

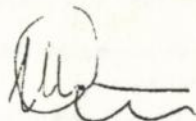
На правах рукописи

Сизый Юрий Анатольевич

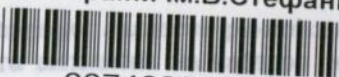
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ
СТРУКТУРОЙ И ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ФРИКЦИОННОЙ РАЗРЕЗКИ

Специальности: 05.02.08 - "Технология машиностроения",
05.03.01 - "Процессы механической обра-
ботки, станки и инструмент".

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Харьков 1996



00740222 (H)

результат работы
университета

технологии машиностроения и металло-
государственного политехнического

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
Тимофеев Юрий Викторович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники
Украины, доктор технических наук,
профессор
Гавриш Анатолий Павлович

доктор технических наук, профессор
Долматов Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор
Внуков Юрий Николаевич

Ведущая организация - ПО "Моторсич", г. Запорожье

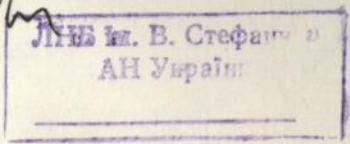
Защита состоится 25 апреля 1996 года в 14³⁰ на засе-
дании специализированного ученого совета Д 02.09.01 в Харьковском
государственном политехническом университете
(310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского
государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "14" марта 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета

Узунян М. Д.



Общая характеристика работы

Актуальность Заметную долю в трудоемкости производства изделий машиностроения и металлургии занимают различные операции разрезки проката и заготовок. В настоящее время в машиностроении используются, в основном, следующие методы: разрезка на ножовочных, ленточно-отрезных, фрезерно-отрезных, абразивно-отрезных станках; рубка (ломка) на прессах. В металлургии - разрезка на пилах трения гладким диском, которую мы называем фрикционной разрезкой; зубчатым диском; рубка (резка) неподвижными или вращающимися ножами.

Фрикционная разрезка в машиностроении практически не применяется, а в металлургии - применяется редко. Этот метод разрезки, уступающий по производительности практически только рубке на прессах, после достаточно широкого применения в СССР в годы Второй мировой войны был вытеснен в машиностроении разрезкой дисковыми фрезами и абразивно-отрезными кругами, а в металлургии - разрезкой зубчатыми дисками трения для обеспечения более высокого качества обработки при меньшей энергоёмкости. При этом наука, как и практика, после Второй мировой войны "потеряла интерес" к фрикционной разрезке, оставив "белые пятна" в исследовании как этой операции, так и оборудования для ее реализации.

Однако названные методы, вытеснившие фрикционную разрезку, обладают общим существенным недостатком - требуют больших затрат на инструмент. Как дисковые фрезы и пилы, так и абразивно-отрезные круги являются дорогим инструментом. Эксплуатация дисковых фрез и пил требует их периодической заточки, интенсивный износ абразивных кругов - их большого количества. При этом надо отметить, что названный инструмент больших диаметров серийно не выпускается в странах СНГ. Поэтому металлургические предприятия, применяющие дисковые пилы, вынуждены организовывать собственное производство этих инструментов, а заводы, применяющие абразивные круги больших диаметров, закупают их за границей. Эта давно существующая проблема особенно обострилась в связи с тяжелым экономическим положением на Украине и в других странах СНГ в переходный период к рыночной экономике. В связи с вышеизложенным практика металлообработки уделяет все большее внимание процессам, не требующим дорогостоящего инструмента, и, в частности, фрикционной разрезке.

В литературе очень мало источников, непосредственно посвященных тем или иным сторонам фрикционной разрезки. Значительно больше работ, косвенно затрагивающих некоторые аспекты этого процесса: работы, посвященные чисто разрезке зубчатыми дисками трения; по точению и фрезерованию диском трения; по поверхностному

упрочнению деталей высокоскоростным трением; по высокоскоростному трению в узлах механизмов и машин.

Анализ этих работ показывает, что важнейшие физические аспекты разрезки (пластические деформации приконтактной зоны, теплообразование, стойкость и устойчивость инструмента - диска, динамика оборудования фрикционной разрезки) не исследованы.

Таким образом, учитывая острую потребность промышленности в экономичных операциях разрезки и малоизученность динамики процесса фрикционной разрезки, поиск решений, устраняющих недостатки этой операции, определение рациональных областей применения и оптимальных условий эксплуатации технологических систем для ее реализации можно считать актуальным.

Цель работы состоит в повышении эффективности и структурно-параметрической оптимизации технологических систем фрикционной разрезки, расширении областей применения этой высокопроизводительной операции на основе:

- разработки научных основ операции, повышения ее конкурентоспособности;
- разработки методологии синтеза технологических систем фрикционной разрезки, повышающих производительность и качество кромки прорези;
- разработки методов, повышающих технологическую надежность и эффективность инструмента и оборудования фрикционной разрезки.

Автор защищает:

1. Новый способ фрикционной разрезки, обеспечивающий значительное уменьшение высоты заусенца на кромках прорези с одновременным повышением производительности, базирующийся
 - на тепловой модели образования положительного градиента механических свойств в разрезаемой фрикционным диском заготовке;
 - на модели периодического образования полностью насыщенного контакта, охватывающего площадь, близкую к номинальной площади контакта пары трения при фрикционной разрезке;
 - на математической модели пластических деформаций приконтактной зоны разрезаемой заготовки;
 - на аналитическом описании условий стружкообразования, ведущих к уменьшению высоты заусенца на кромках прорези;
 - на результатах экспериментального исследования качества и энергосиловых параметрах процесса фрикционной разрезки.
2. Методологию и результаты исследования теплообразования быстропотекающих процессов фрикционной разрезки, базирующиеся:
 - на методике и результатах определения контактной температуры;
 - на результатах моделирования и аналитического описания температурного поля в разрезаемой заготовке;
 - на аналитическом решении задачи теплопроводности для фрикцион-

ного диска с учетом теплообмена с окружающей средой и результатах его анализа.

3. Параметрическую оптимизацию инструмента фрикционной разрезки - гладкого диска, базирующуюся:

- на аналитическом решении задачи пластической деформации фрикционного диска;
- на установленном критерии стойкости фрикционного диска - утолщении его периферии;
- на теоретико-экспериментальном уравнении для вычисления периода стойкости диска;
- на выведенной формуле расчета критической нагрузки, полученной из условия статической устойчивости плоского диска;
- на результатах аналитического и экспериментального исследования статической устойчивости конического диска.

4. Конструкторско-технологическую реализацию процесса фрикционной разрезки, базирующуюся

- на технологических схемах фрикционной разрезки различных видов проката и рекомендациях по назначению параметров процесса;
- на конструкторских решениях, позволяющих выбрать оптимальную форму фрикционного диска для повышения его надежности и улучшения качества реза;
- на методике и рекомендациях по определению мощности привода вращения фрикционного диска, учитывающих динамику его работы при разрезке круглых труб;
- на методике определения мощности привода вращения фрикционного диска, имеющего радиальное биение.

5. Алгоритмы назначения основных параметров технологической системы фрикционной разрезки.

Методы исследования

Результаты работы получены на основе теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования базируются на теории теплопроводности, пластичности, теории устойчивости упругих систем; сопротивлении материалов; теории трения; динамике станков; теории автоматического управления и регулирования.

Экспериментальные исследования проведены на основе современных методик с использованием серийных приборов и оборудования, а также специальных оригинальных устройств. Вычисления и математическое моделирование выполнены с широким применением ЭВМ.

Научная новизна

В работе решена крупная научная проблема, состоящая в разработке научных основ фрикционной разрезки, позволивших вскрыть значительные резервы в повышении качества, производительности, экономичности разрезки, определить область эффективного применения фрикционной разрезки, что имеет важное теоретическое и народ-

нохозяйственное значение.

Автором теоретически обоснованы и реализованы практически условия значительного уменьшения высоты заусенца на кромках прорези с одновременным повышением производительности процесса; получено решение задачи теплопроводности для фрикционного диска и установлено влияние параметров процесса и диска на его температурное поле; получено экспериментально-теоретическое описание стойкости фрикционного диска на основе математических моделей его нагрева и пластических деформаций, позволившее рассчитать величину критерия стойкости и период стойкости диска; получено экспериментально-теоретическое решение задачи статической устойчивости фрикционного диска плоской и тарельчатой форм; при математическом моделировании на ЭВМ динамических процессов в приводе вращения фрикционного диска при переменном моменте сопротивления на диске обоснованы рекомендации по выбору мощности асинхронного двигателя; созданы эффективные способы и схемы фрикционной разрезки, основанные на оригинальных конструкциях фрикционного диска и различных схемах относительного движения диска и разрезаемой заготовки.

Практическая ценность и реализация работы состоит в создании ряда принципиально новых операций фрикционной разрезки:

- разрезка тонкостенных профилей проката с принципиально новым характером стружкообразования, резко уменьшающим высоту заусенца, и значительным повышением производительности;
- разрезка круглых труб при вращении их со снятием при этом заусенцев с наружной поверхности трубы;
- перерезка питателей при отрезке отливок от литниковой системы коническими фрикционными дисками, обладающими высокой устойчивостью.

Перечисленные операции значительно расширяют применение экономичного вида разрезки, что решает важные народно-хозяйственные задачи снижения затрат на разрезку и устранения дефицита инструмента.

Для надежной реализации перечисленных технологических процессов разработаны методики и рекомендации по управлению всеми параметрами технологической системы.

Разработанные процессы внедрены на Харьковском тракторном заводе, Балтийском судостроительном заводе (г.Таллин), ПО "МОТОРСИЧ" с общим экономическим эффектом в 300 тыс. рублей в ценах 1990 г.

По разработанным автором техническим предложениям выполнены проекты станков для фрикционной разрезки: 1) круглых труб из нержавеющей сталей и отливок от литниковой системы для Полтавского завода продовольственного машиностроения; 2) фасонного профиля

стойки контейнера для Одесского судоремонтного завода. Разработаны также технические предложения для проектирования Мукачевским станкостроительным объединением серийных станков абразивно-фрикционной резки и автоматической линии резки прямоугольных труб жесткого каркаса кабины трактора Т-150.

Апробация работы

Основные положения и результаты, представленные в диссертации, доложены, обсуждены и апробированы на международных конференциях: в Харькове в 1994 г., в 1995 г. в Сумах, Харькове, Донецке, Киеве - дважды; на всесоюзной в Тольятти в 1988 г. и на Всеукраинской конференции в г. Харькове в 1992 г. Технология фрикционной резки экспонировалась на выставке-ярмарке Минстанкопромом на базе ВДНХ в апреле 1989 г., на выставке-ярмарке в ХПИ в октябре 1989 г. "Вузы Украины - машиностроению", на международной Большой апрельской ярмарке - выставке в г. Милане (Италия) в 1990 г., на международной выставке в Нюрнберге в 1993 г.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в двух монографиях, 28 статьях и тезисах докладов и двух авторских свидетельствах СССР.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, девяти глав, основных выводов, библиографической справки, включающей в себя ___ литературных источников и ___ приложений. Работа изложена на ___ страницах машинописного текста, содержит ___ рисунка и ___ таблиц.

Основное содержание работы

В литературе мало исследований и публикаций, непосредственно посвященных процессу фрикционной резки. Это, прежде всего, монография Горбатова Н.И. и работы ученых Сибирского металлургического института Серегина С.А., Люленкова В.И., Огаркова Н.Н. и др.

Горбатов Н.И. теоретически и экспериментально определяет силу резания, описывает конструкции дисков трения и оборудования.

Серегиным С.А., Люленковым В.И., Огарковым Н.Н. на хорошем научном уровне выполнены экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса фрикционной резки, контактной температуры, коэффициентов трения и удельной работы трения.

Анализ отмеченных работ показывает, что в них не рассматривается ряд важнейших физических аспектов фрикционной резки: пластические деформации, теплообразование, стойкость и устойчивость диска. Попытки теоретического определения силы резания делаются на основе предположения о полном расплавлении металла. В объеме прорези, что вызывает сомнение. Кроме этого, диапазон режимов резания ограничен малыми подачами или малыми значениями

удельных нагрузок.

Работ, косвенно касающихся фрикционной разрезки, значительно больше. Это, прежде всего, по разрезке проката зубчатыми дисками трения. Высоким научным уровнем в этом направлении отличаются работы Вольфа В.Ф. и Татарникова В.В. Однако они в основном решают вопросы энергосиловых параметров разрезки, стойкости и усталостной прочности зубьев дисков трения, что плохо соотносится с разрезкой гладким диском.

