Михайлов Станислав Васильевич. Развитие теории формообразования и дробления стружки с целью повышения эффективности механической обработки пластичных материалов : диссертация ... доктора технических наук : 05.03.01 / Рыбин. гос. авиац.-технол. акад..- Кострома, 2006.- 451 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/128

Михайлов Станислав Васильевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ СТРУЖКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Специальность 05.03.01 -Технологии и оборудование механической*

*и физико-технической обработки*

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

*Научный консультант Заслуженный деятель науки и техники РФ д-р. техн. наук*, *профессор Безъязычный В. Ф.*

I Президиум ВАК **Росси\***

j (решение ОТ " " *07^* 19 *ft&T*,.

1'РИСУДИЛ учєеп

I */плямив,*

I *ПаЧд.Л.ЪНИК* управления ВАК России Кострома - 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

Обозначения и сокращения 6

Введение 9

1. Современное состояние проблемы прогнозирования и управления

формой стружки 18

* 1. Значимость решения проблемы прогнозирования и управления формой стружки на современном этапе развития автоматизированного производства в машиностроении. Понятие благоприятной формы

стружки 18

* 1. [Анализ существующих теорий и экспериментальных исследований процесса завивания и дробления стружки 27](#bookmark6)
	2. [Цель и задачи исследования 42](#bookmark8)
1. Исследование физической природы формообразования стружки

при резании материалов 44

* 1. [Методологические проблемы экспериментального исследования процесса завивания стружки 45](#bookmark10)
	2. Разработка новых методов исследования процесса

стружкообразования 48

* + 1. Способ фиксации пластических деформаций в переходной

зоне и стружке 48

* + 1. [Способ определения естественных характеристик зоны стружкообразования и формы стружки 52](#bookmark13)
		2. [Способ определения длины участка пластического контакта стружки с инструментом и динамики ее изменения в процессе резания 56](#bookmark14)
	1. Исследования процесса завивания стружки в плоскости ее схода 61
	2. [Исследования процесса завивания стружки в плоскости передней поверхности инструмента 88](#bookmark20)
	3. Исследование процесса завивания стружки в плоскости ее поперечного сечения при резании инструментом с криволинейной

з

передней поверхностью 95

2.6 Физическая модель завивания стружки и ее графическая

интерпретация 98

[2.7. Выводы по 2-ой главе 101](#bookmark22)

1. Моделирование характеристик процесса резания и оптимизация условий стружкообразования на основе теоретического анализа взаимосвязи напряженно-деформированного состояния срезаемого

слоя с формой стружки 103

* 1. Анализ напряженно-деформированного состояния зоны резания

с учетом завивания стружки 103

* + 1. [Жестко-пластическая модель стружкообразования при резании инструментом с плоской передней поверхностью 105](#bookmark23)
		2. Оценка влияния упругой деформации изгиба стружки

на изменение ее радиуса кривизны 124

3.2 Механика резания инструментом со стружкозавивающей канавкой... 129

1. Расчет усадки стружки при резании металлов инструментом со стружкозавивающей передней поверхностью 138
2. Расчетное определение силовых характеристик процесса резания

с учетом образования различных видов стружек 148

1. [Особенности резания в условиях нестабильного циклического стружкообразования 158](#bookmark43)
2. Оптимизация условий стружкообразования по естественной

форме стружки 168

1. [Выводы по 3-ей главе 178](#bookmark45)
2. [Математическое моделирование формирования сливной стружки 181](#bookmark46)
	1. [Кинематическая модель схода стружки с инструмента 181](#bookmark47)
		1. Кинематический анализ формирования сливной стружки 188
	2. Моделирование процесса завивания стружки в плоскости ее схода.... 194
	3. Моделирование завивания стружки в плоскости передней поверхности инструмента 202
	4. [Моделирование завивания стружки в плоскости ее поперечного сечения 216](#bookmark54)
	5. [Расчетное определение угловых параметров схода стружки с учетом бокового завивания 221](#bookmark56)
	6. [Методика расчета параметров схода стружки с передней поверхности инструмента произвольной формы 237](#bookmark63)
	7. [Выводы по 4-ой главе 244](#bookmark66)
3. [Прогнозирование и управление процессом завивания стружки 247](#bookmark67)
	1. [Определение критериев эффективного стружкозавивания 247](#bookmark68)
	2. [Компьютерное прогнозирование параметров схода стружки с инструмента 256](#bookmark69)
		1. [Автоматизированная система прогнозирования формы и направления схода стружки с инструмента 256](#bookmark70)
		2. [Прогнозирование процесса схода стружки с инструмента, оснащенного МНП 262](#bookmark71)
		3. [Методика экспериментальной проверки модели формообразования стружки 267](#bookmark72)
	3. [Влияние технологических условий резания на формообразование стружки 270](#bookmark73)
	4. [Морфологический классификатор передних поверхностей инструмента 284](#bookmark74)
	5. [Повышение эффективности механической обработки путем улучшения отвода стружки из зоны резания 288](#bookmark75)
		1. [Оптимизация токарных операций по критерию эффективного стружкозавивания 291](#bookmark76)
		2. [Улучшение отвода стружки из зоны резания с ограниченным стружечным пространством 301](#bookmark78)
			1. [Управление сходом стружки за счет дополнительного завивания в плоскости ее поперечного сечения 302](#bookmark79)
			2. Формирование плотноупакованных рулонов стружки

на операциях прорезки канавок и отрезки 315

* 1. [Выводы по 5-ой главе 330](#bookmark86)
1. Прогнозирование и управление процессом разрушения сливной

стружки в процессе резания металлов 332

* 1. Исследование механизма естественного разрушения

сливной стружки 333

* 1. Прогнозирование процесса дробления стружки 347
	2. [Управление процессом естественного дробления стружки 366](#bookmark102)
1. [Выводы по 6-ой главе 376](#bookmark103)
2. [Разработка интеллектуальной системы диагностики процесса резания металлов по форме стружки 378](#bookmark104)
	1. Система активного контроля процесса резания материалов

по видеоизображению сходящей с резца стружки 380

* 1. Тепловизионный контроль схода стружки 3 92
	2. [Выводы по 7-ой главе 395](#bookmark107)

Заключение 397

Список использованных источников 401

Приложение А. Справки о внедрении, техническом уровне, новизне и экономической эффективности результатов работы 432

**ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

*(р, <Рг~* главный и вспомогательный углы режущего инструмента в плане, ...°; *у* - главный передний угол режущего инструмента, .

