos \theta, \\ \tau_{r\theta}(r, \theta) &= \frac{1+\nu}{2} \rho \omega^2 (b^2 - a^2) + \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \\ &+ \int_a^b T r dr) d_1 E_0 + \frac{1+\nu}{4} b_1 (\ln^2 r - 5 \ln r + 1) - \frac{a^2}{2} \times \\ &\times (3 \ln^2 r + 7 \ln r + 15) + \frac{1-\nu}{4} (a_0 (\frac{\ln^2 r}{2} - i) + a^2) \times \\ &\times \sin \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Анализ деформаций звеньев размерной цепи: шлифовальный круг - шпиндельный вал - подшипники - корпус шпиндельной бабки - ходовой винт-гайка - станина произведен по специально разработанной методике декомпозиции и анализа сложных объектов, заключающейся в следующем. Распределенная силовая и температурная нагрузки прикладываются к первому звену цепи (шлифовальный круг). Определяются собственные деформации звена при нулевых перемещениях на границе контактирования его со следующим звеном. Далее определяется действительная площадь контакта звеньев и контактные напряжения первой задачи принимаются в качестве исходных граничных условий второй задачи, что позволяет определить собственные деформации второго тела и условия контакта между вторым и третьим телом и т.д. На рис. 4 представлен фрагмент замкнутой контактной цепи в момент взаимодействия шпиндельного вала с подшипником. По линии АВ подшипник контактирует с валом, а линии ВГ - с корпусом. По специальной методике определена действительная площадь контакта вала с подшипником (по дуге А'В'), затем решением задачи для подшипника АВГ определены напряжения на линии ВГ (в точках закрепления I-Г'), которые будут служить нагрузкой для следующего звена размерной цепи. Деформации корпусной детали при действии нагрузки $P_y = P_0 \cos \omega \tau$, где τ - время, представлены на рис. 5, при этом минимуму силового и температурного воздействия соответствуют точки В', Г', а максимуму - В'', Г''. Используя метод конечных элементов для численного моделирования рассмотренных процессов, мы затем по результатам счета строим вторичные модели деформации звеньев в вид

$$u_y = a_{ij} \theta^0 + b_{ij} P(\tau), \quad (1)$$

$$u_x = c_{ij} \theta^0 + d_{ij} P(\tau),$$

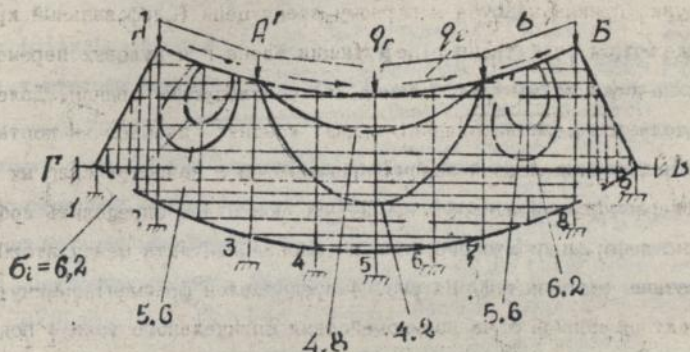


Рис. 4. Фрагмент замкнутой контактной цепи
в зоне взаимодействия вала с под-
шипником

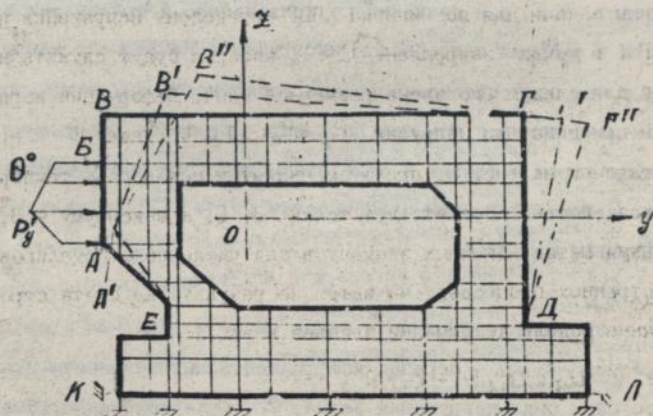


Рис. 5. Деформации корпусной детали под
действием силовой и температурной
нагрузок

где θ^0 - температура, P - нагрузка, $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ - коэффициенты, полученные с помощью метода наименьших квадратов.

Для определения динамических показателей упругой системы с помощью уравнения Лагранжа 2-го рода была составлена система обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\sum_{m=1}^M (a_{mn} \ddot{y}_n + c_{mn} \dot{y}_n) = A_n \sin \omega t, \quad (n=1, 2, \dots) \quad (16)$$

интегрирование которой дает амплитуды и собственные частоты колебаний элементов системы.

Обрабатываемые детали считаем достаточно жесткими, в связи с чем в размер динамической нагрузки и входит только температурная составляющая деформации детали, для определения которой были получены решения задач теплопроводности и термоупругости.