В последние десятилетия появились исследования, развивающие обработку дисками трения - работы Зарубицкого Е.У., Костиной Т.П. и др. по точению и фрезерованию диском трения, а также работы по упрочнению поверхности деталей обработкой трением. Точение и фрезерование при этом производится кромкой диска трения, образованной периферией и торцем. В работах Зарубицкого Е.У. и Костиной Т.П. эта кромка рассматривается как режущий клин, а вращение диска - как источник нагрева срезаемого слоя. Такой подход к описанию обработки диском трения совершенно неприемлем для фрикционной разрезки.

Изучение же физико-механических свойств поверхности после обработки диском трения представляет интерес и для процесса фрикционной разрезки. Однако этот показатель качества разрезки не является первостепенным и, следовательно, не заслуживает наибольшего внимания.

Процесс фрикционной разрезки относится к процессам высокоскоростного трения, так как соответствует обобщенному критерию такого трения $Pe > 8$, где Pe - критерий Пекле. Вопросам трения, и в том числе, высокоскоростного посвящено очень много работ. Фундаментальные исследования высокоскоростного трения проведены Балакиным В.А., Чичинадзе А.В., Горюновым В.И. и др. Эти исследования выполнены в приложении к тормозам автомобилей, самолетов, поездов, а также к опорам скольжения ракетных тележек.

Все основные параметры, характеризующие процесс трения в перечисленных узлах, значительно отличаются от этих же параметров при фрикционной разрезке. В тормозах: скорость трения высока (10 ... 60 м/с) и уменьшается в процессе торможения; коэффициент взаимного перекрытия $K_{\text{вз}} = 0.7 \dots 0.8$; износ скользящего элемента составляет микрометры; удельная нагрузка - менее 2.5 МПа. При фрикционной разрезке: скорость резания 30 ... 140 м/с и постоянна за время реза; износ скользящего элемента (разрезаемой заготовки) составляет десятки миллиметров, т.е. на несколько порядков больше, чем в тормозах; $K_{\text{вз}} = 10^{-3} \dots 10^{-2}$; удельная нагрузка - 20 ... 150 МПа. В опорах ракетных тележек трение происходит при скоростях, на порядок больших, чем при фрикционной разрезке.

Для фрикционной разрезки, как и для прочих видов высокоско-

ростного трения, большой интерес представляет описание температурных полей в скользящем элементе пары трения. Однако в этих случаях постановка задачи теплопроводности принципиально отличается: при фрикционной разрезке тепловой источник нельзя рассматривать неподвижным в направлении, перпендикулярном плоскости контакта; при прочих видах высокоскоростного трения это вполне приемлемо, так как износ скользящего образца незначителен. При высокоскоростном трении решается, в основном, задача достижения высокой стойкости скользящего элемента пары трения; при фрикционной разрезке интерес представляет достижение высокой стойкости не скользящего элемента, а контртела, т.е. фрикционного диска. Это влечет за собой решение задач теплопроводности и пластичности для контртела, которые не рассматриваются при исследовании высокоскоростного трения.

Таким образом, фрикционная разрезка по параметрам и требованиям к ней занимает особое место в ряду различных пар высокоскоростного трения и часто ставит перед исследователем такие задачи, которые либо не решались в высокоскоростном трении, либо решались, но с другими, принципиально отличающимися условиями.

Выполненный анализ исследований по фрикционной разрезке и процессов, близких к ней, показывает, что данная операция механической обработки - малоизученная область и интересна тем, что предполагает обнаружение больших резервов повышения производительности, качества разрезки, стойкости инструмента и т.п., что приведет к повышению эффективности и конкурентноспособности фрикционной разрезки.

Итак, основная задача данного исследования - повышение эффективности, конкурентноспособности фрикционной разрезки. Эта задача может быть решена после устранения недостатков процесса при усилении его достоинств. Главный недостаток фрикционной разрезки - низкое качество, т.е. прежде всего, большая высота заусенца на кромках прорези, устранение которого достигается управлением пластическими деформациями и теплообразованием в приконтактной зоне заготовки, что возможно на основе глубокого знания физических аспектов процесса.

Усиление достоинств фрикционной разрезки - это достижение большей производительности и уменьшение затрат на инструмент. Поскольку производительность фрикционной разрезки определяется в значительной степени процессами микрорезания и заедания в паре трения диск-заготовка, а также процессами выдавливания металла заготовки движением подачи, естественно возникает задача управления этими процессами на основе их достоверного математического и физического описания.

Уменьшение затрат на инструмент может быть достигнуто при

повышении его стойкости на основе глубокого знания процессов пластических деформаций и теплообразования в инструменте - гладком тонком диске.

Решение поставленных задач возможно на основе системного подхода, который выражается в логической взаимоувязанной последовательности исследований. Требуется описание особенностей трения в паре диск-заготовка на микроуровне с последующим переходом к макроуровню, т.е. к пластическим деформациям и температурным полям заготовки и инструмента.

Наблюдения за процессом фрикционной разрезки показывают, что частички разогретого металла заготовки выбрасываются вращательным движением диска, а также происходит налипание их на поверхность диска в виде тонких "чешуек".

Таким образом, очевидно, что при фрикционной разрезке микровыступы диска осуществляют не столько упругое и пластическое оттеснение металла, что имеет преобладающее значение в парах трения машин и механизмов, но и микрорезание, которое может переходить в "заедание", сопровождающееся удалением макрообъемов. Следовательно, интенсивность фрикционной разрезки в значительной мере определяется интенсивностью процессов микрорезания и заедания.

Каргельским И.В. и Алексеевым Н.М. установлено, что интенсивность микрорезания и заедания в значительной степени определяется положительным градиентом механических свойств скользящего элемента, природа которого - деформационная. Разработанная ими деформационная модель заедания приемлема для пар трения, работающих в условиях низких температур.

Высокие температуры поверхности разрезаемой заготовки исключают деформационное упрочнение поверхностного слоя. Однако, как установлено нашими исследованиями, положительный градиент механических свойств заготовки имеет место и при фрикционной разрезке, но природа его не деформационная, а тепловая.

Этот результат получен из теоретического анализа скольжения микронеровностей диска, осуществляющих пластическое оттеснение металла, при сравнении работы трения и тепла, отводимого в микронеровность диска через поверхность контакта ее с металлом заготовки. Установлено, что при температурах заготовки, выше 1000°C , теплоотвод более интенсивен, чем накопление тепла при пластическом оттеснении металла заготовки. Поэтому поверхность металла заготовки, контактирующая с микронеровностью, охлаждается, а значит и упрочняется, в результате чего обеспечивается положительный градиент механических свойств заготовки. Поддержание же высокой температуры заготовки обеспечивается в результате микрорезания и заедания.

Согласно тепловой модели положительного градиента механичес-

ких свойств заготовки, контактирующей с микронеровностями, производящими пластическое отеснение, установлено, что критическое значение величины относительного внедрения тем меньше, чем больше разность температур заготовки и диска $\Delta T = T_k - T_0$. Таким образом, чем больше ΔT , тем большее число микровыступов совершает микрорезание. Следовательно, все меры, ведущие к уменьшению нагрева диска, одновременно ведут и к увеличению интенсивности микрорезания и заедания, т. е. найдено необычное условие повышения производительности фрикционной разрезки.

Теоретический анализ воздействия наиболее выступающих микронеровностей диска показал, что скорость движения валика деформируемого материала впереди микронеровности превышает скорость резания от двух до семи раз. Это приводит к формированию полностью насыщенного контакта на площади, близкой к номинальной площади контакта. Таким образом, установлена важная особенность процесса трения при фрикционной разрезке - периодическое формирование полностью насыщенного контакта, охватывающего почти всю номинальную площадь контакта. При этом сдвиг слоев металла заготовки происходит по поверхности, удаленной от поверхности контакта с диском на толщину нароста - "чешуек", прилипших к диску. Поверхность, по которой происходит сдвиг, наиболее нагрета и отстоит от поверхности контакта на толщину "чешуек" - 0.04 ... 0.06 мм.

В моменты образования полностью насыщенного контакта исключена возможность течения металла заготовки в пространство между микронеровностями. В этих условиях металл заготовки движением подачи выдавливается на боковые стороны заготовки или боковые стенки прорези. Полученные результаты исследования контакта диска с заготовкой на микроуровне легли в основу модели макропластических деформаций приконтактной зоны заготовки.

Показатели процесса фрикционной разрезки и сама возможность ее осуществления, в основном, определяются тепловыми процессами, сопровождающими разрезку. Поэтому управление процессом фрикционной разрезки - это в значительной степени управление нагревом заготовки и диска. Разработаны несколько моделей температурного поля в заготовке. Одна из предлагаемых моделей рассматривает заготовку, как адиабатический стержень или полупространство $X > 0$, X - координата в направлении, перпендикулярном источнику тепла в тело заготовки. Плоскость $X = 0$ - источник тепла, который движется в направлении по оси X со скоростью подачи V_{II} диска при разрезке. Источник тепла - равномерной интенсивности, а температура в источнике - T_k . Математическая запись этой задачи

$$\frac{dT(x, t)}{dt} = a \frac{d^2 T(x, t)}{dx^2} + V_{II} \frac{dT(x, t)}{dx}$$

Краевые условия: $dT(x, 0) = 0$; $dT(0, t) = T_k$; $dT(\infty, t) = 0$.

Решение этой задачи получено операционным методом:

$$T(a, t) = \frac{T_k}{2} \left[\exp\left(-\frac{V_{II} \cdot X}{a}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{X - V_{II} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{at}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{X + V_{II} \cdot t}{2 \cdot \sqrt{at}}\right) \right], \quad (1)$$

где t - время, a - коэффициент температуропроводности.

При установившемся теплообмене, т.е. при $t \rightarrow \infty$, с учетом температуры T_0 окружающей среды

$$T(x, \infty) = T_0 + (T_k - T_0) \exp\left(-\frac{V_{II} \cdot X}{a}\right). \quad (2)$$

Анализ (1) позволил определить время практической стабилизации температурного поля впереди диска - t_d и границу его X_r :

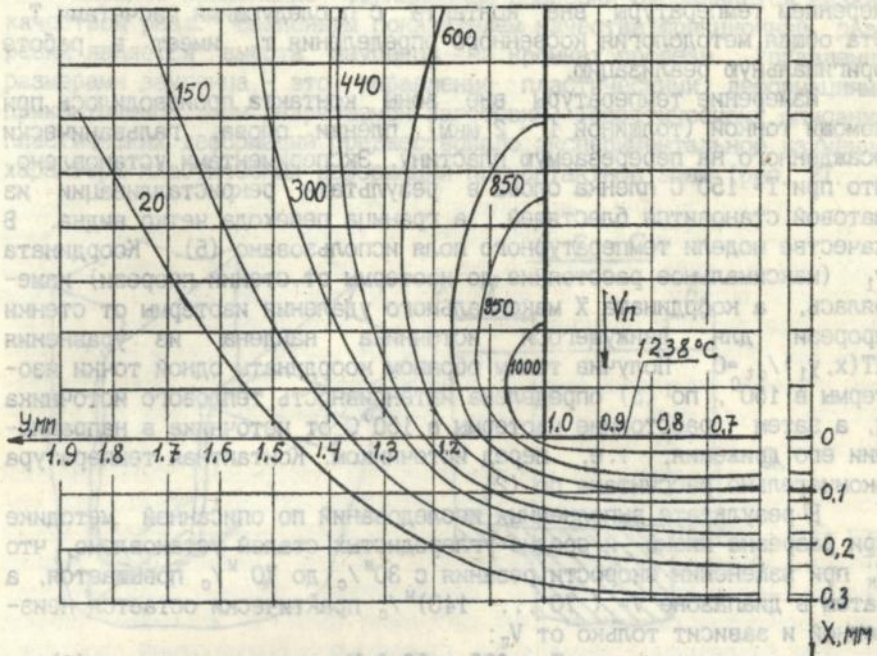
$$X_r = \frac{a}{V_{II}} \cdot \ln T_k, \quad (3); \quad t_d = \left[-\frac{1.2\sqrt{a}}{V_{II}} \pm \sqrt{\frac{1.44}{V_{II}^2} + \frac{X_r}{V_{II} \cdot X}} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Из двух возможных значений t_d выбирается то, которое соответствует условию $X < |t_d \cdot V_{II}|$.

Используя полученные в дальнейшем значения T_k , согласно (3) и (4) установили, что время стабилизации температурного поля уменьшается с ростом V_{II} , и при разрезке конструкционных сталей с $V_{II} = (1 \dots 6) \text{ м/мин}$ находится в диапазоне $(0.02 \dots 0.3)$ с, а $X_r = (0.5 \dots 2.5) \text{ мм}$. Температурное поле при высоких скоростях подачи очень сжато и стабилизация его происходит почти мгновенно. Следовательно, фрикционная разрезка осуществляется в условиях квазистационарного температурного поля.