*а, а1* - главный и вспомогательный задний углы режущего инструмента, ...°; *г* - радиус вершины режущего инструмента, 10'3 м;

*h3* - износ режущего инструмента по задней поверхности в области его верши­ны, 10"3 м;

*р -* радиус округления режущей кромки инструмента, 10‘6 м;

*Я -* угол наклона главной режущей кромки инструмента, ...°;

*/3* - угол заострения режущего инструмента, ...°;

*RK -* радиус кривизны стружкозавивающей канавки, 10"3 м;

*L -* расстояние от режущей кромки до стружкозавивающего элемента, 1СГ3 м;

*Н-* высота стружкозавивающего элемента, 10‘3 м; *а -* температуропроводность обрабатываемого материала, м /с;

Я , *Лд -* теплопроводность инструментального и обрабатываемого материалов,

Вт/(мК);

Л

С0б - объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м -К);

*тр -* сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу в зоне

стружкообразования, 106Па;

*аь -* предел прочности обрабатываемого материала при растяжении, 106 Па;

*<jm -* предел текучести обрабатываемого материала при растяжении, 106 Па;

Ем - модуль упругости обрабатываемого материала, 106 Па;

<т - средний предел текучести материала стружки, 106 Па;

«л

*а-сотс ~* коэффициент теплопередачи СОТС, Вт/(м -К);

*Коте ~* теплопроводность СОТС, Вт/(м2-К);

о

*aj, Ь]* — толщина и ширина срезаемого слоя, 10‘ м;

л

*а2, Ь2 -* толщина и ширина стружки, 10" м; v, *vc -* скорость резания и скорость стружки; м/с;

*t -* глубина резания, 10" м;

■5

s-подача, 10' м/об;

*v0 -* оптимальная по размерной стойкости инструмента скорость резания, м/с;

о

*D3 —* наружный диаметр обрабатываемой заготовки, 10" м;

о

*de -* внутренний диаметр обрабатываемой заготовки, 10' м;

Дг - угол наклона условной поверхности сдвига, ...°;

*D0 -* наружный диаметр спирали стружки, 10'3 м;

*Ph -* шаг спирали стружки, 10'3 м;

*d0* - внутренний диаметр стружки; 10'3 м;

*в* , *вх -* углы отклонения спирали стружки от основной плоскости и плоскости резания, ...°;

*в*ху, *в*У7, *6XZ -* углы схода стружки,...°;

ех, еУ; ez - координаты положения оси стружки относительно обрабатываемой детали и инструмента, 10'3 м;

*R„ -* радиус кривизны стружки в плоскости ее схода, 10'3 м;

*Rp -* радиус кривизны стружки в плоскости передней поверхности инструмента, 10'3 м;

*в)р, соп, cds -* угловые скорости вращения стружки в плоскости передней по­верхности инструмента и нормальных к ней секущих плоскостях, м2/с;

77 - угол между направлением подачи и скоростью движения стружки в на­чальный момент ее образования, ...°;

\|/ - угол между линией отделения стружки от передней поверхности инстру­мента и главной режущей кромкой инструмента, ...°;

*7js -* угол между направлением подачи и скоростью стружки в момент отрыва ее от передней поверхности инструмента, ...°;

*v -* угол отклонения стружки от перпендикуляра к главной режущей кромке инструмента...0;

у sj 8S - углы между направлением схода стружки и перпендикулярами к глав­ной режущей кромки инструмента и к линии отрыва стружки от его передней

поверхности (углы отклонения стружки в момент схода с резца), ..

*F* - сила реакции при взаимодействии стружки с препятствиями, Н;

*Лс -* гибкость стружки;

о

*1стр -* длина деформируемого завитка стружки, 10' м;

*Ес -* модуль упругости материала стружки, 106 Па;

*sb -* предельная деформация растяжения материала стружки;

*Rb* -радиус кривизны стружки в момент разрушения, 10'3 м; *кн -* коэффициент положения нейтрального слоя стружки;

*F-* сила резания, Н;

*Fc -* сила на стружкозавивающем элементе инструмента, Н;

*Fz -* главная составляющая силы резания, Н;

*Fx* - осевая составляющая силы резания, Н;

*Fy* - радиальные составляющие силы резания, Н;

*E=V-ai-l(f/a; Бо=(Уо-аг103)/а; E=pi/aj; fl=zaifb\;B=tgP1; Г=Л/Я(); И=кз/р;*

*Nu (критерий Нусселъта)* = *acomc-(d-l(f )/Лсотс -* безразмерные критерии подобия процесса резания;

БФС - благоприятная форма стружки;

МДС - мелкодробленая стружка;

ПРС - плотноупакованная в рулоны стружка.

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Эффективность современного машиностроительно­го производства в значительной степени определяется техническим уровнем процессов обработки резанием, которые во многих случаях по своей произво­дительности, гибкости, экономичности, качеству и точности получаемых дета­лей превосходят другие способы обработки. Прогресс в области механообра­ботки в первую очередь связывается с автоматизацией производственных про­цессов, использованием станков с ЧПУ, автоматизированных станочных ком­плексов, гибких производственных систем.