РАЗРАБОТКА ОСНОВНОЙ КОМПЛЕКСИ

Известные алгоритмы адаптивного шлифования, основанные на стабилизации силовых и температурных параметров, в данном случае не работают, т.к. при движении по криволинейной траектории эти параметры и режущая способность инструмента непрерывно меняются. В связи с чем была проанализирована возможность идентификации процесса шлифования с помощью параметров процесса разрушения абразивных зерен и связи в зоне взаимодействия инструмента с деталью. С использованием зависимостей (9) - (13), а также с помощью формулы П.Париса

$$\frac{dl}{dN} = C (K_{I \max} - K_{I \min})^n, \quad (19)$$

где dl - приращение гребени в зерне за n цикл, N - число циклов, $K_{I \max} - K_{I \min}$ - перепад коэффициента интенсивности напряжений за один цикл нагружения зерна, C, n - константы, были определены условия (режимы) при которых абразивное зерно постепенно истирается по передней поверхности, разрушаясь по слоям,

расположенными под углом δ_i к нормали. Угол δ_i (передний угол режущей кромки) постепенно увеличивается, что ведет к росту сил резания и температуры. Если проанализировать увеличение нагрузки на зерно с точки зрения удержания его связкой (K_I^1 или B_i), то можно установить критическое значение нагрузки, при достижении которой связка разрушается и зерно вырывается из нее, выдерживая при этом максимальное число циклов нагружения. Разрушение связки инициирует появление на поверхности новых режущих зерен, т.е. происходит процесс самозатачивания. Были определены нижнее и верхнее значения нагрузок, в пределах которых процесс самозатачивания протекает стабильно. При $K_I^2 > K_I^1$, где K_{Ic}^2 - критическое значение коэффициента интенсивности напряжения в связке, круг работает в режиме шлифования, т.к. зерна не разрушаясь выпадают из связки. При $K_I^1 = K_{Ic}^1$ и $K_I^2 = K_{Ic}^2 / k$, где k - коэффициент запаса, реализуется процесс чистого резания группой активных зерен, обеспечивая расчетные значения показателей производительности и качества обработки. Т.о. было показано, что процесс шлифования может быть описан параметрами процесса разрушения активной зоны инструмента, с помощью которых можно управлять процессом обработки с заданными показателями.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена задача нелинейного программирования, в которой в качестве функции цели было принято выражение, описывающее производительность шлифования, а в качестве ограничений формулы: требования к точности, шероховатости поверхности, температуры на поверхности детали (отсутствие прижогов), мощности, износа инструмента по параметрам разрушения, прочности круга, частоты вращения круга и детали. Окончательно система математической программы сводится к виду:

$$X_1 X_2 X_3^2 / (P_0 + p_1 X_1 X_2 X_3^d) \rightarrow \max,$$

$$R_1 (a_{10} + a_{11} a_x + a_{12} a_x^2)^{1/2} X_1^{1/3} X_2^{1/5} X_3^{1/3} +$$

$$+ R_2 (a_{20} + a_{21} a_x + a_{22} a_x^2) +$$

$$+ R_3 (a_{30} + a_{31} a_x + a_{32} a_x^2)^{2/3} \leq B_1,$$

$$a_0 (d_0 - U_0^x) - 2(2X_1)^{1/2} (d_0 -$$

$$- U_0^x)^{3/4} d_1^{-1/2} (X_1 + X_2)^{-1/2} \leq B_2,$$

$$(a_{20} + a_{21} a_x + a_{22} a_x^2) t_0 t_1 z_0 X_3 X_1^{-1/2} \leq B_3,$$

$$(a_{20} + a_{21} a_x + a_{22} a_x^2) z_0 t - X_3 \leq B_4,$$

$$t_3 X_3 \leq B_5$$

$$t_3 X_3 \geq B_6, \quad (20)$$

$$X_2 \leq B_7,$$

$$z \geq B_8,$$

$$t_4 X_3^{-1} \leq B_9,$$

$$t_5 X_1^{m_5} X_2^{m_4} X_3^{m_2} \leq B_{10}$$

$$t_6 X_3^{p_2} \leq B_{11},$$

$$t_7 X_1 \leq B_{12},$$

$$t_7 X_1 \geq B_{13},$$

$$X_L \geq 0 \quad (L = 1, 2, 3)$$

Здесь X_1, X_2, X_3 - переменные, соответствующие скорости детали, подаче и скорости круга, p, R_i, d_i, t_i, v_i - числовые параметры элементов технологической системы. В связи с тем, что система (20) нелинейна для решения задачи был применен метод множителей Лагранжа, с помощью которого задача была сведена к решению системы алгебраических уравнений. Область ограничений задачи показана на рис.6, где $a_1 - a_4$ - ограничение по точности, $b_1 - b_4$ - по шероховатости, $a_1, q_2, c_1, b_2, v_1, d_1$ - по температуре, c_1, c_2, b_3, b_2 - по износу инструмента. Здесь же нанесены три последовательных положения функции цели $Z(X_1, X_2, X_3)$, максимальное значение которой достигается в точке $C_1 = M$.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АЛГОРИТМОВ САМОНАСТРОЙКИ

При изложенная в работе бесцикловая самонастраивающаяся система управления шлифованием базируется на математических моделях технологической системы, с помощью которых вычисляются текущие значения критериев управления, которые затем сравниваются с заданными значениями, а величина рассогласования попадает в блок самонастройки, где вычисляются новые, заранее не известные, значения управляющих переменных, позволяющие компенсировать возмущения. Разработанные математические модели позволяют реализовать несколько методов управления, при этом для оперативной идентификации всех параметров состояния необходимы только два измерения: измерения составляющей P_y (с помощью датчика давления, есть иногда в подшипник шпинделя) и измерение мощности, потребляемой приводом главного движения. В каждом методе вычисляется определенный критерий состояния технологической системы. Попробуем проанализировать методы, базирующиеся на вычислении: а) параметров разрушения зерен в связке; б) деформации зерна в различных связках; в) температурного поля в активной зоне; г) величин относи-