Одномерная модель (1) распространения тепла однако не дает описания температурного поля на боковых стенках прорези, что необходимо для оценки механических свойств и структурных превращений металла в них. Двумерная задача теплопроводности решена моделированием на ЭВМ методом конечных разностей с учетом движения источника тепла вдоль оси X и зависимости a от температуры. На рис. 1 показан пример температурного поля в пластине.

Результаты моделирования, не имеющие аналитического описания, трудно использовать в инженерных расчетах. Это оправдывает поиск приемлемого аналитического выражения. Анализ температурного поля, полученного моделированием, показал его качественное подобие полю от линейного движущегося в пространстве и равномерно



Температурное поле, полученное моделированием при разрезке стали 20 с $V_{п} = 8.25^{\circ}\text{C}^{\text{м}}/\text{с}$ и $T_{к} = 1238^{\circ}\text{C}$.

Рис. 1.

распределенного источника тепла, описанного Рыкалиным Н. Н. Для установившегося теплообмена

$$dT(x, t) = \frac{q}{2\pi\lambda} \exp\left(\frac{V_{п} \cdot X}{a}\right) \cdot K_0\left(\frac{V_{п} \cdot \sqrt{x^2 + y^2}}{2 \cdot a}\right), \quad (5)$$

и это выражение широко используется в работе, так как хорошо описывает поле, полученное моделированием.

Для описания температурных полей необходимо знание температуры и тепловых потоков на граничных поверхностях и, в частности, температуры наиболее нагретой поверхности заготовки (по нашему определению - контактной температуры $T_{к}$). Анализ опробованных прямых экспериментальных методов измерения $T_{к}$ обнаружил их большую погрешность в применении к фрикционной разрезке в связи с малыми размерами температурного поля, большими деформациями поверх-

ностного слоя разрезаемой заготовки и прерывистым контактом диска с заготовкой. Поэтому определение T_K производилось косвенно с измерением температуры вне контакта с последующими расчетами T_K . Эта общая методология косвенного определения T_K имеет в работе оригинальную реализацию.

Измерение температуры вне зоны контакта производилось при помощи тонкой (толщиной 1 - 2 мкм) пленки олова, гальванически осажденного на перерезаемую пластину. Экспериментами установлено, что при $T = 150^{\circ}\text{C}$ пленка олова в результате рекристаллизации из матовой становится блестящей, а граница перехода четко видна. В качестве модели температурного поля использовано (5). Координата y_1 (максимальное расстояние до изотермы от стенки прорези) измерялась, а координата X максимального удаления изотермы от стенки прорези для движущегося источника найдена из уравнения $dT(x, y_1)/dt = 0$. Получив таким образом координаты одной точки изотермы в 150° , по (5) определена интенсивность теплового источника q , а затем - расстояние изотермы в 150°C от источника в направлении его движения, т.е. перед источником. Контактная температура окончательно рассчитана по (2).

В результате выполненных исследований по описанной методике при разрезке низко- и средне углеродистых сталей установлено, что T_K при изменении скорости резания с $30^{\text{м}}/\text{с}$ до $70^{\text{м}}/\text{с}$ повышается, а затем в диапазоне $V = (70 \dots 140)^{\text{м}}/\text{с}$ практически остается неизменной и зависит только от $V_{\text{п}}$:

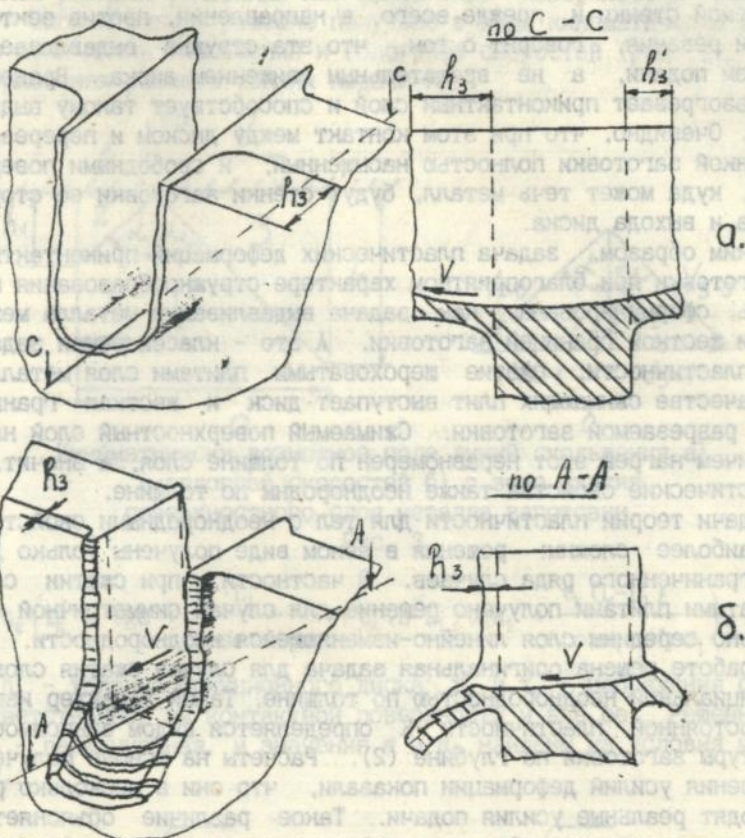
$$T_K = 685 + 59.8 \cdot V_{\text{п}} \quad (6)$$

Двумерная модель (5) квазистационарного температурного поля в перерезаемой стенке заготовки позволила теоретически оценить характер возможных структурных превращений в поверхностном слое после фрикционной разрезки и глубину слоя, охватываемого этими изменениями. Для этого построены термические циклы для металла заготовки по температурному полю на различном удалении от стенки прорези, которые накладывались на изотермические диаграммы распада аустенита для различных сталей. Анализом установлено, что при разрезке сталей 45, 40X, ШХ15 со скоростью подачи $V_{\text{п}} > 3^{\text{м}}/\text{мин}$, поверхностный слой заготовки претерпевает закалку на мартенсит глубиной не более 0.2 мм. Установлено, что увеличение $V_{\text{п}}$ ведет к уменьшению глубины закаленного слоя.

Полученные теоретические результаты проверены экспериментально: Стали 45 и ШХ15 разрезаны с параметрами $V = 100^{\text{м}}/\text{с}$, $V_{\text{п}} = 1, 3$ и $5^{\text{м}}/\text{мин}$, а затем подвергнуты металлографическому и химическому анализам (определена микротвердость поверхностного слоя и по сечению образца). Установлено, что увеличение $V_{\text{п}}$ ведет к уменьшению глубины закаленного слоя, а значение этой глубины, установленное теоретически, находится в диапазоне глубин закалки, полу-

ченных экспериментально.

Широкое применение фрикционной разрезки сдерживается низким качеством реза. Важнейшим показателем качества фрикционной разрезки является высота заусенца на краях прорези. Управление размерами заусенца - это управление пластическими деформациями приконтактной зоны разрезаемой заготовки. Теоретическому описанию пластических деформаций предшествовало экспериментальное изучение характера пластических деформаций приконтактной зоны (рис. 2).



Виды приконтактной зоны, окружающей дно прорези.

Рис. 2.

Наиболее типичен вид, показанный на рис. 2, а: в направлении вектора скорости резания V и в противоположном ему образуется заусе-

нец, имеющий высоту соответственно h_a и h_a' , причем $h_a > h_a'$. Вид, показанный на рис. 2, б, встречается очень редко и характерен тем, что впереди диска выдавливается ленточка металла, называемая нами стружкой. При этом заусенцы на кромках прорези очень малы (менее 1 мм). Такой характер пластических деформаций, называемый нами стружкообразованием, благоприятен с точки зрения качества процесса резки. Стабильное обеспечение такого характера стружкообразования кардинально решает важнейшую задачу улучшения качества резки.

Наличие стружки, вытекающей впереди диска с обеих сторон прорезаемой стенки и, прежде всего, в направлении, против вектора скорости резания, говорит о том, что эта стружка выдавливается движением подачи, а не вращательным движением диска. Вращение диска разогревает приконтактный слой и способствует такому выдавливанию. Очевидно, что при этом контакт между диском и прорезаемой стенкой заготовки полностью насыщенный, и свободными поверхностями, куда может течь металл, будут стенки заготовки со стороны входа и выхода диска.

Таким образом, задача пластических деформаций приконтактной зоны заготовки при благоприятном характере стружкообразования может быть сформулирована, как задача выдавливания металла между диском и жесткой границей заготовки. А это - классическая задача теории пластичности: сжатие шероховатыми плитами слоя металла, где в качестве сжимающих плит выступает диск и жесткая граница металла разрезаемой заготовки. Сжимаемый поверхностный слой нагреет, причем нагрев этот неравномерен по толщине слоя, а значит, и его пластические свойства также неоднородны по толщине.

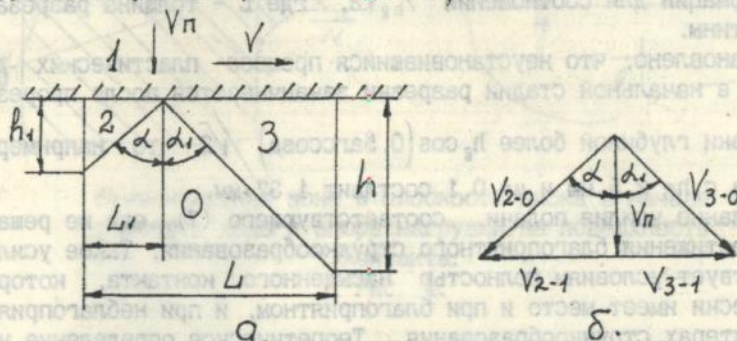
Задачи теории пластичности для тел с неоднородными свойствами - наиболее сложны: решения в явном виде получены только для очень ограниченного ряда случаев. В частности, при сжатии слоя шероховатыми плитами получено решение для случая симметричной относительно середины слоя линейно-изменяющейся неоднородности.

В работе решена оригинальная задача для случая сжатия слоя с экспоненциальной неоднородностью по толщине. Такой характер изменения постоянной пластичности K определяется видом зависимости температуры заготовки по глубине (2). Расчеты на основе полученного решения усилий деформации показали, что они в несколько раз превосходят реальные усилия подачи. Такое различие объясняется тем, что в теоретической задаче деформируется только слой нагретого, разупрочненного металла, толщина которого очень мала. Поэтому усилие деформации, обратно пропорциональное толщине сжимаемого слоя, велико.

Такое отличие решения от реальных условий резки показало, что деформируется слой металла заготовки, значительно более толст-

тый, чем только нагретый. Такой вывод подтвержден измерениями толщины деформируемого слоя впереди диска по шлифам заготовки в плоскости диска. Установлено, что толщина этого слоя больше 1 мм и отношение толщины его на выходе диска из контакта к толщине его на входе - равно примерно 1.5.

Таким образом, нагретый до высокой температуры поверхностный слой толщиной примерно 0.1 мм составляет малую долю толщины всего деформируемого слоя. Поэтому в дальнейшем решалась задача сжатия однородного неразупрочненного слоя, а нагрев поверхности его учитывался разными условиями на контактных поверхностях сжимающих плит. Окончательное решение получено в виде кинематически возможного поля линий скольжения и годографа скоростей (рис. 3), а также уравнения расчета усилия подачи P_y :



Кинематически возможное поле линий скольжения а) и годограф скоростей б) в зоне сжатия поверхностного слоя металла заготовки.

Рис. 3.

$$P_y = h_g \left(\tau_k \cdot L \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{\tau_s \cdot L_1}{\cos \alpha \cdot \sin \alpha} - \tau_k (L - L_1) \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{\tau_k (L - L_1)}{\cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1} \right), \quad (7)$$

где h_g - толщина фрикционного диска; τ_k и τ_s - напряжения сдвига, соответственно, на контактной поверхности и вне ее. Решенная задача - вариационная, и значения α и α_1 найдены из условия минимума P_y :

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_k + \tau_s}}, \quad \alpha_1 = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_s - \tau_k}}.$$

В данной модели пластических деформаций учтены направление вращения диска (знаком минус перед слагаемым, определяющим работу трения на участке $(L - L_1)$), а также неодинаковая толщина сжимаемого

слоя на входе и выходе диска. В разработанной модели принято, что движением подачи металл заготовки вытесняется только на боковые стороны прорезаемой пластины. Однако очевидно, что это возможно и на боковые стенки прорези. Такая задача пластических деформаций также решена в виде выражения для определения нормального напряжения σ_n в контакте, необходимого для того, чтобы металл выдавливался на боковые стенки прорези:

$$\sigma_n = K(9.85 - \arccos 2\mu) \quad (8)$$

где μ - коэффициент пластического трения.