К числу наиболее острых проблем, возникающих при организации про­цесса резания в автоматизированном производстве, относится проблема про­гнозирования и управления формообразованием стружки. Стружка, неблаго­приятная с точки зрения ее удаления из зоны резания и от станка, является фак­тором, резко снижающим эффективность и надежность автоматизированной механической обработки, а в ряде случаев, ставящим под сомнение саму воз­можность автоматизации и роботизации производства. Образование неблаго­приятной формы стружки приводит к снижению стойкости инструмента и ка­чества обработанной поверхности детали, является причиной аварий и поломок инструмента, препятствует механизации вспомогательных процессов уборки и транспортировки стружки. В условиях, когда операции установки, обработки, контроля и снятия детали выполняются автоматически, попадание длинной сливной стружки на резцедержатель, патрон или измерительные позиции стан­ка приводит к погрешностям переустановки заготовок или инструмента, изго­товлению бракованных деталей или вообще сбою загрузочных и измеритель­ных механизмов оборудования. При обработке пластичных материалов не все­гда удается организовать даже многостаночное обслуживание станков с ЧПУ, не говоря уже о малолюдной технологии в ГПС [1].

Помимо комплексной механизации и автоматизации процессов механи­ческой обработки на повышение актуальности проблем управления формой

стружки в современном производстве оказывают влияние дальнейший рост ин­тенсивности съема металла, широкое использование новых высокопрочных и вязких конструкционных материалов. В настоящее время масса срезаемой стружки, в зависимости от обрабатываемого материала, составляет до 35,6 % от массы детали [2, 3, 4]. По разным оценкам [3, 5], только в машиностроении от 12 до 30 % металла превращается в стружку. В 1980-е годы в СССР ежегодно было необходимо утилизировать свыше 9 млн. тонн стружки, в том числе от 500 до 600 тыс. тонн высоколегированной стружки [4, 6, 7]. Масса мировых от­ходов металлообработки составляет примерно 80 млн. т [8]. При этом 25 % об­щего объема стружки требует дополнительного измельчения и брикетирования для ее вторичной переработки. Даже если производить предварительную обра­ботку литых и кованых заготовок, внедрить обработку заготовок, полученных методами литья в кокиль, оболочковые формы, по выплавляемым моделям, то и в этом случае суммарная масса стружки будет большой [3].

Проблема управления стружкообразованием имеет и свой социально­экономический аспект. Стружка, нагретая до высокой температуры, имеющая острые кромки и перемещающаяся с большой скоростью, становится потенци­альным источником травматизма для оператора-станочника и обслуживающего персонала. По данным НИИ труда, травмы по порезам лентообразной стружкой, например, составляют 17,5 % общего числа несчастных случаев при работе на токарных станках. Тяжесть травм возрастает с увеличением сечения стружки [9].

Большое значение вопросам прогнозирования и управления формой стружки придается в высокоразвитых капиталистических странах. Так, исследо­вания, проведенные в Японии путем анкетного опроса в масштабах своей стра­ны, показали, что среди спектра проблем, связанных с резанием металлов, для токарных операций проблема удаления стружки стоит на третьем месте после долговечности инструмента и точности обработки [10]. В работе [11] управляе­мость процессом стружкообразования ставится в один ряд с мощностью резания, сроком службы инструмента, качеством обработанной поверхности. Проблема управления формой стружки на протяжении нескольких десятилетий активно

обсуждается в научно-техническом комитете по проблемам резания металлов при Международной организации промышленных исследований (CIRP). Веду­щими учеными мира отмечается, что задача прогнозирования и управления фор­мой стружки относится к числу трудноразрешимых проблем теории резания. Общее решение проблемы предполагает теоретическое обоснование и создание оптимальных форм передней поверхности резцов, режимов и методов проекти­рования технологических процессов металлообработки, обеспечивающих полу­чение благоприятной формы стружки (БСФ) при обработке пластичных метал­лов и сплавов. Несмотря на многочисленные исследования, до настоящего вре­мени проблема не решена ни теоретически, ни практически. Полученных в ходе исследований знаний пока недостаточно для однозначного объяснения причин образования различных форм сливной стружки и, тем более, прогнозирования этих форм, управления процессом формообразования сходящей стружки. Теоре­тические работы преимущественно охватывают анализ механизма завивания стружки и направлены на создание физической модели процесса. Практические решения в основном базируются на использовании производственного опыта. Разработанные эмпирическим путем рекомендации по проектированию и ис­пользованию режущих пластин, обеспечивающих получение БФС, имеют огра­ниченное применение. На производстве выбор оптимальных условий завивания и дробления стружки осуществляют, как правило, после проведения трудоемких испытаний. Опубликованные результаты исследований процесса завивания стружки, к сожалению, мало информативны с точки зрения перспективного ре­шения всей проблемы в целом, так как не позволяют связать форму образую­щейся стружки с физическими параметрами процесса обработки. В обзорной ра­боте ведущих зарубежных специалистов по проблеме управления формообразо­ванием стружки [12] дана систематизация накопленных знаний об относитель­ной важности каждого из факторов, влияющих на образование и дробление стружки. Согласно проведенному анализу, только лишь для нескольких факто­ров может быть совершенно ясно определена их относительная важность в про­цессе управления формой стружки, хотя и в этом случае не существует количе­

ственных критериев степени влияния. Для большинства факторов остается неиз­вестным сам характер их влияния на завивание и дробление стружки. Выпол­ненные в последнее время исследования также не позволяют однозначно отве­тить на основные вопросы, связанные с завиванием и дроблением стружки, соз­дать надежно подтвержденную экспериментом физическую модель процесса формообразования стружки, выработать конкретные подходы к его математиче­скому моделированию. Отсутствие адекватных моделей формирования стружки, включающих описание ее геометрии и методов разделения на элементы, являет­ся сдерживающим фактором в развитии САПР ТП и РИ.