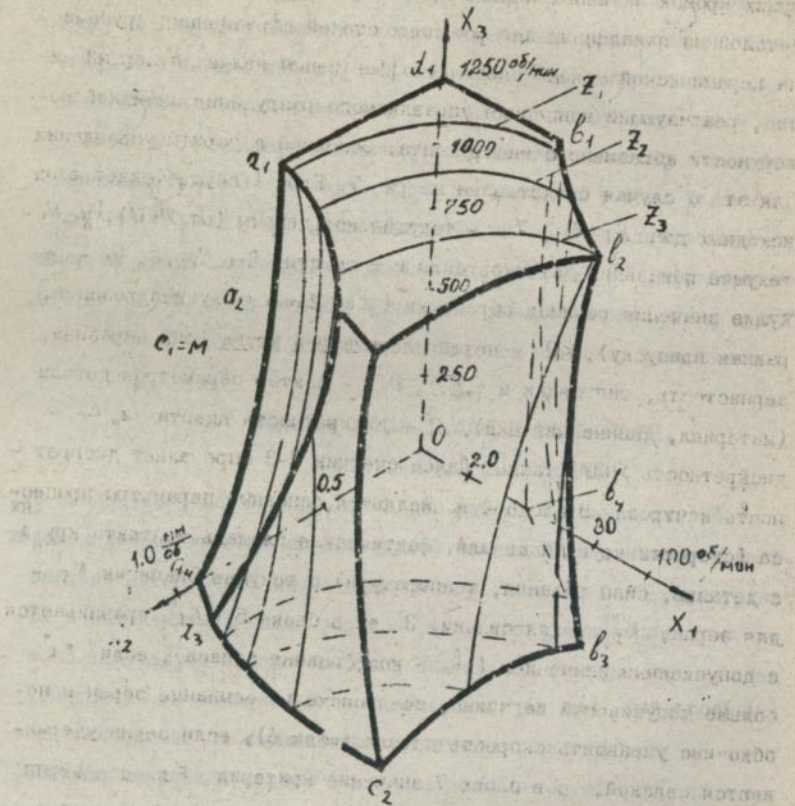


Рис. 6. Область ограничений задачи

нелинейного программирования:

Z_1, Z_2, Z_3 - положения
поверхности целевой функции,

$X_1 = M_g, X_2 = S, X_3 = R_{np}$

тельной заделки зерна. д) величины изменения переднего угла режущих кромок активных зерен. При шлифовании сложных поверхностей деталей из закаленных легированных сталей абразивными кругами на керамической связке наиболее эффективным является первый метод, реализующий концепцию управляемого разрушения активной поверхности абразивного инструмента. Основой алгоритма управления является этот случай, представлен на рис. 7. Блок I осуществляет ввод исходных данных: X_i, Z_i - текущие координаты (от УЧПУ), P_{yi}, N_i - текущие показания датчиков силы и мощности; S_{1i}, S_{2i}, t_i, F_i - текущие значения режимов обработки ($t_i = Z_{min}$ - глубина резания, равная припуску), KR - вектор параметров круга (тип абразива, зернистость, тип связки и т.д.), DT - вектор параметров детали (материал, данные чертежа), δ - дискретность адаптации, Δc - дискретность УЧПУ станка. Далее счетчик 2-3 определяет дискретность контроля. В блоке 4 вычисляются основные параметры процесса (скорости круга и детали, фактическая площадь контакта круга с деталью, силы резания, температура) и текущие значения K_I' - для зерна, K_I'' - для связки. Затем в блоке 5 K_I'' сравнивается с допустимым значением (K - коэффициент запаса), если K_I'' больше допустимой величины, то происходит осыпание зерен и необходимо уменьшить скорость детали (блок 6), если зерна удерживаются связкой, то в блоке 7 значение критерия K_I' для зерна сравнивается с критическим. Если K_I' не достигает K_{Ic} , значит идет затупление круга, режущие кромки на зернах не образуются. Для активизации процесса разрушения в блоке 8 скорость регулируется (увеличение на единицу). В блоке 9 вычисляются параметры износа зерен, в блоке 10 они сравниваются с размерами зерна. Если разрушение не восстанавливает режущую способность зерен, то требуется правка. Продолжение процесса может быть остановлено в блоке 11, где фиксируется конечная координата поверх-