Совместное решение (7) и (8) позволило найти уравнения линий раздела течения металла, анализ которого показал, что течение металла на боковые стенки прорези можно не учитывать при расчете усилия деформации для соотношений $L/h_g < 3$, где L - толщина разрезаемой пластины.

Установлено, что неустановившийся процесс пластических деформаций в начальной стадии разрезки заканчивается после прорезания канавки глубиной более $h_g \cos(0.5 \arccos \mu) / \sqrt{2}$, что например, для диска с $h = 2.5$ мм и $\mu = 0.1$ составит 1.37 мм.

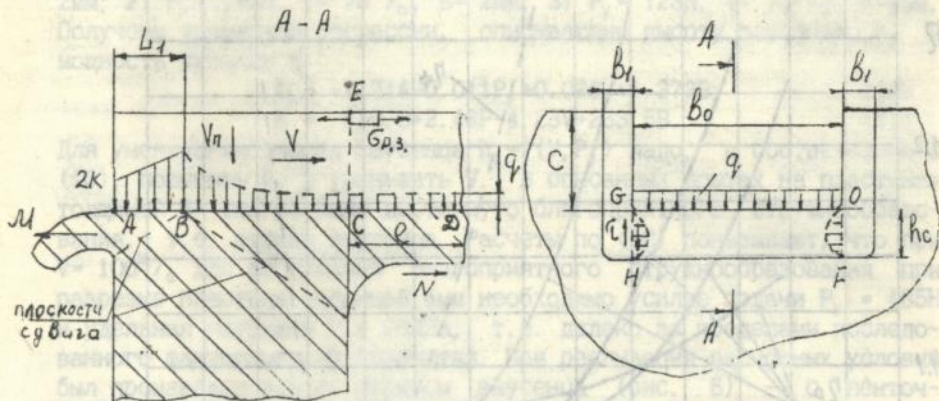
Создание усилия подачи, соответствующего (7), еще не решает задачи достижения благоприятного стружкообразования. Такое усилие соответствует условиям полностью насыщенного контакта, который периодически имеет место и при благоприятном, и при неблагоприятном характерах стружкообразования. Теоретическое определение условий благоприятного стружкообразования выполнено на основе экспериментально установленного факта, что при переходе от неблагоприятного к благоприятному стружкообразованию происходит перераспределение в преимущественном течении металла: от вытекания на боковые кромки прорези в виде заусенца к вытеканию впереди диска в виде ленточки-стружки, имеющей корытообразное сечение. Нагрузка q , действующая на дно корытообразной стружки (рис. 4), может привести к отрыву боковых стенок "корытца", т.е. заусенца, от кромок прорези в точке E (место наибольших растягивающих напряжений) при действии изгибающего момента, если ранее не произойдет отрыв дна "корытца" от его стенок.

Записав условие отрыва заусенца от прорезаемой стенки в точке E, а также условие сохранения прочности стружки - "корытца" в плоскостях GH и OF, получаем физическое описание условия благоприятного стружкообразования:

$$\eta_{\phi} = \frac{\sigma_{т.с.}}{\sigma_{т.в.}} > \frac{1.3 \cdot J_x}{h_c \cdot y_{\max} \cdot l^2} = \eta_p \quad (9)$$

где $\sigma_{т.с.}$ - предел прочности материала стружки в середине

сечения GH ; $\sigma_{т.з.}$ - предел текучести материала заусенца в точке E ; J_x - момент инерции корытообразного сечения стружки относительно оси X , проходящей через центр тяжести этого сечения.

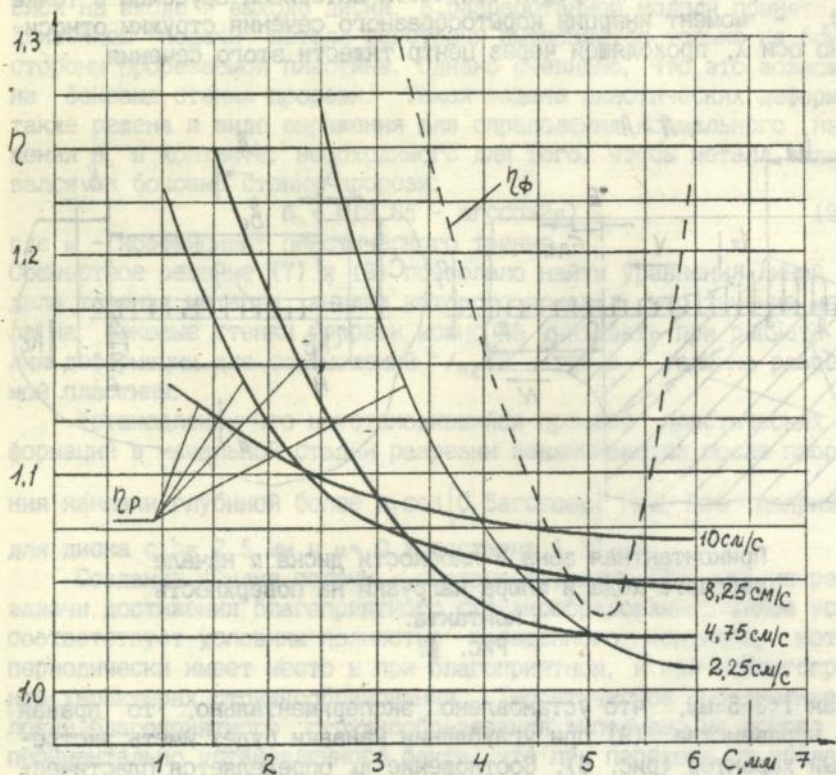


Приконтактная зона в плоскости диска в начале рабочего хода и эпюра нагрузки на поверхность контакта.

Рис. 4.

Так как $l < 3.5$ мм, что установлено экспериментально, то правая часть неравенства (9) при углублении канавки будет иметь экстремальный характер (рис. 5). Соотношение η_{ϕ} определяется пластическими свойствами заусенца и стружки в опасных сечениях, которые, в свою очередь, являются функцией температуры в этих сечениях, вычисляемой по (5). Расчеты η_{ϕ} и η_p для скорости резания 68 м/с и различных значений скорости подачи V_n в зависимости от глубины C прорезаемой канавки позволили получить кривые изменения $\eta_p(C)$ и наложить их на кривую η_{ϕ} . Условие $\eta_{\phi} > \eta_p$ выполняется в некотором диапазоне значений C для значений V_n , больше $6^{\text{м/мин}}$. Вероятность выполнения этого условия тем выше, чем больше V_n . Таким образом, установлено, что благоприятный характер стружкообразования имеет место только при больших скоростях подачи. Следовательно, повышение качества разрезки достигается одновременно с повышением производительности, что является уникальным явлением в обработке резанием.

Выявленное направление повышения качества фрикционной разрезки проверено экспериментально. Одновременно с исследованиями влияния режимов резания на качество реза проводились измерения составляющих P_z , P_y силы резания, коэффициента трения и других



Зависимость расчетных η_p и фактического η_ϕ отношений пределов текучести материалов заусенца и стружки в опасных сечениях от глубины прорезаемой канавки C .

Рис. 5.

показателей процесса. Эксперименты проводились на различных установках: лабораторной с подачей за счет веса груза; с электромеханическим приводом подачи бесступенчатого регулирования; на модернизированном для промышленных целей абразивно-отрезном станке мод. 8В242. Все эксперименты выполнены с использованием математического планирования.

На лабораторной установке варьировались: усилие подачи P_y , Н; скорость резания V , м/с; толщина разрезаемой пластины B , мм. Реализован план первого порядка, измерялись высота заусенца h_0 , мм и мощность резания N , Вт. Диапазоны усилия подачи $P_y = (123 \dots 190)$ Н и площадь контакта $F = B \cdot h_0 = (3 \dots 6)$ мм² обеспечивали

изменение удельной нагрузки $P_a = 20 \dots 64$ МПа, что значительно выше, чем в экспериментах по разрезке и трению, описанных в литературе. Благоприятный характер стружкообразования наблюдался при следующих сочетаниях уровней факторов: 1) $P_y = 190\text{Н}$, $V = 100^{\text{м}}/\text{с}$, $B = 2\text{мм}$; 2) $P_y = 190\text{Н}$, $V = 70^{\text{м}}/\text{с}$, $B = 2\text{мм}$; 3) $P_y = 123\text{Н}$, $V = 70^{\text{м}}/\text{с}$, $B = 2\text{мм}$. Получены уравнения регрессии, описывающие высоту заусенца h_s и мощность резания N :

$$h_s = -2.744 - 0.011P_y + 0.026V + 1.373B; \quad (10)$$

$$N = 410.6 + 2.48P - 4.23V + 263.5B. \quad (11)$$

Для уменьшения высоты заусенца $h_s = f(V, P_y)$ надо, в соответствии с (10), повышать P_y и уменьшать V . В описанных опытах на пластинах толщиной $B = 4\text{мм}$ не было достигнуто благоприятного стружкообразования, т.е. отрыва заусенца. Расчеты по (10) показывают, что при $V = 100^{\text{м}}/\text{с}$ для достижения благоприятного стружкообразования при разрезке пластины толщиной 4мм необходимо усилие подачи $P_y = 485\text{Н}$ и удельная нагрузка $P_a = 80\text{МПа}$, т.е. далеко за пределами исследованного факторного пространства. При реализации расчетных условий был произведен рез с отрывом заусенца (рис. 6) - с ленточкой-стружкой, выдавленной впереди диска, и небольшим заусенцем на краях прореза.



Канавка после прорезания в пластине толщиной 4мм из стали 08 при $V = 100^{\text{м}}/\text{с}$ и $P_y = 540\text{Н}$.

Рис. 6.

Наблюдаемый благоприятный характер стружкообразования при необычно высоких удельных нагрузках лег в основу нового способа фрикционной разрезки, защищенного авторским свидетельством СССР №1296323.

Исследования качества разрезки на промышленной установке, на которой регулировалась скорость подачи, показали, что благоприятный характер стружкообразования достигается при $V_n > 5^{\text{м}}/\text{мин}$. Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили теоретически обоснованные условия благоприятного стружкообразования.

Исследование составляющих сил резания произведено на установке с

электрохимическим приводом подачи. Описание усилий резания эмпирическими формулами необходимо, так как определение P_y по (7) и $P_z = \tau_k \cdot F$ справедливо только для экстремальных условий разрезки, т.е. для условий полностью насыщенного контакта. Такой контакт возникает при разрезке периодически с большой частотой. Для его поддержания при большой инерционности привода необходимо усилие подачи, меньше расчетного, точное значение которого теоретически трудно получить (неизвестна частота возникновения полностью насыщенного контакта). Поэтому составляющие силы резания регистрировались низкочастотными гальванометрами, дающими усредненные значения сил между максимальными (при полностью насыщенном контакте) и минимальными (при его отсутствии).

В результате выполненных экспериментов получены модели составляющих сил резания:

$$P_y = -122.2 - 12.03V + 194.3V_n + 1151_k \cdot h_g; \quad (12)$$

$$P_z = 98.3 - 2.4 \cdot V + 19.5V_n + 16.81_k \cdot h_g; \quad (13)$$

где l_k - длина дуги контакта.

Эта зависимость является основой расчета приводов станка фрикционной разрезки. Из (11), (12) и (13) получены зависимости коэффициента трения $f = P_z / P_y$. Установлено, что f находится в диапазоне 0.05 ... 0.16 и уменьшается с увеличением V и удельной нагрузки P_a , что согласуется с данными других исследователей высокоскоростного трения. Кроме этого, экспериментально установлена доля металла, выбрасываемого вращением диска из объема прорези, что позволяет получить количественную оценку вероятности формирования полностью насыщенного контакта во время разрезки.

Инструмент фрикционной разрезки - гладкий диск. Управление нагревом и деформациями диска важнейшая задача эффективного ведения процесса. При постановке задачи теплопроводности для диска учитывалось, что источник тепла на поверхности диска - быстро движущийся. Поэтому он может быть заменен непрерывно действующим во время контакта и отсутствующим вне его. Кроме этого учитывался конвективный теплоотвод от периферии и торцев диска (при помощи коэффициента поверхностной теплоотдачи - b). Такая нестационарная задача теплопроводности решена операционным методом:

$$T(x, t) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{x^2}{4a(t-\tau)} - b(t-\tau)\right] q(0, \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}. \quad (14)$$

где a, λ - коэффициенты температуро- и теплопроводности; t - время; $q(0, \tau)$ - интенсивность теплового потока в диск; x - координата в направлении от периферии диска к его центру.