В связи с недостаточной изученностью процесса формообразования стружки и научно-практической значимостью вопросов повышения надежности автоматизированных технологических систем назрела потребность в комплекс­ном решении проблемы прогнозирования и управления формой стружки на ос­нове создания физически обоснованной теории завивания и дробления стружки.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований является повышение эффективности механической обработки материалов на основе моделирования и оптимизации процесса формообразования стружки. Для достижения постав­ленной цели решены следующие задачи.

1. Разработаны новые способы исследования процесса стружкообразова­ния, позволившие выявить основные причины завивания и дробления стружки и их связь с технологическими условиями резания. Проведены эксперимен­тальные исследования и на их основе выработаны физические представления механизма формообразования стружки.
2. На основе раскрытия реально существующей взаимосвязи напряженно- деформированного состояния срезаемого слоя обрабатываемого материала с формой стружки разработана физически обоснованная математическая модель формирования и схода стружки с инструмента.
3. Разработаны методы расчета выходных характеристик процесса реза­ния инструментом со стружкозавивающей передней поверхностью в зависимо­сти от технологических условий обработки.
4. Разработаны количественные критерии эффективного стружкообразо- вания.
5. Разработана автоматизированная система прогнозирования параметров схода стружки с инструмента.
6. Установлены необходимые и достаточные условия для обеспечения стабильного стружкодробления в процессе резания.
7. Разработаны методики расчета оптимальных режимов резания и гео­метрических параметров инструментов с учетом получения благоприятной формы стружки.
8. Разработаны новые конструкции инструментов, гарантирующих полу­чение благоприятной формы стружки в широком диапазоне режимов резания.
9. Разработана интеллектуальная система активного контроля формиро­вания стружки в процессе резания.

**Методы исследования.** Задачи, поставленные в работе, решались экспе­риментальными и теоретическими методами. В теоретических исследованиях применены основные положения теории резания и проектирования инструмен­тов, теории пластичности и упругости, методы математического и компьютер­ного моделирования, дифференциального и интегрального исчисления, теоре­тической механики, теории подобия. Решения уравнений выполнено аналити­ческими и численными методами. Экспериментальные исследования физиче­ской природы завивания и дробления стружки осуществлялись с помощью спе­циально разработанных методик и устройств. Три новых способа исследования признаны изобретениями (а. с. № 1360902, а. с. № 1514484, а. с. № 1699720). Исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с ис­пользованием промышленного оборудования и современных измерительных средств. Обработка результатов экспериментов проводилась методами матема­тической статистики с применением ЭВМ.

**Научная новизна.**

1. Разработана физически обоснованная математическая модель формо­образования стружки, позволяющая осуществлять прогнозирование и управле­ние формой и направлением схода стружки с инструмента, оценивать возмож­ности и указывать пути получения дробленой стружки, определять оптималь­ные условия резания инструментом со стужкозавивающими элементами, про­ектировать новые конструкции инструментов повышенной работоспособности с улучшенным отводом стружки из зоны резания.
2. Разработаны новые методы экспериментального исследования процес­са стружкообразования, значительно повышающие точность оценки происхо­дящих в зоне резания деформаций.
3. Дано теоретическое и экспериментальное обоснование физической природы пространственного формообразования стружки при резании инстру­ментом с криволинейной передней поверхностью произвольного профиля как результата неоднородных пластических деформаций срезаемого слоя материа­ла. Выявлена возможность и установлен механизм завивания стружки в плос­кости ее поперечного сечения.
4. Разработаны методы расчета и установлены количественные зависимо­сти основных параметров напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования и выходных характеристик процесса резания от техноло­гических условий обработки инструментом с плоской и криволинейной перед­ней поверхностью с учетом завивания стружки.
5. Разработаны математические модели необходимых и достаточных ус­ловий для обеспечения стабильного стружкодробления при обработке пластич­ных металлов и сплавов.
6. Разработана методика расчета оптимальных режимов резания с учетом получения благоприятной формы стружки.
7. Определено новое направление развития естественных методов управ­ления формой стружки путем интенсификации ее завивания в плоскости попе­речного сечения стружки.
8. Разработан способ получения плотноупакованной в рулоны стружки, осуществлено моделирование необходимых и достаточных условий для его реа­лизации.
9. Предложены новые способы активного контроля процесса стружкообра­зования по видео и тепловизионному изображению сходящей с резца стружки.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.**

На основе теории формообразования стружки разработана автоматизиро­ванная система прогнозирования формы стружки, позволяющая осуществлять выбор оптимальных режимов резания и конструкций инструментов на стадии разработки или совершенствования технологического процесса механической обработки, проектировать новые формы стружкозавивающих поверхностей ин­струментов с улучшенным отводом стружки из зоны резания и от станка. Опре­делено новое направление развития естественных способов управления формой стружки за счет интенсификации ее завивания в плоскости поперечного сечения, на основе которого создана гамма новых конструкций МНП, повышенной рабо­тоспособности с гарантированным получением благоприятной формы стружки, в том числе для операций с ограниченным стружечным пространством. Новизна конструкций подтверждена патентом (патент РФ № 2237549). Разработаны экс­периментальные экспресс-методы оптимизации условий резания (а. с. 1349876) и размеров стружкозавивающих элементов на передней поверхности инструмента по естественной величине радиуса кривизны стружки. Разработан и реализован на токарных операциях отрезки и прорезки канавок способ получения плотно- упакованных в рулоны отрезков сливной стружки. Созданы новые конструкции канавочных резцов. С целью повышения надежности эксплуатации автоматизи­рованного оборудования предложены новые способы управления механической обработкой по видео- и тепловизионному изображению сходящей с резца струж­ки регистрируемому над передней поверхностью инструмента в процессе реза­ния (патенты РФ № 2088379, № 2243860).