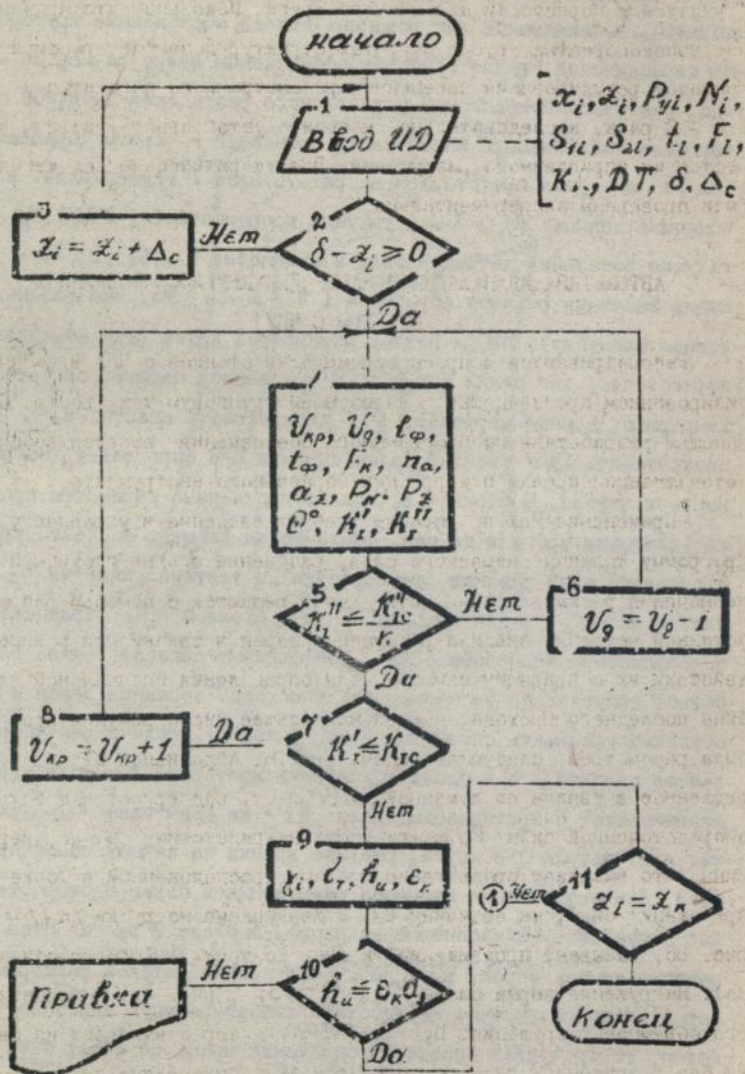


Рис. 7. Блок-схема основного алгоритма

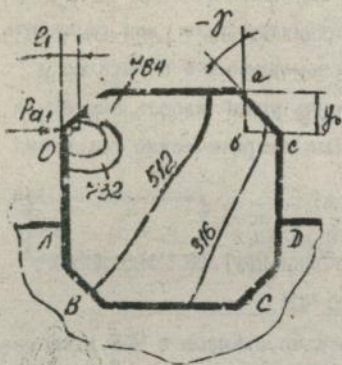
ности (ξ_k).

Было проведено исследование влияния на процесс регулирования структуры и пористости абразивного круга. Показано, что применение высокопористых кругов открытых структур позволяет расширить диапазон регулирования переменных рассмотренного алгоритма в 1.5 - 2 раза, а следовательно, повысить устойчивость системы в отношении управляемого разрушения. Все теоретические положения были проверены экспериментально.

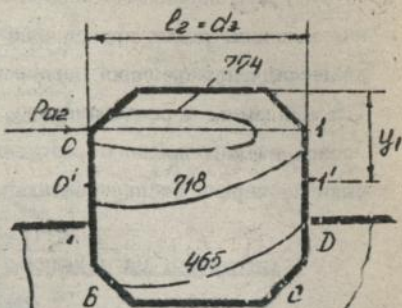
АВТОМАТИЗАЦИЯ НАЛАДКИ И НАСТРОЙКИ КРУГОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Рассматриваются вопросы переналадки станков с ЧПУ в автоматизированном производстве, реализующем групповую технологию. С помощью разработанного программного обеспечения решаются задачи автоматизации правки и коррекции абразивного инструмента.

Применение ЧПУ при правке требует введение в управляющую программу толщины снимаемого слоя, разбиение его на проходы и назначения режимов правки. Эти задачи решаются с помощью разработанной методики анализа разрушения зерен и связки при взаимодействии их с правящим алмазом. Для определения оптимальной глубины последнего прохода, дающей наибольшее число режущих кромок, была рассмотрена следующая задача, рис. 8. Абразивное зерно, закрепленное в связке по ломанной $ABCD$, подвергается действию сосредоточенной силы P_{a1} , рис. 8а, на расстоянии l_0 от вершины, что вызывает продвижение трещины, расположенной в точке приложения силы, на величину l_1 . Увеличение нагрузки до $1.25P_{a1}$, рис. 8б, вызывает продвижение трещины до точки I (скол части зерна). Нагрузка зерна силой $P_{a2} = 1.5P_{a1}$, рис. 8в, вызывает его объемное разрушение. При $P_{a3} = 2P_{a1}$ зерно выпадает из связки без разрушения рис. 8г. При этом была определена оптимальная

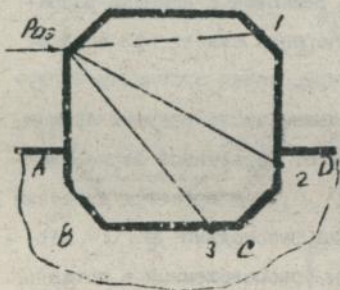


а)

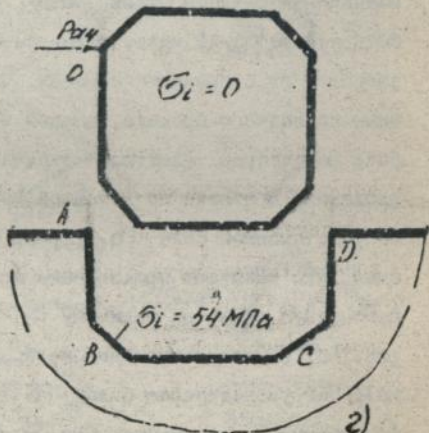


б)

$$\sigma_i = 788 \text{ МПа}$$



в)



г)

Рис. 8. Моделирование взаимодействия абразивного зерна с правящим алмазом

толщина снимаемого слоя на последнем проходе $\psi = d_z / \epsilon \tan \gamma_i$,
 где d_z - характерный размер зерна, и подача правки $S_{11} = 1.25 \psi$.

Для определения поправки настроечного размера на величину
 теплового расширения детали была разработана следующая методика.
 Нестационарное температурное поле в детали было определено
 решением задачи теплопроводности для цилиндрической детали, ко-
 торое имеет вид:

$$T(r, z, \tau) = \left[\frac{\pi}{2} \frac{\omega T_0}{\sqrt{\pi \lambda \tau}} + \frac{\delta_1 \omega_2 - \delta_2 \omega_1}{\beta_2 \delta_1 - \beta_1 \delta_2} r J_0 + \right. \\
 \left. \left(\frac{\omega_1}{\delta_1} - \frac{\beta_1 (\delta_1 \omega_2 - \delta_2 \omega_1)}{\delta_1 (\beta_2 \delta_1 - \beta_1 \delta_2)} r Y_0 \right) \right] \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{e} \right) + \quad (21) \\
 + (a_1 \beta_1 \Theta_0 r)^2 \left[\frac{\delta_1 r_2 - \delta_2 r_1}{\beta_2 \delta_1 - \beta_1 \delta_2} J_0 + \left(\frac{r_1}{\delta_1} - \right. \right. \\
 \left. \left. - \frac{\beta_1 (\delta_1 r_2 - \delta_2 r_1)}{\delta_1 (\beta_2 \delta_1 - \beta_1 \delta_2)} \right) Y_0 \right] \left(\cos \frac{\pi z}{e} - \cos \frac{2\pi z}{e} \right) + \\
 + \Theta_0 (a_0 \beta_0 + a_1 \beta_1 r + a_2 \beta_2 r^2 + a_3 \beta_3 r^3) \cos \frac{2\pi z}{e}.$$