Из (14) для периферии диска ($X=0$) получены оригинальные формулы расчета максимальной температуры нагрева диска $T=T_{\max}$, соответствующей моменту выхода диска из контакта, и минимальной температуры диска $T=T_{\min}$ - моменту входа диска в контакт. Эти температуры определяются для каждого цикла "нагрев-охлаждение" диска, т.е. для каждого его оборота:

$$T_{\max} \Big|_{x=0} = \frac{q_1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{b}} \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n \left\{ \operatorname{erf} \left(\sqrt{b(t_n(n-i)+t_k)} \right) - \operatorname{erf} \left(\sqrt{b(t_n(n-i+1)-t_k)} \right) \right\}; \quad (15)$$

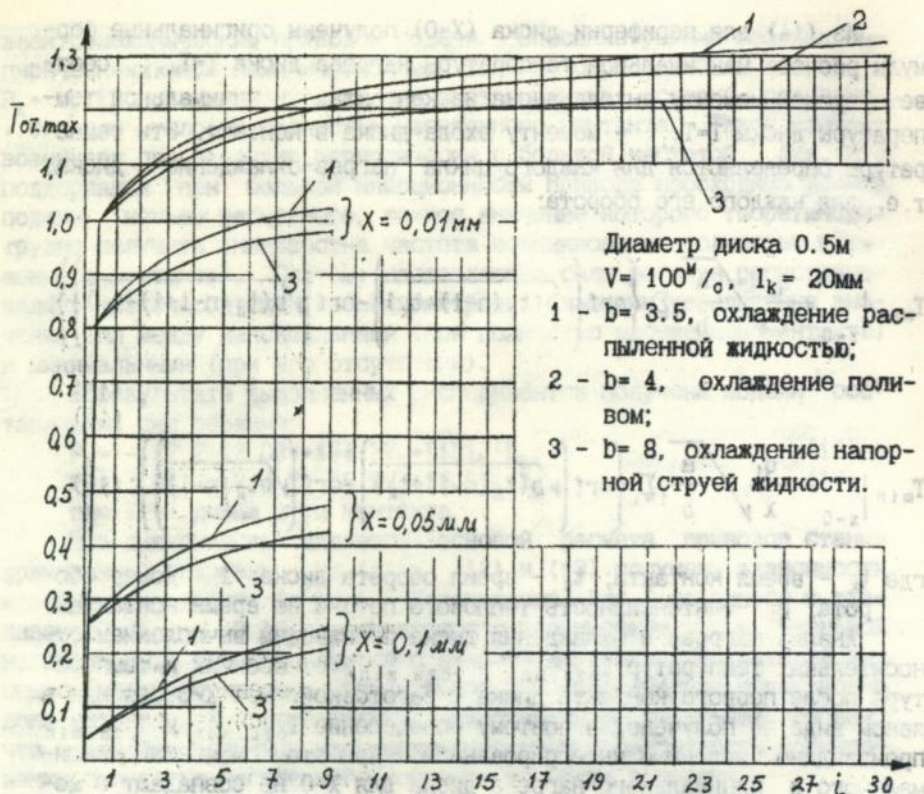
$$T_{\min} \Big|_{x=0} = \frac{q_1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{b}} \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n \left\{ \operatorname{erf} \left(\sqrt{b(t_n(n-1)+t_k)} \right) - \operatorname{erf} \left(\sqrt{bt_n(n-1)} \right) \right\}; \quad (16)$$

где t_k - время контакта; t_n - время оборота диска; i - номер оборота; q_1 - интенсивность теплового потока во время контакта.

Анализ нагрева и охлаждения диска производим вычислением относительных температур $T_{\text{отн. max}}$ и $T_{\text{отн. min}}$, отнесенных к температуре после первого контакта диска с заготовкой. При $X \neq 0$ решение в явном виде не получено, и поэтому определение $T_{\text{отн. max}}$ и $T_{\text{отн. min}}$ произведено численным интегрированием. При этом моменты максимального и минимального нагрева диска для $X \neq 0$ не совпадают с моментами выхода и входа его в контакт, как это имеет место при $X=0$, и поэтому эти моменты и соответствующая им температура найдены вычислением температуры с шагом по времени - Δt .

Графический анализ влияния различных параметров процесса на нагрев диска выполнен по построенным кривым максимального - $T_{\text{отн. max}}$ и минимального - $T_{\text{отн. min}}$ нагрева в зависимости от номера оборота диска - i . Так, (рис. 7) показано изменение $T_{\text{отн. max}}$ на различном расстоянии X от периферии диска толщиной 1.5мм из стали 20.

Из рис. 7 видно, что охлаждение значительно снижает накапливающуюся температуру, а при охлаждении высоконапорной струей после 20 оборотов диска неустановившийся режим нагрева и охлаждения переходит в квазистационарный. Наибольшее влияние на нагрев диска оказывает время пребывания периферии диска в зоне контакта, а следовательно, длина дуги контакта l_k и скорость резания V . Увеличение l_k и V ведет, соответственно, к увеличению и уменьшению нагрева диска, увеличение диаметра диска также ведет к уменьшению его нагрева. Установлено, что при разрезке с $l_k > 8$ мм и при большой



Зависимость $T_{отн. max}$ от l для различных X .

Рис. 7.

длине рабочего хода желательно охлаждение диска.

Наблюдения за фрикционным диском показали, что со временем происходит его утолщение у периферии, и диск в сечении приобретает грибообразную форму. Таким образом, происходит деформация диска. В работе получена модель деформации диска в виде кинематически возможного поля линий скольжения, на основе которой выведена формула расчета средних нормальных напряжений в зоне контакта, при которых происходит деформация диска:

$$\sigma_{ср.д.} = 2 \left(\tau_{к.г.} \operatorname{tg} \alpha + \frac{\tau_{с.г.}}{\sin 2\alpha} \right) \quad (17)$$

где $\tau_{к.г.}$, $\tau_{с.г.}$ - предел текучести на одвиг в плоскости контакта

такта и для остального материала диска, соответственно.

Рассматривая процесс деформирования диска, необходимо учитывать, что грибообразное сечение диска предотвращает контакт его торцевых поверхностей со стенками прорези. Происходит как бы естественное поднутрение. Кроме этого, учитывая, что поверхностный слой диска внедрен в металл разрезаемой заготовки, течению металла диска в направлении, перпендикулярном торцам диска, препятствуют стенки прорези. Поэтому деформация диска в боковые стороны может происходить на некотором расстоянии от его периферии, т.е. в зазоре между стенками прорези и торцами диска. Это расстояние принимается нами равным толщине срезаемой "чешуйки" с поверхности детали - h_q . Таким образом, для деформации диска необходимо создать в контакте нормальные напряжения $\sigma_{ср.г.}$, определенные по (17), но $\tau_{к.г.}$ принимать в качестве постоянной пластичности материала диска на расстоянии h_q от поверхности, имеющей максимальную температуру контакта.

Указанные $\sigma_{ср.г.}$ создаются сопротивлением заготовки деформированию. Следовательно, условием деформации диска будет превышение максимальных номинальных напряжений, необходимых для деформации заготовки, по сравнению с $\sigma_{ср.г.}$:

$$\sigma_{\max.п.} > \sigma_{ср.г.} \quad (18)$$

Максимальные номинальные напряжения в разрезаемом прокате имеют место на участке L_1 (см. рис. 3) и находятся из (7). В разрезаемом прокате при полностью насыщенном контакте срыв чешуйки происходит на расстоянии $X=h_q$ от поверхности заготовки. Поэтому в (7) $\tau_{к.п.}$ вычисляется на расстоянии $X=h_q$.

Таким образом, на основании (18), зная контактную температуру (6), имея модели температурных полей в прокате (5) и диске (14), зависимости пределов текучести от температуры и скорости деформации, можно получить:

$$\left[56.6 - (21.1 + 2.77 \cdot V_{п.}) \cdot \exp\left(-\frac{V_{п.} \cdot h_q}{a}\right) \right] \cdot K_{\xi п.} = \left[56.6 - (21.1 + 2.77 \cdot V_{п.}) \cdot \dots \right. \\ \left. \dots \left(1 - \frac{h_q}{\sqrt{a \tau}}\right) \right] \cdot K_{\xi г.} \quad (19)$$

где $K_{\xi п.}$, $K_{\xi г.}$ - коэффициенты, учитывающие влияние скорости деформации ξ на пластические свойства материала заготовки; τ - время контакта.

Для углеродистых сталей $K_{\xi} = A \cdot \xi^m$, а $m=0.143$. Принимая $\tau = l_k / v$

можно (19) разрешить относительно ξ_g .

В теории резания обычно критерием стойкости инструмента принимают величину его износа. Однако износ фрикционного диска — уменьшение его диаметра, не влияет заметно на показатели процесса. Увеличение же толщины диска ведет к увеличению силы резания и при тонком диске небольшое утолщение заметно изменяет эту силу. Увеличение силы резания, что само по себе является отрицательным явлением с точки зрения энергоемкости процесса, ведет к повышению нагрузки на диск при неизменной его толщине (кроме участка у периферии). В связи с этим повышается опасность потери устойчивости диска, и поэтому в качестве критерия стойкости его берется не уменьшение диаметра, а утолщение на периферии.

Очевидно, что высокая стойкость диска будет обеспечена при малой ξ_g . Выбрав значение ξ_g и выразив через ξ_g скорость течения металла диска в сторону утолщения, а также выбрав предельное значение утолщения b_k , можно из (19) получить формулу для расчета времени работы диска до достижения критерия стойкости, т.е. периода стойкости $\tau_{с.т.}$:

$$\tau_{с.т.} = \frac{(b_1 - 0.3) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D \cdot L_1}{\beta \cdot h_g \cdot l_k \cdot V_{\Pi}} \cdot \left[\frac{A_g}{B_g (685 + 59.8 \cdot V_{\Pi})} + \frac{h_q}{\sqrt{\frac{l_k \cdot a \cdot \pi}{V}}} - 1 \right] \cdot e^{\frac{v_{\Pi} \cdot h_q}{a}} - \frac{A_{\Pi}}{B_{\Pi} (685 + 59.8 \cdot V_{\Pi})} \quad (20)$$

где A_g , B_g , A_{Π} , B_{Π} — коэффициенты линейной аппроксимации зависимости пределов текучести материалов диска и разрезаемого проката от температуры; b_1 — допускаемое утолщение диска; β — вероятность полностью насыщенного контакта.

Расчет, например, для условий: $D = 600$ мм, $b_1 = 0.7$ мм, $\beta = 0.5$, $h_g = 2.5$ мм, $l_k = 7$ мм, $V_{\Pi} = 8.3^{с.м./с.}$, $a = 0.073$ см²/с, $h_q = 0.005$ см, $V = 100^{м/с.}$, $L_1 = 0.08$ см, материал разрезаемого проката — сталь 20, материал диска — сталь 08, дает $\tau_{с.т.} = 70.4$ мин (при разрезке для тех же условий стали 45 — $\tau_{с.т.} = 33$ мин).

Результаты расчетов сравнивались с полученными экспериментально, и расхождения составили менее 6%, что позволяет говорить о допустимости для практического применения формулы (20).

Анализ расчета стойкости дисков для фрикционной разрезки (20) показывает, что период стойкости изменяется прямо пропорционально скорости резания и диаметру диска и обратно пропорционально скорости подачи и длине дуги контакта. Последний параметр в

наибольшей степени влияет на $\tau_{от}$.

Из (7), (12) и (13) следует, что усилие резания растет с увеличением толщины диска h_g , которую, следовательно, необходимо стремиться уменьшать. Ограничением толщины диска является его устойчивость, т.е. способность сопротивляться деформации изгиба от усилия резания. Таким образом, для управления устойчивостью диска надо уметь рассчитывать критическую нагрузку. Теория устойчивости упругих систем не предлагает решения, которое можно было бы прямо использовать при расчете критической нагрузки из условия статической устойчивости диска. Поэтому такая задача решается в данной работе.

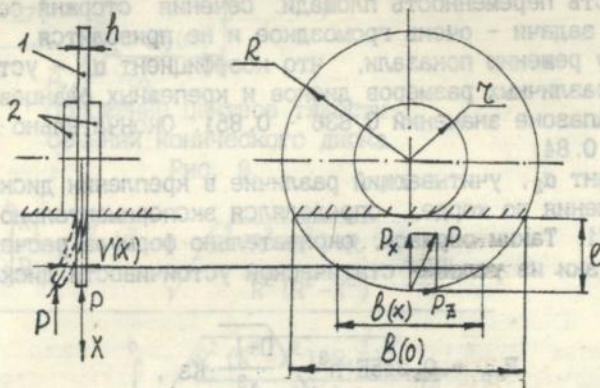


Схема крепления, нагружения и деформации диска для фрикционной разрезки.