Результаты работы в виде методического, информационно-программного обеспечения и технологических рекомендаций использованы на производст­венном объединении «Тульский оружейный завод», производственном объеди­нении по шестерням «Минсктракторозапчасть», промышленных предприятиях г. Костромы: ОАО «Рабочий металлист», ОАО «Мотордеталь», ЗАО «Костром- ской завод полимерного машиностроения им. JI. Б. Красина», ООО «Костром­ской литейный завод». Материалы диссертации используются в учебном про­цессе при подготовке инженеров по специальности 151001 «Технология маши­ностроения». Новые методы экспериментального изучения, математического моделирования, оптимизации и контроля процессов механической обработки материалов используются в дисциплинах «Резание металлов», «Автоматизация производственных процессов в машиностроении», «САПР технологических процессов». Результаты исследований легли в основу нового курса лекций и лабораторных работ по дисциплине «Оптимизационное проектирование метал­лорежущего инструмента» для специализации «Компьютерное проектирование материалов и технологий».

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 28-и научных семинарах и конференциях, в том числе на Международных научно-технических конференциях «Современные пробле­мы механики и прикладной математики» (Воронеж: ВТУ, 1998 г.), «Научно­технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конст­рукций и методы их решения» (СПб: СПбГПУ, 2003 г.). «Математические ме­тоды в технике и технологиях - ММТТ-17» (Кострома: КГТУ, 2004 г.) «Проек­тирование инструментального и метрологического обеспечения и производства зубчатых передач: Вторая международная научно-техническая конференция» (Тула, 2005 г.); Российских научно-технических конференциях «Теплофизика технологических процессов» (Рыбинск: РГАТА, 1992, 1996, 2005 г.), «Повыше­ние эффективности машиностроительного производства» (Н. Новгород, 1993 г.), «Наукоемкие технологии в машиностроении и приборостроении» (Рыбинск,

1. г.), Информационные технологии в машиностроении (Ростов на Дону,
2. г.), «Повышение эффективности механообработки на основе аналитиче­ского и экспериментального моделирования процессов» (Рыбинск, 1999 г.), «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков»: (Рыбинск, 2002 г.).; «Проблемы определения технологических условий обработки по заданным показателям качества изделий» (Рыбинск, 2003 г.); Всероссийских научно­практических конференциях «Современные технологии в машиностроении» (Пенза, 2003 г.), «Измерение, контроль и информатизация» (Барнаул: АГТУ, 2004 г.); Республиканских научно-технических конференциях КамАЗ-КамПИ «Наука-производству» (Набережные Челны, 1990 г.); зональных научно­технических конференциях «Проблемы повышения производительности и ка­чества продукции в условиях автоматизации машиностроительного производ­ства» (Ярославль, 1986 г.), «Применение автоматизированного проектирования режущих инструментов, технологических процессов, организационно­технической подготовки производства» (Свердловск, 1989 г.).

**Публикации результатов исследований.** Основное содержание диссер­тации, полученные результаты, выводы и рекомендации опубликованы в 71 на­учных работах, в том числе в 1 монографии, 12 статьях в журналах, 8 авторских свидетельствах и патентах, 16 статьях в сборниках научных трудов, 2 депони­рованных рукописях, 32 материалах научных конференций.

Представленные в работе исследования выполнены в рамках Федераль­ной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» по грантам Минобра­зования и науки 2005 г. «Прогнозирование и управление формой стружки с це­лью повышения эффективности механической обработки металлов в условиях автоматизированного производства» (программа «Развитие научного потен­циала высшей школы» код проекта 17950), «Снижение энегретических затрат при механической обработке материалов на основе оптимизации технологиче­ских условий резания с учетом получения благоприятной формы стружки» (те­ма РИ-111/001/007), а также в рамках университетских госбюджетных НИР 2002 и 2004 г.г. № 4.8-БФ-02 «Управление технологическим процессом на ос­нове распознавания видеоизображений трехмерных объектов», № 3.6-БФ-04 «Моделирование точности и повышение эффективности лезвийной обработки».

Автор признателен заслуженному деятелю науки и техники РФ, доктору технических наук, профессору Безъязычному Вячеславу Феоктистовичу за кон­сультационную помощь при выполнении работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана общая методология и предложены новые научно обоснован­ные технические и технологические решения актуальной проблемы повышения эффективности механической обработки пластичных материалов в условиях автоматизированного производства на основе моделирования, оптимизации и управления процессом формообразования стружки. Развиты теоретические ос­новы резания материалов инструментом со стружкозавивающей передней по­верхностью.

Общие выводы по результатам работы.