Здесь T_0 - начальная температура детали, a - коэффициент температуропроводности, J_0 , Y_0 - функции Бесселя, r_1 , r_2 - радиусы внутренней и наружной поверхности колец детали, e - зона контакта круга с деталью, r , z - цилиндрические координаты τ - время. Температура в зоне контакта детали с кругом задана следующей зависимостью

$$\Theta^0 = \Theta_0 \left(a_0 \beta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \beta_n r^n \cos \frac{n\pi z}{e} \right), \quad (22)$$

С помощью координат можно аппроксимировать источник тепла любой формы на круг цилиндрических поверхностей обрабатываемой детали.

Параметры ω_i , δ_i , β_i - алгебраические выражения от r_1 , r_2 , J_0 , ...

Исследование тепловых деформаций, возникающих в детали при действии температурного поля (21) проводилось с помощью метода конечных элементов рис.9. При $\theta_1 = 640^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 670^\circ\text{C}$ и $\theta_3 = 715^\circ\text{C}$ ($T_0 = 20^\circ\text{C}$) возникающее температурное поле $T(r, z, \tau)$ вызывает в материале детали напряжения $\sigma_i^{\max} = 217,6 \text{ МПа}$ и деформации $u_r^0 = 62 \text{ мкм}$ при $E = 0,4$ ($\epsilon = z/z_k$, $\rho = r/r_k$) рис.Эв. Изменения температурного поля, рис.9б, происходит в течение 1.2с, что свидетельствует об ударном характере воздействия, которое необходимо учитывать при определении настрочных размеров следующим образом

$$X_H = X + u_r^0, \quad (23)$$

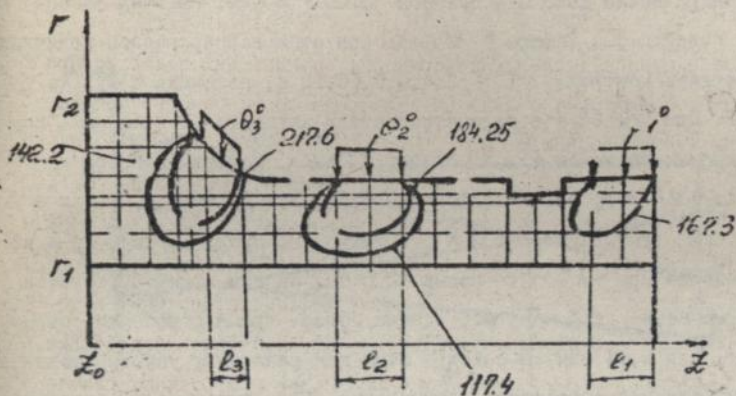
где X_0 - координата привязки.

Рассмотрены также вопросы коррекции управляющих программ при программировании обработки участков поверхностей деталей, имеющих особые точки (точки возврата, точки резкого изменения траектории и т.д.)

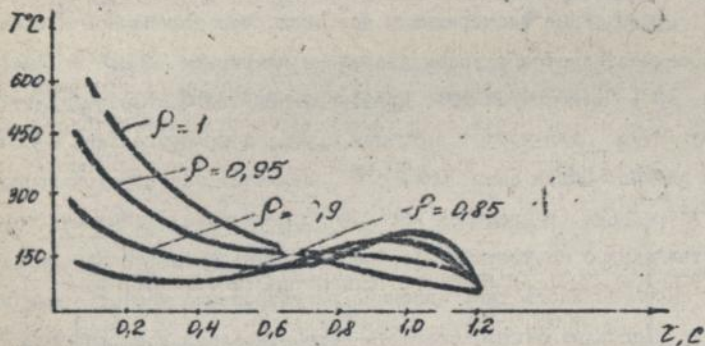
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ В ПРОИЗВОДСТВО

Прежде всего экспериментально проверялись применяемые методики анализа процессов резания абразивными зёрнами и разрушения режущих кромок. С помощью специальных устройств, защищенных авторскими свидетельствами, проверялись зависимости между режимами обработки и параметрами единичного зёрна (γ_i , N_z , h и др.). Отклонение теоритической зависимости $\delta_i = f(v_{kr}, u_f, S, t)$ от экспериментальной в широком диапазоне изменения параметров не превысило 15%.

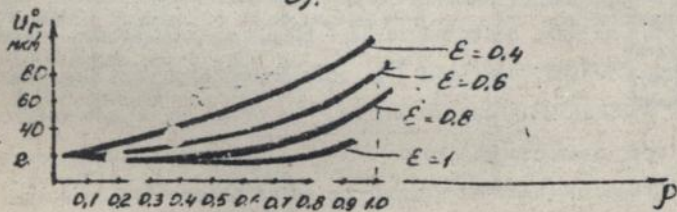
В производственных условиях на станке мод S30-11/12 CNC



а).



б).



в).