Рис. 8.

На рис. 8 показана схема нагружения и деформации (пунктиром) диска при потере им устойчивости. Учитывая, что $P_z \ll P_x$, можно для практических расчетов рассматривать нагружение диска только силой P_y , т.е. радиальной составляющей. Реальные условия нагружения и крепления диска ближе всего к схеме нагружения и крепления стержня, один конец которого зашпелен по хорде диска на расстоянии r от центра, а другой нагружен силой $P=P_x$ вдоль стержня. Если бы диск, представленный в виде стержня длиной l , имел постоянное сечение шириной $b(0)$ и толщиной h , то критическая величина силы

$$P_{кр.} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{4 \cdot l^2} \quad (21)$$

где E - модуль упругости; J_{min} - минимальный момент инерции

стержня ($J_{min} = b_0 h^3 / 12$).

Для приближения (21) к реальным условиям учтена переменность сечения стержня-сегмента вдоль оси X и различие реального крепления диска фланцами от защемления по хорде введением коэффициентов, соответственно, α_1 и α_2 сомножителями в формулу (21).

Коэффициент α_1 найден сравнением решения по (21) с приближенным решением методом Ритца для стержня переменного сечения. Согласно этому методу прогиб диска описывался как $f_1 x^2 + f_2 x^4$, а частные производные энергии - Э упругой системы по f_1 и f_2 приравнивались нулю.

В формулу расчета энергии деформации диска входит изгибающий момент $M(x)$ и момент инерции $J(x)$, как функции координаты X, что позволяет учесть переменность площади сечения стержня-сегмента. Решение этой задачи - очень громоздкое и не приводится. Расчеты по полученному решению показали, что коэффициент α_1 - устойчивая величина для различных размеров дисков и крепежных фланцев, изменяющаяся в диапазоне значений 0.836 - 0.851. Окончательно α_1 принимаем равным 0.84.

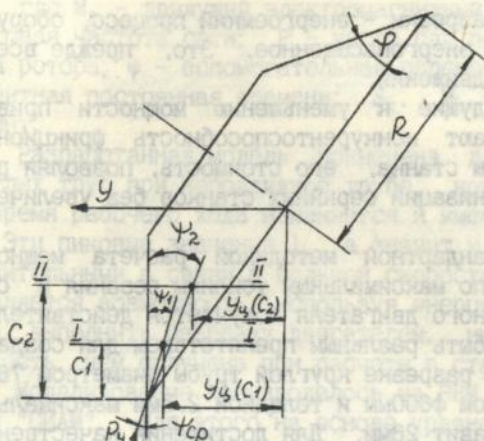
Коэффициент α_2 , учитывающий различие в креплении диска фланцами от защемления по хорде, определялся экспериментально и принят равным 0.71. Таким образом, окончательно формула расчета критической нагрузки из условия статической устойчивости диска

$$P_{кр.} = 0.245E \cdot h^3 \sqrt{\frac{D-1}{1^3}} \cdot K_3, \quad (22)$$

где K_3 - коэффициент запаса.

В практике применения фрикционной разрезки особенно актуально обеспечение устойчивости при разрезке под углом, т.е. когда нагрузка приложена не в плоскости диска. Нами предложен эффективный способ повышения устойчивости диска - применение конического диска (рис. 9), что возможно только тогда, когда требования к плоскостности реза невелики. Повышение устойчивости диска основано на том, что момент инерции, например, сечения I-I, значительно больше момента инерции для плоского диска такого же радиуса R на таком же расстоянии C_1 от места приложения силы P_y . Однако заметное повышение устойчивости конического диска будет достигнуто при нагружении его в направлении, проходящем через центры тяжести сечений. Так, например, для сечения I-I, (рис. 9) центр тяжести, показанный точкой, находится на расстоянии $Y_c(C_1)$, а для сечения II-II - на расстоянии $Y_{II}(C_2)$ и т.д.

Таким образом, нагрузка P_y должна быть направлена под углом $\phi_{кр.}$ к образующей, что обеспечит максимальную устойчивость диска.



Положение центров тяжести сечений конического диска

Рис. 9.

В работе получена формула расчета координаты центра тяжести $Y_{ц}$ вдоль оси Y в зависимости от расстояния от рассматриваемого сечения до точки приложения нагрузки:

$$Y_{ц} = \frac{\int_0^{R_1} \sqrt{R^2 - X^2} \times \sqrt{\frac{R^2(R^2 - X^2) + R_1^2 X^2}{R^2(R^2 - X^2)}} dX}{\int_0^b \sqrt{\frac{R^2(R^2 - X^2) + R_1^2 X^2}{R^2(R^2 - X^2)}} dX} \quad (23)$$

где $b = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{C}{\cos\varphi}\right)^2}$, $R_1 = R \cdot \cos\varphi$.

Зная $Y_{ц}$ и C , находим $\psi = \arctg\left(\frac{R_1 - Y_{ц}}{C}\right)$. Так, например, для диска $R = 75\text{мм}$ и $\varphi = 5^\circ$ получаем направление максимальной устойчивости $\psi_{ср} \approx 1^\circ 30'$, а для диска $R = 75\text{мм}$ и $\varphi = 10^\circ$ - $\psi_{ср} \approx 3^\circ$. Выполнена экспериментальная проверка результатов расчета направления максимальной устойчивости конических дисков, которая подтвердила приемлемость полученных формул.

Проведено экспериментальное сравнение устойчивости плоского диска с подобными коническими (того же диаметра и толщины) при нагружении в направлении максимальной устойчивости. Установлено, что конический диск с конусностью $\varphi = 5^\circ$ превосходит подобный ему жесткий диск по устойчивости в 2 раза, а диск с конусностью $\varphi = 10^\circ$ - в 4 раза.

Процесс фрикционной разрезки - энергоемкий процесс, оборудование для его реализации - энергонасыщенное. Это, прежде всего, касается привода главного движения.

Поэтому все меры, ведущие к уменьшению мощности привода главного движения, повышают конкурентоспособность фрикционной разрезки, уменьшая габариты станка, его стоимость, позволяя реализовать процесс при модернизации серийных станков без увеличения их мощности.

Если пользоваться стандартной методикой расчета мощности привода главного движения по максимальным усилиям резания и скорости, то мощность приводного двигателя получается действительно очень большой, что может быть реальным препятствием для создания станка. Так, например, при разрезке круглой трубы диаметром 76 мм с толщиной стенки 2мм диском ф600мм и толщиной 2.5мм максимальная длина дуги контакта составит 26мм. Для достижения качественной разрезки необходимо вести процесс с $V_n = 5^m / \text{мин}$ и $V = 100^m / \text{с}$. Расчетное усилие резания, согласно (13), составит примерно 1000Н, а мощность резания равна 100кВт. Для такой мощности резания, учитывая допусаемую для асинхронных двигателей перегрузку в 2.2 раза, потребуется двигатель мощностью 45кВт.

Однако как показали исследования динамики привода главного движения, расчет в статике неприемлем для оборудования фрикционной разрезки. Предпосылкой необходимости динамического расчета привода являются жесткие требования к скорости резания, т.е. можно допускать торможение ротора двигателя на 10% от номинальной частоты вращения. Такое снижение скорости резания, например, со $100^m / \text{с}$ до $90^m / \text{с}$, не приводит к заметному изменению показателей процесса.

Исследования динамики привода главного движения станка фрикционной разрезки выполнено на основе разработанной модели его динамической системы, окончательная модель принята после нескольких стадий совершенствования и упрощения (от четырехмассовой до одно-массовой). Переход от четырехмассовой к двухмассовой выполнен на основе анализа известных работ, а от двухмассовой к одномассовой - на основе сравнения результатов их реализации в данной работе.

Таким образом:

$$\begin{cases} \frac{dM_n}{dt} = (\omega_0 - p \cdot Q_p) \varphi - \frac{1}{T_s} \cdot M_n ; \\ \frac{d\varphi}{dt} = 2 \left(\frac{1}{T_s} + \frac{q}{T_s} \right) M_k - \frac{1}{T_s} \varphi - (\omega_0 - p \cdot Q_p) M_n - \frac{q}{T_s} M_n ; \\ \frac{dQ_p}{dt} = \frac{1}{J_p} M_n - \frac{1}{J_p} M_c ; \end{cases} \quad (24)$$

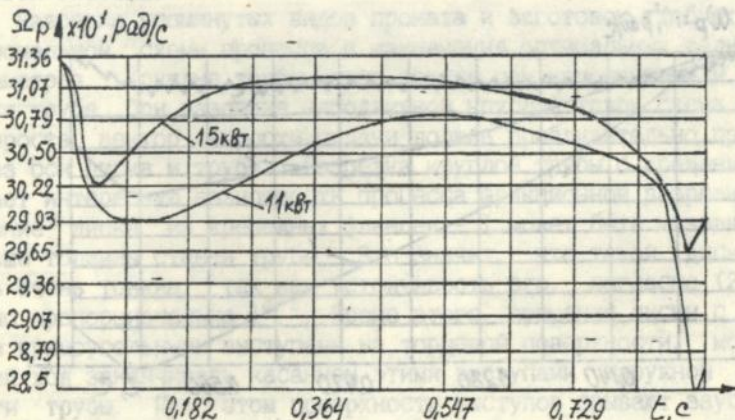
где M_d - движущий электромагнитный момент; t - время; ω_0 - круговая частота сети; P - число пар полюсов; Ω_p - круговая частота ротора; φ - вспомогательная переменная; $T_3 = S_k / \omega_0$ - электромагнитная постоянная времени; S_k, M_k - критические скольжение и момент.

Разработанная модель применена для моделирования разрезки круглых труб при неподвижной трубе, когда длина дуги контакта l_k за время рабочего хода изменяется и имеет два ярко выраженных пика. Эти пиковые значения l_k , а значит и усилия P_2 являются неподдельными в связи с большой скоростью подачи. Таким образом, появляется возможность, используя инерцию вращения элементов привода, выполнить разрезку двигателем, имеющим значительно меньшую мощность, чем получена при расчете в статике.

Моделирование производилось на ЭВМ в пакете прикладных программ "СИАМ". Для этого на основе уравнений (24) разрабатывалась структурная схема, подобная схеме моделирования на АВМ. Такая схема является входным языком пакета "СИАМ". На рис. 10 показаны зависимости угловой скорости вращения ротора двигателя от времени $\Omega_p(t)$ для описанного примера, откуда видно, что при разрезке трубы 76×2 приводом с двигателем мощностью $N = 11 \text{ кВт}$ максимальное падение Ω_p составляет 10% от номинальной частоты.

Таким образом, указанная труба может быть разрезана при мощности двигателя привода главного движения в 4 раза меньшей, чем мощность двигателя, полученная расчетом в статике.

Для разработки общих рекомендаций по выбору мощности двига-



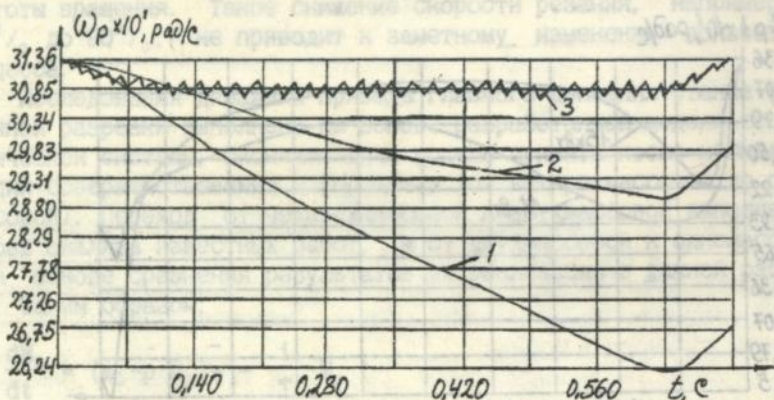
Изменение $\Omega_p(t)$ при разрезке трубы 76×2 приводом главного движения с двигателями разной мощности.

теля привода главного движения выполнено моделирование разрезки круглых труб с различной толщиной стенки. Для труб с толщиной стенки до 2мм предлагается мощность, рассчитанную статически уменьшить в 3.5 раза, а для труб с толщиной стенки выше 2 мм и менее 5мм - в 3 раза.