1. Современная теория резания, рассматривающая стружкообразование как однородное деформирование срезаемого слоя материала инструментом с плоской передней поверхностью, не может быть использована для эффективно­го решения вопросов прогнозирования и управления формой стружки, актуаль­ность которых особенно остро проявляется в условиях автоматизированного производства с применением станков с ЧПУ и систем автоматизированного проектирования технологических процессов.
2. Разработанные новые экспериментальные методы, позволили провес­ти уточненный анализ взаимосвязи основных параметров системы: зона пер­вичной пластической деформации - контактная зона — форма стружки. Уста­новлено, что при резании инструментом с криволинейной передней поверхно­стью создаются предпосылки к завиванию стружки в трех взаимно перпендику­лярных плоскостях. Причиной естественного завивания стружки являются не­однородные пластические деформации срезаемого слоя. Конечная степень де­формации и форма стружки могут быть определены исходя из общей схемы стружкообразования, на которой условная поверхность сдвига представляет со­бой криволинейную форму с переменным углом наклона и переменной кривиз­ной по ширине срезаемого слоя.
3. Наиболее «чувствительным» параметром, характеризующим степень неоднородности напряженно-деформированного состояния зоны резания, явля­ется радиус кривизны стружки в плоскости ее схода *Rn* . Минимальному значе­нию *Rn,* ограничивающему диапазон возможного изменения кривизны стружки за счет адаптации зоны резания к условиям схода стружки, соответствуют мак­симальная степень неоднородности напряженно-деформированного состояния зоны резания по толщине срезаемого слоя, минимальное значение длины пла­стического контакта стружки с инструментом, максимальная толщина зоны вторичной пластической деформации, минимальная сила и мощность резания. Дальнейшее уменьшение *Rn* за счет изгиба стружки приводит к ухудшению ус­ловий резания, увеличению вибраций, сил и мощности резания.
4. На основе раскрытия реально существующей взаимосвязи напряжен­но-деформированного состояния зоны резания с формой стружки и определе­ния критериев эффективного стружкозавивания сформулированы принципы и методы моделирования и оптимизации процессов формообразования стружки при резании пластичных материалов. Разработанные на их основе методики расчета параметров зоны резания и общая математическая модель формообра­зования стружки позволяют осуществлять прогнозирование и управление фор­мой и направлением схода стружки с инструмента, определять выходные пара­метры механической обработки с учетом завивания стружки, оптимизировать режимы резания при использовании инструментов с криволинейной передней поверхностью, устанавливать оптимальную геометрию стружкоформирующей части передней поверхности инструментов, выявлять причины возникновения аварийных ситуаций, связанных с образованием неблагоприятной формы стружки, находить наиболее рациональные способы их устранения.
5. Разработанный экспресс-метод оптимизации режимов резания и разме­ров стружкозавивающих элементов на передней поверхности инструмента по геометрическим параметрам стружки, формирующейся в условиях беспрепятст­венного перемещения в пространстве, позволяет уменьшить трудоемкость экс­периментального определения условий благоприятного стружкообразования.
6. Анализ напряженного состояния лезвия резца при образовании раз­личных видов стружек показал, что при формировании нестабильной по форме сливной и циклической стружек в резце появляются особые зоны с пульси­рующим и знакопеременным асимметричным циклом напряжений, снижающих работоспособность инструмента.
7. Разработанная автоматизированная система прогнозирования пара­метров схода стружки при резании инструментом с плоской и криволинейной передней поверхностью позволяет осуществлять визуальный анализ формооб­разования стружки и определять оптимальные условия ее завивания и дробле­ния на стадии проектирования технологического процесса без проведения тру­доемких экспериментальных исследований. Результаты компьютерного моде­лирования процесса формообразования стружки удовлетворительно согласуют­ся с результатами экспериментальных исследований.
8. Предложенная новая методика морфологической классификации пе­редних поверхностей инструмента, позволяет систематизировать имеющиеся конструкции МНП и целенаправленно создавать новые с учетом получения благоприятной формы стружки.
9. В результате исследований физической сущности и математического моделирования процесса формирования стружки определено новое направле­ние развития естественных методов управления формой стружки путем интен­сификации ее вращения в плоскости поперечного сечения стружки. Получен­ные на этой основе гаммы новых оригинальных конструкций инструментов об­ладают повышенной работоспособностью и улучшенным отводом стружки из зоны резания. Предложенные конструкции инструментов позволяют решать за­дачи получения БФС для наиболее проблемных операций с ограниченным стружечным пространством.
10. Необходимыми условиями стружкодробления являются обеспечение стабильного завивания стружки в процессе резания, устойчивый контакт стружки с препятствием, высокая жесткость спирали стружки и возможность ее распрямления до величины, соответствующей критической деформации мате­риала стружки. Разработанные математические модели необходимых и доста­точных условий стружкодробления позволяют осуществлять оценку вероятно­

сти естественного дробления стружки, выявлять наиболее благоприятные соче­тания условий резания и указать возможные пути повышения эффективности процесса стружкодробления. Разработанная новая концепция обеспечения дробления многовитковых винтовых отрезков стружки путем интенсификации завивания стружки в плоскости ее поперечного сечения расширяет возможно­сти естественных методов стружкодробления.