Рис. 3. Расчет коррекции настроечного размера на величину теплового расширения

с помощью разработанного программного обеспечения шлифовалась цилиндрическая деталь - муансон $\phi 100 \times 80$ мм, имеющая фасонную поверхность (сфера $r = 40$ мм), при этом варьировалась величина интервала контроля $\Delta T = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ с, вводилась с пульта УЧПУ. При $\Delta T = 6$ с все параметры детали находятся в пределах, допускаемых чертежом ($R_a = 1,25$ мкм, $IT = 7$, погрешность формы $\Delta X = 5,7$ мкм), время шлифования 0,92 мин. Дальнейшее увеличение ΔT вызывает рост ΔX . Так, длина дуги, по которой идет обработка при $\Delta T = 8$ с равна 126 мм, за это время обрабатывается погрешность $\Delta X = 9,3$ мкм, однако общее время обработки сокращается до 0,84 мин. В связи с этим для различных условий обработки следует определять оптимальное ΔT , при котором система полностью компенсирует возмущения.

Проведенные эксперименты показали, что устойчивое шлифование осуществляется в узком диапазоне изменения $V_{кр}$ и $n_{дет}$, рис. 10 ($N_{отн} = n/2000$). Прямоугольник bd определяет полосу $N_{отн}$ для частот вращения круга, а прямоугольник $eflk$ - для детали. Общая зона $aa'e'c'k$ является зоной устойчивого регулирования, в пределах которой процесс самозаточивания осуществляется в соответствии с требованиями основного алгоритма.

Исследовалось также влияние регулирования частот вращения круга и детали на шероховатость обрабатываемой поверхности. При изменении $V_{кр}$ от 15 до 30 м/с показатель шероховатости R_a снижается на 48%, в диапазоне 30 - 60 м/с шероховатость снижается незначительно, при этом $V_{дет}$ составляло 36 м/мин. При увеличении $V_{дет}$ до 70 м/мин изменение $V_{кр}$ от 20 до 60 м/с дает снижение шероховатости только на 25%. Т.е. регулирование параметров технологической системы в процессе ее самонастройки позволяет полностью компенсировать возмущения, при этом благодаря тому, что зона устойчивого самозаточивания находится в узком диапазоне

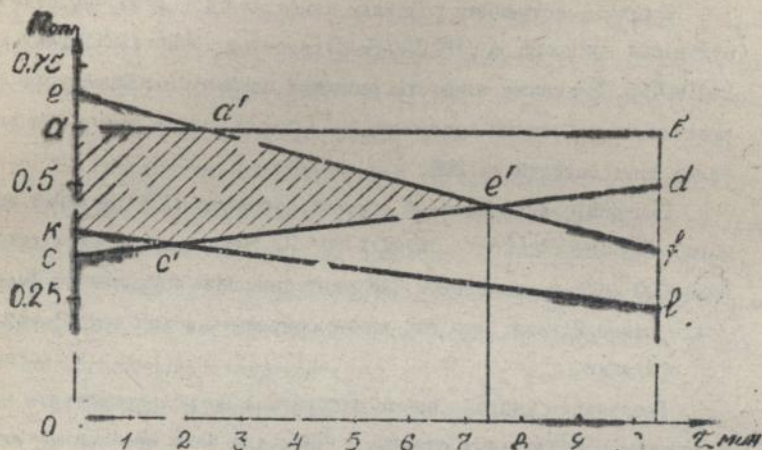


Рис. 10. Определение области самонастройки

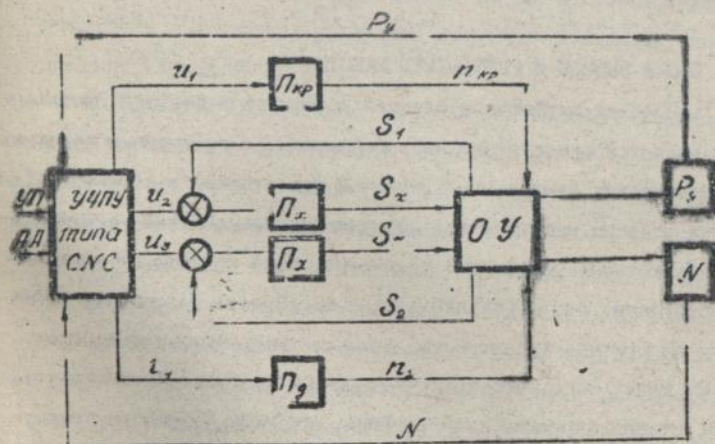


Рис. 11. Общая функциональная схема самонастраивающейся системы

изменен и управляющих переменных, параметры качества остаются в заданных пределах.

В производственных условиях шлифовалась 1-я пара втулок из стали 40X $\varnothing 80 \times 85$ мм, НРС-45-40 головкой AW (ГОСТ 2447-62) 24A16C1K5. Заданная точность размеров по 7-му качеству при реализации основного алгоритма $K_T' = \text{const}$ достигается при снижении трудоемкости на 25%.

При шлифовании деталей втулки штампов шлифовальными головками AW24A25TK3 $\varnothing 40 \times 40 \times 10$ мм на частоте вращения 6000 об/мин применение САУ дает снижение погрешности формы болван чем в 2 раза, что позволяет сократить объем трудоемкой ручной шлифовки.

Реализацию разработанных алгоритмов можно осуществить на различных шлифовальных станках с ЧПУ, для чего необходимо их оснастить измерителями радиальной силы P_r и скорости привода главного движения N , рис. II, где та же: жется обратная связь по перемещениям S_1 и S_2 приводов P_x , P_z , а приводы вращения круга P_ϕ и детали P_d регулируются бесступенчато.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Процесс шлифования сложной поверхности большой протяженности является существенно нестационарным, подверженным действию систематических (вызванных дивизиной траектории) и случайных (вызванных износом инструмента) возмущающих воздействий, суммарное действие которых невозможно учесть на этапе подготовки управляющих программ, что обуславливает необходимость разработки эффективных алгоритмов адаптивного управления данными процессами.