При разрезке проката с постоянной или плавно изменяющейся длиной дуги контакта предлагается уменьшение мощности привода вращения диска достигать эксцентричной его установкой. Такой диск вращается с радиальным биением, равным удвоенному значению эксцентриситета. При разрезке таким диском движение подачи является суммой двух движений - движения, создаваемого механизмом подачи, и движения в направлении вектора подачи за счет вращения эксцентричного диска. При определенных параметрах этих движений диск периодически входит и выходит из контакта, что искусственно создает кратковременную дополнительную нагрузку на привод.

Для моделирования привода вращения диска с радиальным биением выполнено аналитическое описание движения периферии диска в направлении подачи, что позволило получить формулы для расчета моментов входа и выхода диска из контакта с разрезаемой заготовкой. Выполнено моделирование привода с эксцентричным диском при разрезке им как круглых труб, так и прямоугольных с подачей вдоль диагонали сечения.

На рис. 11 показаны в качестве примера зависимости изменения угловой скорости ω_p ротора электродвигателя привода вращения диска при разрезке прямоугольной трубы 40*40*4 с подачей вдоль диа-



Изменение $\omega_p(t)$: 1 - диск без эксцентриситета при $N = 11кВт$;
 2 - диск без эксцентриситета при $N = 15кВт$;
 3 - диск с эксцентриситетом 0.6мм при $N = 11кВт$.

Рис. 11.

гонали сечения. Из графиков $\omega_p(t)$ видно, что при разрезке диском без эксцентриситета трубу 40×40×4 можно разрезать приводом мощностью $N = 15$ кВт. При двигателе $N = 11$ кВт падение угловой скорости до $262.2^{пад}/\%$ недопустимо большое. Разрезка же эксцентричным диском с двигателем $N = 11$ кВт приводит к падению ω_p в допустимых пределах (до $307.0^{пад}/\%$).

Обобщая результаты моделирования разрезки диском с эксцентриситетом можно констатировать, что применение дисков с эксцентриситетом 0.4 ... 0.6 мм позволяет уменьшить мощность привода на одно значение в стандартном ряду мощностей по сравнению с разрезкой диском без эксцентриситета.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования процесса фрикционной разрезки, а также практика внедрения позволяют выделить области наиболее эффективного ее применения. Это, прежде всего, разрезка замкнутых и некоторых фасонных тонкостенных профилей проката: труб круглых и прямоугольных, швеллеров, тавров и двутавров. Разрезка такого проката с толщиной стенки до 4 ... 6 мм позволяет при соответствующих режимах и прочих условиях разрезки достигнуть удовлетворительное качество, высокие производительность и стойкость инструмента.

Фрикционная разрезка эффективна также в ряде случаев при разрезке толстостенных или сплошных заготовок, когда требования к качеству реза практически отсутствуют. Это имеет место, когда заготовка претерпевает последующую обработку, которая автоматически удаляет дефекты фрикционной разрезки, и эти дефекты не усложняют обработку - разрезка толстостенных труб, отрезка отливок от литниковой системы.

Разрезка упомянутых видов проката и заготовок требует выбора рациональной схемы процесса и назначения оптимальных величин его параметров. Круглые трубы можно резать при неподвижной и вращающейся трубе. При разрезке неподвижной круглой трубы схема разрезки проста: вектор скорости подачи должен приблизительно проходить через оси диска и трубы. Разрезка круглой трубы с вращением отступает интересную возможность процесса фрикционной разрезки: выступание диска из крепежных фланцев - 1 может быть незначительно больше толщины стенки трубы. Это значит, что такой диск может быть очень тонким, так как устойчивость его, согласно (22), обратно пропорциональна $l^{3/2}$. Кроме этого, применяя диски с кольцевыми прямоугольными выступами на торцевой поверхности, можно рабочий ход заканчивать касанием этими выступами наружной поверхности трубы. При этом поверхности выступов срывают заусенец на наружной поверхности трубы. На такой диск получено авторское свидетельство СССР N1715519.

При разрезке прямоугольных труб выбор схемы процесса дикту-

ется необходимостью обеспечения минимальной длины дуги контакта и максимальной устойчивости диска. Если вектор скорости подачи направить радиально к диску, то очевидно трубу надо располагать таким образом, чтобы диагональ ее сечения примерно совпала с направлением этого вектора. В этом случае длина дуги контакта будет минимальной. Однако недостатком такой схемы является необходимость большого выступания - l диска из фланцев, равного величине рабочего хода, что снижает его устойчивость.

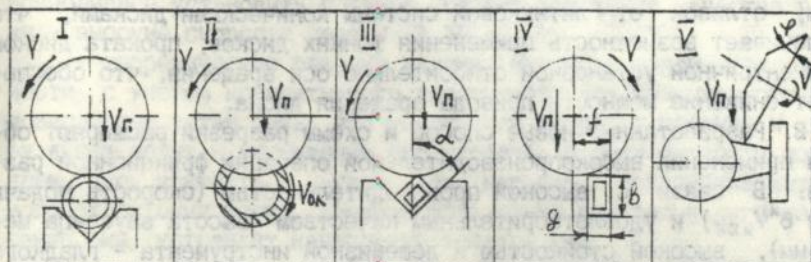
Для повышения устойчивости за счет уменьшения l может применяться схема разрезки с подачей вдоль хорды диска. При этом фланцы диска не упираются в трубу, как при радиальной подаче, а проходят над ней. При такой схеме труба большей стороной сечения располагается параллельно движению подачи. Основным параметр этой схемы - расстояние F между нижней плоскостью трубы и осью диска, определяется необходимостью достижения минимальной длины дуги контакта. Получены формулы расчета длины дуги контакта в зависимости от F и прочих параметров схемы. При этом достижимое минимальное значение длины дуги контакта практически не превышает ее значения при разрезке с подачей вдоль диагонали. Но при этом возникает возможность уменьшения l для труб, у которых отношение длины - g меньшей стороны сечения к длине - b большей стороны сечения меньше или равно 0.5.

Схемы разрезки швеллеров, тавров и двутавров аналогичны схемам разрезки прямоугольных труб. Одной из перспективных областей применения фрикционной разрезки является отрезка отливок, полученных по методу выплавляемых моделей, от литниковой системы. При такой отрезке необходимо перерезать питатель, обычно имеющий коническую форму. Требования к качеству здесь очень низкие, но желательно иметь небольшие усилия подачи, так как в настоящее время эта разрезка выполняется абразивными кругами на станках с ручным приводом подачи. Для достижения малых значений P_y необходимо резать тонким диском, который при разрезке конического питателя будет легко терять устойчивость. Возникающее противоречие помогает разрешить применение конического диска.

При перерезании конического питателя направление нагрузки на диск определяется конусностью питателя. Для достижения максимальной устойчивости диска направление нагрузки должно совпадать с направлением максимальной устойчивости конического диска, что определяется конусностью диска. В работе получены зависимости направления максимальной устойчивости от конусности диска, что позволяет назначить конусность диска в зависимости от конусности прорезаемого питателя, а также определять предельные значения этой нагрузки.

Описанные схемы фрикционной разрезки, в которых указаны тип

инструмента, вид заготовки и виды движений инструмента и заготовки, представляют собой структуры технологических систем (ТС) фрикционной разрезки, классификация которых показана на рис. 12.



Классификация структур ТС фрикционной разрезки.

Рис. 12.

К параметрам структур относятся величины перемещений и их скорости, нагрузки на инструмент и заготовку, важнейшие конструктивные параметры инструмента и станка, основные показатели технологической операции разрезки.

Структуры I, II и III, IV альтернативны. Условия выбора между ними установлены. Структура I применяется для труб с толщиной стенки менее 4мм, а структура II - для остальных круглых труб. Выбор между структурами III и IV определяется отношением φ/b : если $\varphi/b < 0.5$, то предпочтительна структура IV.

Выбор и расчет параметров структур производится из условия минимальных затрат на операцию разрезки при достижении требуемого качества. Повышение качества разрезки (малая высота заусенца на кромках прорези) достигается в I, III и IV. Для облегчения этой процедуры разработаны номограммы выбора важнейшего параметра структуры - толщины диска.

Структуры II и IV - перспективные. Основные параметры этих структур могут быть определены на основе выполненных исследований, а некоторые требуют инженерной проработки.

Общие выводы и рекомендации

1. В результате выполнения теоретических и практических исследований найдены условия значительного повышения эффективности процесса фрикционной разрезки проката и заготовок из углеродистых сталей, которые базируются:

- на новом способе фрикционной разрезки, обеспечивающим значительное уменьшение высоты заусенцев на кромках прорези с одно-

ременным повышением производительности;

- на новых эффективных схемах фрикционной разрезки: круглых труб диском с кольцевыми выступами, что обеспечивает низкую энергоемкость процесса и удаление заусенцев на наружной поверхности трубы; отливка от литниковой системы коническими дисками, что обеспечивает возможность применения тонких дисков; проката диском с эксцентричной установкой относительно оси вращения, что обеспечивает снижение мощности привода вращения диска.

2. Разработанные новые способ и схемы разрезки расширяют области применения высокопроизводительной операции фрикционной разрезки. В связи с высокой производительностью (скорость подачи свыше $6^m/мин$) и удовлетворительным качеством (высота заусенца менее 1мм), высокой стойкостью и дешевизной инструмента - гладкого диска трения из низкоуглеродистой стали операция фрикционной разрезки становится предпочтительной в сравнении с прочими процессами разрезки.

3. Практическим итогом работы является структурно-параметрическая оптимизация технологической системы (ТС) фрикционной разрезки, состоящая в разработке эффективных структур ТС, методике выбора варианта из альтернативных структур, а также в назначении и расчете параметров этих структур.

4. Полученные практические результаты базируются на научных основах управления структурой и параметрами ТС фрикционной разрезки, разработка которых включает:

- теоретическое описание особенностей контакта пары трения диск-заготовка на уровне анализа работы микронеровностей, позволившее установить тепловую природу положительного градиента механических свойств поверхностного слоя заготовки и, как следствие, найти необычное условие повышения производительности за счет снижения температуры диска;

- теоретическое описание механизма формирования полностью насыщенного контакта на площади, близкой к номинальной площади контакта, которое сопровождается удалением макрообъемов заготовки, по площади, соизмеримой с номинальной площадью контакта;

- аналитическое описание с последующим моделированием на ЭВМ температурных полей в приконтактной зоне заготовки и использование его для теоретического прогнозирования характера и глубины структурных превращений в поверхностных слоях заготовки;

- методику теоретико-экспериментального описания температуры наиболее нагретой поверхности заготовки - контактной температуры и результаты ее исследования;

- теоретическое описание механизма пластического деформирования приконтактной зоны заготовки с определением усилия деформации в условиях полностью насыщенного контакта;

- **ст. 11** - теоретическое определение условия благоприятного стружкообразования, которое сопровождается резким уменьшением заусенца на кромках прорези, и его теоретико-экспериментальное описание, позволившее установить главное условие повышения качества разрезки - высокие скорости подачи ($V_p > 6^M / \text{мин}$);

- **ст. 12** - теоретическое решение задачи нестационарной теплопроводности с учетом конвективного теплоотвода для фрикционного диска, позволившее установить, что увеличение скорости резания и диаметра диска ведет к уменьшению его нагрева, а рост скорости подачи и длины дуги контакта - к увеличению нагрева, применение интенсивного охлаждения диска, которое желательно при длине дуги контакта свыше 8мм, устраняет накопление тепла в нем;

- теоретическое решение задачи пластического деформирования диска и обоснование утолщения диска у периферии в качестве критерия стойкости;

- теоретико-экспериментальное описание периода стойкости, объединяющее в себе все физические аспекты, ведущие к деформации диска с утолщением у периферии. Приемлемость этого описания для практических расчетов подтверждена экспериментально, а установленное влияние параметров процесса на стойкость позволяет управлять этой деформацией;

- теоретико-экспериментальное решение задачи статической устойчивости фрикционного диска, что позволило вычислять критическую нагрузку, как ограничение усилия подачи при назначении режимов резания;

- теоретико-экспериментальное описание конического диска, позволившее определить условия выбора его размеров для достижения максимальной устойчивости при разрезке под углом к разрезаемой поверхности и установить значительное превосходство для этих операций конического диска над гладким по устойчивости (в несколько раз);

- теоретическое описание с последующим моделированием на ЭВМ динамики приводов главного движения станка при разрезке круглых труб и любых видов проката эксцентричным диском, позволившее получить рекомендации по выбору привода, мощность которого в (1.4 ... 3.5) раза меньше, чем при классическом расчете в статике.