1. Наряду с разработкой эффективных методов и средств стружкодробле­ния актуальной является проблема создания надежных способов и средств авто­матического распознавания вида стружки с целью принятия мер, предотвра­щающих отказ автоматизированного оборудования при нарушении процессов устойчивого стружкозавивания или дробления. Разработаные и эксперименталь­но обоснованые новые способы управления процессом резания по видео- и теп- ловизионному изображению сходящей с резца стружки позволяют максимально точно (за счет явной регистрации изображения стружки) определять вид стружки и по ее геометрическим параметрам оценить условия обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Старков,** В. **К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве [Текст] / В. К. Старков. - М. : Машиностроение, 1989. - 296 с.
2. **Куприн,** А. **И.** Гидротранспорт стружки [Текст] / А. И. Куприн, А. М. Тихонов. - М. : Машиностроение, 1978. - 80 с.
3. **Шарин, Ю. С.** Технологическое обеспечение станков с ЧПУ [Текст] / Ю. С. Шарин. - М. : Машиностроение, 1986. - 198 с.
4. **Рябцев, И.** А. Переработка металлоотходов с использованием элек- трошлаковых технологий [Текст] / И. А. Рябцев, Ю. М. Кусков, О. Г. Кузьмен­ко, И. П. Лентюгов // Вестник машиностроения. - 2003. - №11. - С. 76-80.
5. **Резников,** А. А. Перспективы переработки и использования стружки черных металлов (Итоги заседания секции вторичных черных металлов НТС Министерства металлургии СССР. Липецк, июнь 1991 г.) [Текст] / А. А. Резня- ков // Бюллетень НТИ «Черная металлургия». - Вып. 7 (119). - 1992. - С. 3-10.
6. **Смирнов,** А. **И.** Анализ перспектив развития методов формообразо­вания в машиностроении. Обзор [Текст] / А. И. Смирнов. - М. : НИИМАШ, 1982.-49 с.
7. **Тамуров,** В. **П.** Пути дальнейшего развития ломоперерабатывающей промышленности [Текст] / В. П. Тамуров // Бюл. «Черметинформация». Ин­формация 1. Сер. 18. 1992.-С. 3-10.
8. Лом черных металлов, его значение и влияние на дальнейшее разви­тие черной металлургии [Текст] : каталог. - Нью-Йорк : Женева : ООН, 1995. - 157 с.
9. Власов, А. Ф. Безопасность при работе на металлорежущих станках [Текст] / А. В. Власов. - М. : Машиностроение, 1977. - 121 с.
10. Golding, В. Retirements of metal cutting research to meet industrial needs [Текст] / В. Golding, H. Takeyama // CIRP, Annalen. - 1975. V.24. № 2. - P. 525-551.
11. Окусима, К. Тенденции исследований обработки резанием [Текст] / К. Окусима // Оёкикай когаку. - 1975. Т. 16. - №7. - С.82 - 86. (ВЦП, перевод № Ц-87172.-М., 1976.-21 с.).
12. **Kluft, W.** Present Knowledge of Chip Controll [Текст] / W. Kluft, W. Konig, C. A. Luttervelt, K. Nakayama, A. J. Pekelharing // Annals of the CIRP. - Vol 28/2/1979 .-P. 441-455.
13. Тиме, **И.** А. Сопротивление металлов и дерева резанию [Текст] / И. А. Тиме // Русские ученые основоположники науки о резании металлов: Под ред. К.П. Панченко. - М. : Машгиз, 1952. - 478 с.
14. Каштальян, И. А. САПР технологических процессов, приспособле­ний и режущих инструментов [Текст] / И. А. Каштальян, А. П. Пархутик : уч. пособие для вузов. - Минск: Вышейш. школа, 1993. - 288 с.
15. Лавров, **Н. К.** Завивание и дробление стружки в процессе резания [Текст] / Н. К. Лавров. - М. : Машиностроение, 1971. - 88 с.
16. Способы завивания и дробления сливной стружки и области их при­менения [Текст] : руководящие материалы ВНИИ. - М., 1970. - 35 с.
17. Разработка и выбор рациональных форм стружколомающих поверх­ностей, ориентированных на применение в САПР [Текст] : отчет о НИР / Моск­ва, Московский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы : Руко­водитель Шустиков А. Д. - № Г.Р. 01830027732. 1984. - 82 с.
18. Кибальченко, А. В. Применение метода акустической эмиссии в ус­ловиях гибких производственных систем [Текст] / А. В. Кибальченко. - М. : ВНИИТЭМР, 1986. - 56 с.
19. Чижов, В. Н. Метод оценки естественного радиуса завивания струж­ки в плоскости, перпендикулярной к передней грани резца [Текст] / В. Н. Чи­жов, С. В. Михайлов // КТИ. - Кострома, 1988. - 8 с. (Деп. в ВНИИТЭМР, № 53 - мш - 88: ВИНИТИ, Деп.научные работы. - 1988. - №6(200). - С. 129.)
20. Разработка стандарта предприятия на формы металлокерамических неперетачиваемых пластин, РТМ на режимы резания и методику проектирова­ния технологических процессов, обеспечивающих гарантированное дробление стружки при обработке тел вращения в условиях полностью автоматизирован­ного производства [Текст] : отчет о НИР / Томск. Политехнический институт (ТПИ): Руководитель Куфарев Г.Л. - № Г.Р. 01820074864. - 1983. - 70 с.
21. **Ondra,** Josef. Utvarem tvinsky a moznosti jeho predikace pri obrabenina NC strojich [Text] / J. Ondra // Strojir Yyroba . - 1986. - 34. - №5. - S. 325 - 331.
22. Канда, Ю. Изменения формы стружки в зависимости от режима ре­зания [Текст] / Ю. Канда // Какай то когу. - 1975. Т. 19. - №6. - С.40-48. (ВЦП, перевод № Ц - 72302. - М., 1976. - 21 с).
23. Хает, **Г.** JI. Выбор и эксплуатация инструмента при использовании гибких инструментальных систем [Текст] / Г. JL Хает, А. Л. Еськов, Е. В. Ми- роненко. - М., 1991. - 72 с., 20 ил. - (Машиностроит. пр - во. Сер. Инструмен­тальное, технологическое и метрологическое оснащение металлообрабатываю­щего пр - ва: Обзорн. информ. / ВНИИТЭМР. Вып.З).
24. Талантов, **Н.** В. Температурно-деформационная природа неустойчи­вости процесса резания [Текст] / Н. В. Талантов, Н. П. Черемушников // Техно­логия и автоматизация машиностроения : сборник научных трудов Волгоград­ского политехнического института. - Вып.VII.- Волгоград. - 1977. С. 3-16.
25. Вейц, В. **JI.** Моделирование процесса стружкообразования при лез­вийной обработке [Текст] / В. Л. Вейц, В. В. Максаров // СТИН. - 2002. - №4. - С. 3-6.
26. Бобров, В. Ф. Особенности образования суставчатой и элементной стружек при высокой скорости резания [Текст] / В. Ф. Бобров, А. И. Седельни­ков // Вестник машиностроения. - 1976. - №7. - С. 61-66.
27. Филимонов, Л. Н. Особенности стружкообразования в условиях ло­кального сдвига при высокоскоростном резании [Текст] / Л. Н. Филимонов, Л. Н. Петрашина // Вестник машиностроения. - 1993. - № 5 - 6. - С. 23-25.
28. Волков, **Д. И.** Стружкообразование при высокоскоростной обработ­ке [Текст] / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков, В. А. Непомнящий // Проблемы определения технологических условий обработки по заданным показателям ка­чества изделия: Материалы Российской научно-технической конференции. - Рыбинск: РГАТА, 2003. - С. 93-97.
29. **Погонин, А. А.** Механизм стружкообразования при высокоскорост­ной обработке (ВСО) металлов и сплавов [Текст] / А. А. Погонин, А. А. Моск- витин // Известия вузов. Машиностроение. - 2003. - №3. - С. 24-28.
30. Разработка и исследование установок для стружкодробления и стружкоразрезания на токарных станках [Текст] : отчет о НИР / Пермь, Перм­ский политехнический институт (ПЛИ) : Руководитель Гаришин К.В. - № Г. Р. 81035482.- 1984.-81 с.
31. **Ахметшин, Н. И.** Вибрационное резание металлов [Текст] / Н. И. Ах­метшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родинов. - J1. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.-80 с.
32. **Ярославцев, В.** М. Дробление стружки при точении с опережающим пластическим деформированием [Текст] / В. М. Ярославцев // Изв. вузов. Ма­шиностроение. - 1974. - №2. - С. 183-186.
33. **Максаров, В. В.** Выбор параметров резания для обеспечения устой­чивости дробления стружки при термическом воздействии на обрабатываемый материал [Текст] / В. В. Максаров, Д. Ю. Тимофеев // Инструмент и техноло­гии. Российский научно - технический журнал. - 2004. - №17 - 18. - С. 135—