2. Ввиду того, что традиционные алгоритмы адаптивного управления, стабилизирующие силы резания, мощности, крутящего момента и т.д. в данном случае неприемлимы, т.к. эти параметры непре-

ривно меняются при движении по криволинейной поверхности, то была предпринята попытка поиска инвариантных к природе внешних воздействий критериев оценки хода технологического процесса. В качестве таких критериев были приняты зависимости, связывающие параметры процесса непрерывного разрушения абразивного инструмента с его ходными параметрами технологического процесса.

3. Разработаны математические модели процессов взаимодействия абразивного инструмента с элементами технологической системы, связывающие параметры рабочих процессов с управляющими переменными, что позволило разработать концепцию стабилизации состояния технологической системы посредством управления процессом разрушения абразивного инструмента.

4. На базе принятой концепции разработаны методы оперативной идентификации и адаптации объекта управления к нестационарным условиям функционирования.

5. Показано, что в процессе обработки абразивные зерна и связка хрупко разрушаются под действием сил и температуры, причем разрушение может осуществляться только от температурных напряжений, что позволяет управлять процессом по каналу главного движения (вращение круга).

6. Разработана методика определения верхнего и нижнего значений управляющих переменных, соответствующих верхней и нижней границам режима самозаточивания, которые определены как границы устойчивого состояния процесса обработки.

7. Показано, что разработанные критерии оценки хода технологического процесса могут служить в качестве ограничений в задаче оптимизации режимов шлифования. Решена задача нелинейного программирования с ограничениями по интенсивности разрушения абразивного инструмента. Полученные оптимальные значения управляющих параметров исполняются как уставки в алгоритме управления.

8. Разработаны эффективные алгоритмы самонастройки технологической системы при шлифовании сложных поверхностей и стенок с ЧПУ, позволяющие компенсировать возникающие возмущения.

9. Разработанные математические модели разрушения абразивных зерен и связки при шлифовании используются для моделирования процесса правки инструмента, определяются режимы правки по критерию минимального расхода абразивного материала, что позволяет автоматизировать процесс правки.

10. Решены задачи автоматизации настройки и задания шлифовальных станков с ЧПУ.

11. Основные теоретические разработки подтверждены экспериментально. Применение разработанных алгоритмов при шлифовании сложных поверхностей позволяет повысить производительность на 25 - 30% (и в 2 - 2.5 раза по сравнению с обработкой по шаблону), при достижении шероховатости $Ra = 0.25 - 0.3$ мкм.

12. Даются рекомендации по использованию полученных решений, моделей и методов для построения управляющих структур и алгоритмов в задачах автоматизации разнообразных технологических процессов, использующих абразивный инструмент.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Торлин В.Н., Баталин А.С. Финишные операции в гибком автоматизированном производстве. - Киев: Техника, 1967. - 208с. (монография).
2. Торлин В.Н. Напряженно-деформированное состояние несимметрично неоднородных упругих изостроенных цилиндрических тел. - Динамика и прочность машин: Республ. межвед. научн.-техн. сб., Харьков: "Вища школа" 1974, вып. 20. - с.104-107.
3. Торлин В.Н. Прямая и обратная задачи плоской теории упругости неоднородного тела. - Прикладная механика, 1976, т.12, №8. - с. 49-52.
4. Торлин В.Н. Определение функций распределения упругих свойств

в неоднородных телах. - Проблемы машиностроения: Киев: Наукова думка, 1976, вып. 2. - с.59-61.

5. Торлин В.Н. Распределение напряжений в фазах композита, нагруженного до границ выключений, частично выступающих над матрицей. - Прикладная механика, 1984, т.20, №9. - с.86-90

6. Торлин В.Н., Гонтаровский П.П. Исследование устойчивости алмазных зерен в связках при силовых и температурных воздействиях. - Резание и инструмент: Республ. межвед. научн. - техн. сб., Харьков: Вища школа, 1986, вып. 35. - с. 87-90.

7. Некоторые прикладные упруго-пластические задачи сматанного типа / А.Н.Подгорный, П.П.Гонтаровский, Г.Марченко, В.Н.Торлин. -Препр.ИИМ АН УССР, Харьков, 1976. - с.43.

8. Торлин В.Н., Яуфман А.И. Теплофизический анализ комбинированной обработки полых цилиндрических деталей - Приборостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб., Киев: Техника, 1981, вып. 30. - с.82-85.

9. Киряхин В.В., Торлин В.Н., Зайцев А.В. Решение одной задачи линейного программирования для модели процесса обработки резанием. - Приборостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб., Киев: Техника, 1982, вып. 33. - с.76-79.

10. Торлин В.Н., Кояторина Л.П., Кузьмина Е.И. Вопросы точности изготовления деталей приборов. - Приборостроение: Респ. межвед. научн. - техн. сб., Киев: Техника, 1983, вып. 34. - с.49-53.

11. Торлин В.Н., Зайцев А.В., Апанасенко Т.Д. Теплового удара в гетерогенных системах. - Приборостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб. Киев: Техника, 1985 вып. 37. - с. 45-47.

12. Зайцев А.В., Торлин В.Н. Применение инструмента из СТМ при плоском шлифовании высокоточных деталей. - Приборостроение: Респ. межвед. научн.-техн. сб., Киев: Техника, 1987, вып.39. - с.91-94.