- **водт** Содержание диссертации нашло свое отражение в следующих основных работах:

1. Семко М. ф., Узунян М. Д., Пивоваров М. С., Сизый Ю. А. Работоспособность алмазных кругов. - К. Техніка, 1983. -95с.
2. Сизый Ю. А. Теория и практика фрикционной разрезки. Харьков, 1995, Деп. в ГНТБ Украины N2501-Ук95, 333с.
3. Сизый Ю. А., Дубовик В. В., Котелевский Л. П. Экспериментальные

- закономерности высокоскоростной резки проката дисковыми пилами. - В кн.: Резание и инструмент, вып. 27, Харьков: Вища школа, 1982. - с.63-68.
4. Сизый Ю. А., Котелевский Л. Н., Савченко Э. В., Синельников Е. Н. Экспериментальные модели процесса скоростной разрезки проката дисковыми пилами. - Вестник Харьковского политехнического института. Машиностроение, вып. 14. Харьков, 1984. - с.40-43
 5. Сизый Ю. А., Савченко Э. В., Шатерников А. С., Волкова Н. Н. Тепловой баланс процесса фрикционной разрезки. - В кн.: Резание и инструмент, вып. 34. Харьков: Вища школа, 1985. - с.129-134.
 6. Сизый Ю. А., Савченко Э. В. Деформация диска пилы при высокоскоростной разрезке. - Вестник Харьковского политехнического института. Машиностроение, вып. 15, 1985. - с.46-49.
 7. Сизый Ю. А., Савченко Э. В., Шатерников А. С. Исследование и оптимизация процесса фрикционной разрезки проката. - В кн.: Резание и инструмент, вып. 35. Харьков: Вища школа, 1986. - с.24-27.
 8. Сизый Ю. А., Волкова Н. Н., Савченко Э. В., Тугай И. М. Нагрев диска при фрикционной разрезке проката. - "Известия вузов. Машиностроение", N1, 1987. - с.111-115.
 9. Сизый Ю. А., Савченко Э. В., Волкова Н. Н., Белкин Е. Л., Тугай И. М. Температурное поле в детали при фрикционной разрезке. В кн.: Резание и инструмент, вып. 38, Харьков: Вища школа, 1987. - с.111-116.
 10. Митин В. Н., Пономарев А. С., Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Собственные колебания станка для обдирочного шлифования проката. В кн.: Динамика и прочность машин, вып. 46. Харьков: Вища школа, 1987. - с.38-42.
 11. Сизый Ю. А., Волкова Н. Н. Температура проката при прерывистом обдирочном шлифовании. "Известия вузов. Машиностроение", N10, 1988. - с.109-113.
 12. Сизый Ю. А., Пономарев А. С., Чайка Э. Г. Динамика прерывистого обдирочного шлифования торцем сегментного круга. - "Известия вузов. Машиностроение". N12, 1988. - с.131-135.
 13. Сизый Ю. А., Волкова Н. Н., Положий П. С. Статическая устойчивость фрикционного диска. - "Известия вузов. Машиностроение", N1, 1993. - с.47-50.
 14. Сизый Ю. А. Сжатие шероховатыми плитами слоя с экспоненциальной неоднородностью по толщине. - "Известия вузов. Машиностроение", N1, 1993. - с.47-50.
 15. Сизый Ю. А. Динамика нагрева и охлаждения фрикционного диска с учетом теплообмена с окружающей средой. - "Известия вузов. Машиностроение", N7-9, 1993. - с.139-147.
 16. Сизый Ю. А. Повышение качества фрикционной разрезки управлением деформациями и напряжениями контактной зоны. - В кн.: Реза-

- ние и инструмент, вып. 49. Харьков: Вища школа, 1994. - с.119-121.
17. Сизый Ю.А., Чайка Э.Г., Бензхур М. Динамическая модель привода главного движения шлифовального станка. - В сб. Управление сложными технико-экономическими системами. К., 1994. - с.64-72.
 18. А.С. СССР N1296323 МКИ В23 Д45/26. Способ резки холодных стальных заготовок. /Соавторы Савченко Э.В., Шатерников А.С., Босый В.Н./ - Оpubл. в Б.И. 1987 N10.
 19. А.С. СССР N1715519 МКИ В23 Д61/00. Гладкий диск трения для разрезки изделий. /Соавторы Положий П.С., Босый В.Н./ - Оpubл. в Б.И. 1992, N8.
 20. Сизый Ю.А. Выбор двигателя главного движения станка для фрикционной разрезки с учетом динамики его работы. Деп. в УкрИНТЭИ. N142-УК 93, 8с.
 21. Сизый Ю.А., Чайка Э.Г., Сталинский Д.В., Бензхур М. Динамическая модель привода главного движения обдирочно-шлифовального станка. -Депон. в ГНТБ, Киев, N1407-Ук 94, 12с.
 22. Сизый Ю.А., Волкова Н.Н., Савченко Э.В., Аникеева Н.Ю. Теплофизические основы управления процессом фрикционной разрезки. Теплофизика процессов лезвийной обработки. Тезисы докладов. Тольятти, 1988, с.69
 23. Сизый Ю.А. Автоматизированный расчет контактной температуры при фрикционной разрезке. -Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Автоматизация конструирования и проектирования процессов в машиностроении". - Сумы, 1994. - с.30-31.
 24. Сизый Ю.А. Модели процесса фрикционной разрезки. - Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика. Тезисы докладов. Харьков, 1994. -С.198-200
 25. Сизый Ю.А. Расчет стойкости инструмента при фрикционной разрезке повышенного качества. - Новые технологии и системы обработки в машиностроении. Тезисы докладов. Севастополь, 1994, с.112-113.
 26. Сизый Ю.А., Чайка Э.Г. Моделирование на ЭВМ динамики привода главного движения станка для фрикционной разрезки. - Micro CAD 95: Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Материалы международной научно-технической конференции. Часть I, Харьков, 1995. -с.80.
 27. Сизый Ю.А., Ушаков А.А., Серховец О.И., Фесенко А.В. Математическое моделирование управлением качеством шлифования и фрикционной разрезки. - Micro CAD95: Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Материалы международной научно-технической конференции. Часть I, Харьков, 1995, с.86.

28. Сизый Ю. А. Гладкий диск трения-инструмент фрикционной разрезки. - Оснастка-95. Тезисы докладов международной конференции. Киев, 1995, с. 36.
29. Сизый Ю. А., Тимофеев Ю. В., Положий П. С. Эффективные способы фрикционной разрезки проката. - Производство и ремонт машин и механизмов в условиях конверсии. Тезисы докладов. Крым, 1995. - с. 66.
30. Сизый Ю. А., Тимофеев Ю. В. Выбор и расчет структуры и параметров технологической системы (ТС) фрикционной разрезки. Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении. Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Киев, 1995. - с. 123.
31. Сизый Ю. А. Особенности пластического контакта микронеровностей элементов трения при фрикционной разрезке. Прогрессивная техника и технология машиностроения. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. Донецк, 1995, с. 217.
32. Положий П. С., Рудько А. П., Сизый Ю. А., Тимофеев Ю. В. Температура контакта при фрикционной разрезке. Высокие технологии: моделирование, оптимизация, диагностика. Тезисы докладов. Харьков, 1995. - с. 150-153.

Sizy Ju. A. Theoretical basis for control of the structure and parameters in the technological systems of friction cutting.

Dessertation for award of scientific degree doctor of science by specializations: 05.02.08 - technology of machine building; 05.03.01 - process of mechanically treatment, mashines and tools.

32 research works are defended.

The theoretical basis of the process, tool and equipment for cutting the billets with a smooth steel disk was developed including: featurer of the contact in the disk billet friction pair; plastic deformations in the rolled product and disk; mathematical description of the temperature fields in the billet and disk; analytical description of the chip-making conditions providing the sharp reduction of burr height at sawcut edges; theoretical and experimental discription of the disk wear-resistancee period; theoretical and experimental solution of the problem on the stability of flat and conical disks; method for choosing the power of a drive motor rotating the disk based on simulation of the dynamics of its operation.

The fundamentally new operations of friction cutting were developed: cutting of the thin-walled profiles of rolled products with a principally new behaviour of chip-making that charply decrease the burr height; cutting of the circular section tuber by

rotating them with simultaneous trimming of burrs; cutting-off of castings from the gating system by using the conical disk. Developed was a method for choosing the structure of a technological system of friction cutting and its parameter computation.

Key words: steel, smooth friction disk, temperature, plastic deformation, wear-resistance, stability, dynamics, technological system.

Сизий Ю. А. Теоретичні основи управління структурою та параметрами технологічних систем фрикційної розрізки.

Дисертація щодо пошуку вченого ступеня доктора технічних наук за фахом: 05.02.08 - технологія машинобудування; 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Захищаються 32 наукові праці. Розроблені теоретичні основи процесу, інструменту та обладнання розрізки заготовок гладким сталевим диском включають: особливості контакту пари тертя диск-заготовка; пластичні деформації заготовки та диску; математичний опис температурних полів у заготовці та диску; аналітичний опис умов стружкоутворення, які значно зменшують висоту задироків на кромках прорезу; теоретико-експериментальний опис періоду стійкості диска; теоретико-експериментальне рішення задачі сталісті плоского та конусного диска; методику вибору потужності двигуна приводу головного руху на підставі моделювання на ЕОМ динаміки його.

Розроблені принципово нові операції фрикційної розрізки: розрізка тонкостінного прокату з новим характером стружкоутворення, забезпечуючим різке зменшення висоти задироків на кромках прорезу; розрізка круглих труб при обертанні їх з одночасним зняттям задироків; відрізка виливок від ливникової системи конусним диском.

Розроблена методика вибору структури технологічної системи фрикційної розрізки та методика розрахунку параметрів цих структур.

Ключові слова: сталь, гладкий диск тертя, температура, пластичні деформації, стійкість, сталість, динаміка, технологічна система.

Ключевые слова: сталь, гладкий диск трения, температура, пластические деформации, стойкость, устойчивость, динамика, технологическая система.

Видано в печатні 2005 р. Бумага тинограф

Удк. печ. з. 2.0 Тираж 100 экз.

Харьковский государственный машиностроительский университет,

редакционно-издательский отдел

Отпечатано на ризографе МП

310002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.

rotating them with simultaneous trimming of burrs; cutting-off of castings from the gating system by using the conical disk. Developed was a method for choosing the structure of a technological system of friction cutting and its parameter computation. Key words: steel, smooth friction disk, temperature, elastic deformation, wear-resistance, stability, dynamic technological system.

Сущность системы автоматического контроля качества изготовления деталей методом шлифовки с помощью конического диска. Исследованы вопросы выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска. Разработана методика выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска и вычислений ее параметров. Ключевые слова: сталь, шлифовальный диск, температура, упругая деформация, сопротивление износу, стабильность, динамическая технологическая система.

Задача состоит в том, чтобы обеспечить стабильность процесса шлифовки с помощью конического диска. Для этого необходимо разработать технологическую систему, обеспечивающую стабильность процесса шлифовки с помощью конического диска. Разработана методика выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска и вычислений ее параметров. Ключевые слова: сталь, шлифовальный диск, температура, упругая деформация, сопротивление износу, стабильность, динамическая технологическая система.

Результаты исследования процесса шлифовки с помощью конического диска. Исследованы вопросы выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска. Разработана методика выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска и вычислений ее параметров. Ключевые слова: сталь, шлифовальный диск, температура, упругая деформация, сопротивление износу, стабильность, динамическая технологическая система.

Исследование процесса шлифовки с помощью конического диска. Исследованы вопросы выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска. Разработана методика выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска и вычислений ее параметров. Ключевые слова: сталь, шлифовальный диск, температура, упругая деформация, сопротивление износу, стабильность, динамическая технологическая система.

Исследование процесса шлифовки с помощью конического диска. Исследованы вопросы выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска. Разработана методика выбора структуры технологической системы шлифовки с помощью конического диска и вычислений ее параметров. Ключевые слова: сталь, шлифовальный диск, температура, упругая деформация, сопротивление износу, стабильность, динамическая технологическая система.

The fundamental new operations of friction cutting were developed. Cutting of the thin-walled profiles of rolled products with a principally new behaviour of chip-making that sharply decreases the chip height, cutting of the circular-section tubular

Подп. к печати 4.03.96. Формат 60x84/16. Бумага типограф.
Усл. печ. л. 2.0. Тираж 120. Зак.№ 15-10.

Харьковский государственный политехнический университет,
редакционно-издательский отдел.
Отпечатано на ризографе ХГПУ.
310002, г.Харьков, ул. Фрунзе, 21.

1111176

AB 34.226