13. Крылов И.З., Торлин В.Н. Моделирование нестационарных про-

- цессов программируемой обработки / В кн.: Методы и модели интен-
сификации производства. - Киев, УМК ВО, 1988. - с.10-13.
14. Торлин В.Н., Новоселов Ю.К. Разработка чистовых операций
для гибкого автоматизированного производства. - Киев: Знание,
1986. - 21.
15. Куля В.И., Торлин В.Н. Настройка средств технологического
оснащения ГС в режиме диалога / В кн.: Повышение надежности
технологических средств ГПС, М.: ВНИИприбор, 1987. - с.38-40.
16. Торлин В.Н., Крылов И.В. Настройка операций на станках с
оперативными устройствами ЧПУ / В кн.: Технологическое и норма-
тивное обеспечение станков с ЧПУ и ГПС, Челябинск, 1988. - с.37-39.
17. Торлин В.Н., Торлин С.В. Фактор времени в процессе формооб-
разования деталей машин / Сб. докл. Междунар. конф.: Акту-
альные проблемы фундаментальных наук, М.: изд-во МГУ, 1991. -
с. 98 - 99.
18. А.С.848162 (ССР), МКИ В23В 29/18. Устройство для механи-
ческой обработки / В.Н.Торлин, А.К. Наумов, В.Л. Харчин. - В.И.
№27, 1987.
19. А.С.897471 (СССР), МКИ В23В 15/12. Адаптивное устройство для
управления обработкой деталей из труднообрабатываемых материалов
/ В.Н.Торлин, А.К.Наумов, Л.А.Тараненко и др. - В.И. №2, 1982.
20. А.С. 1444128 МКИ В23С 7/04. Автооператор для станков с ЧПУ /
В.Н.Торлин, И.В.Крылов, И.В.Шуголь. - В.И. №46, 1988.
21. Торлин В.Н., Гонтаровский И.И. Решение контактных задач тео-
рии упругости методом конечных элементов / Тез. докл. Всесоюзн.
конф. по контактным проблемам. - Ростов на-Дону, 1977. - с.79-81.
22. Торлин В.Н., Наумов А.К. Системный анализ теплофизического
состояния реологической пары резец-деталь / Тез. докл. Всесоюзн.
конф. по резанию металлов. - Жданов, 1980. - с.32-33.

23. Торлин В.Н., Намов А.К. Разрушение поликристаллов инструмента в процессе шлифования материала той же твердости / Тез. докл. Всесоюз. конф. по проблемам резания инструментами из сверхтвердых материалов. - Харьков, 1981. - с. 238-240
24. Торлин В.Н., Зайцев А.В. Проектирование операций бесцентрового шлифования трибчатых заготовок с помощью ЭВМ / Тез. докл. Всесоюз. конф. по технологии чистовой обработки. - Челябинск, 1983. - с.28-29.
25. Торлин В.Н., Зайцев А.В. Упругопластические явления в шлифуемом по эрковитному слою / Тез. докл. Всесоюз. конф. по технологическому управлению триботехническими характеристиками узлов машин, М.: 1983. - с.30-31.
26. Торлин В.Н. Технологическое обеспечение автоматизации переналадки круглошлифовальных станков в условиях ПК / Тез. докл. Всесоюз. конф. по технологии чистовой и отделочной обработки. - Барнаул, 1985. - с. 15-16.
27. Торлин В.Н., Крылов И.В., Прокина М.В. Процедуры синтеза в системе автоматизации расчета операций шлифования / Тез. докл. Всесоюз. конф. ИНФОРМАТИКА - 87, М., 1987. - с.48.
28. Торлин В.Н., Крылов И.В., Тимохин С.А. Проектирование высокоэнергетических процессов обработки сложных деталей в станках ЧПУ / Тез. докл. Всесоюз. конф. по проблемам автоматизации механо-сборочных процессов в машино- и приборостроении. - М., 1989. - с.12-13.
29. Торлин В.Н., Крылов И.В. Идентификация точностных параметров в системе "Проектирование - производство" тел вращения / Тез. докл. Респ. конф.: Внедрение роботизированных комплексов и гибких автоматизированных производств в механообработку, - Севастополь, 1986. - с.6-7.
30. Торлин В.Н., Крылов И.В., Тимохин С.А. Допустимые преобразования технологических систем / Тез. докл. Респ. конф.: Повышение производительности и качества продукции в условиях ПК. - Севастополь, 1988.

456436

Ав 31.748

31. Торлин В.Н., Торлин С.В., Козлов А.А. О концепции квазистатической зоны взаимодействия композита, содержащего абразив, с деформируемым твердым телом / Деп. ГНТБ Украины, № 56-Ук94, 1994. - 8 с.

32. Торлин В.Н., Торлин С.В., Крылов И.В. Принцип необходимой достаточности в проблеме идентификации процесса шлифования криволинейных контуров на станках с ЧПУ / Деп. ГНТБ Украины, № 257 - Ук94, 1994, - 9 с.

THE SUMMARY

Topic V.N The development and research of methods of self-set-up of technological systems at grindings of difficult surfaces on machine tools with NC. The dissertation on competition of scientist degree of doctor of technical sciences on specialities 05.13.07 - automation of technological processes and productions. Sevastopol the state technical university, Sevastopol, 1995.

The approach enabling to build the algorithms of self-set-up of technological systems at grindings of difficult surfaces on machine tools with NC is offered. The base of developed methods of self-set-up is made the by concept of controlled destruction of working surface abrasive of tool, which is constructed on the basis of fundamental decisions extremes of tasks of mathematical physics, described the behaviour of technological system, effect of indignations, caused by wear of tool. Whereas at movement on curvilinear trajectories the powers and temperature parameter of system are functions of coordinates, conventional methods their stabilization to work will not, therefore criteria of management accept invariant nature of external effects the parameters of process of destruction abrasive grain and bundle. For preliminary optimization of regimes of cutting the task of linear programming is decided. The methods of automation, adjustments and set-up of grinding machine tools with NC are developed. All theoretical development are checked experimentally, algorithms and managing programs are introduced in production.

Ав 31.748