138.

1. **Вейц, В.** Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке [Текст] / В. Л. Вейц, В. В. Максаров. - СПб.: СЗПИ, 2000. - 160 с.
2. **Запорожец, А. И.** Влияние геометрических параметров передней по­верхности инструмента и режимов резания на образование стружки [Текст] / А. И. Запорожец, Л. П. Меркулов // Производство и применение твердых сплавов : Сб. научн. тр. - М.: Металлургия, 1982. - С. 98 - 104.
3. **Куфарев, Г.** Л. Стружкообразование и качество обработанной по­верхности при несвободном резании [Текст] / Г. Л. Куфарев, К. Б. Окенов, В. А. Говорухин. - Фрунзе : Мектеп, 1970. - 170 с.
4. Nakayama, **К.** Basis rules on the form of chip in metal cutting [Text] / K. Nakayama, M. Ogawa // Annals of the CJRP. - Vol.27/1/1978. - РД7-21.
5. Власов, A. **H.** Процесс образования и дробления стружки при реза­нии инструментом с радиусной стружкозавивающей канавкой [Текст] : авто- реф. дис. канд. техн. наук / Власов А. Н.; ТПИ. - Томск, 1990.
6. Шарин, **Ю.** С. Сменные многогранные пластины с радиусными стружколомающими канавками [Текст] / Ю. С. Шарин, Н. В. Садовников // Машиностроитель. - 1986. - № 10. - С. 24-25.
7. Кузнецов, В. Д. Физика твердого тела. Ч.ІІІ. [Текст] / В. Д. Кузнецов. - Томск : Красное Знамя, 1944. - 742 с.
8. Клушин, М. **И.** Резание металлов [Текст] / М. И. Клушин. - М. : Машгиз, 1958.-213 с.
9. Подураев, В. Н. Обработка резанием жаропрочных и нержавеющих материалов [Текст] / В. Н. Подураев. - М.: Высшая школа, 1965. - 518 с.
10. Ерофеев, Н. А. Исследование процесса стружкообразования при от­резке стали ШХ - 15 твердосплавным резцом [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ерофеев Н. А.; ВПИ. - Волгоград, 1970. - 23 с.
11. Нодельман, М. О. Стружколомание при токарной обработке [Текст] / М. О. Нодельман. - Челябинск: Челябинское книжное изд - во, 1969. - 125 с.
12. Фёдоров, **Г.** А. Исследование процессов стружкозавивания и стружкодробления при обработке точением малоуглеродистых пластичных сталей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Фёдоров Г. А. ; ЧПИ. - Че­лябинск, 1971. - 18 с.
13. Ольхов, 3. Е. Исследование причин завивания стружки при резании металлов [Текст] / 3. Е. Ольхов // Физико-химический механизм контактных взаимодействий в процессе резания металлов : сб. научн. тр. - Чебоксары, 1984. -С. 57-60.
14. Понкше, **Г.** С. Новое объяснение явления стружкозавивания при ре­зании металлов [Текст] / Г. С. Понкше // Конструирование и технология маши­ностроения : труды американского общества инженеров - механиков. - 1967. - №2.-С. 209-213.
15. **Ромалингам, Дойл, Терли.** Завивание стружки при прямоугольном резании [Текст] / Ромалингам, Дойл, Терли // Конструирование и технология машиностроения : труды американского общества инженеров - механиков. -
16. -№3.-С. 20-25.
17. **Альбрехт, П.** Новые положения в теории резания металлов. Ч.І и II [Текст] / П. Альбрехт // Конструирование и технология машиностроения: труды американского общества инженеров-механиков. - 1961. - № 3. - С. 90-122.
18. **Полетика, М. Ф.** Основные типы контактных условий на передней поверхности инструмента и их связь с процессом стружкообразования [Текст] / М. Ф. Полетика // Пути интенсификации производственных процессов при меха­нической обработке : Межвуз. научн. - техн. сб. / ТПИ. - Томск, 1979. - С. 3-8.
19. **Флаксман,** A. JI. Совершенствование методов и средств отвода и уда­ления сливной стружки при резании вязких материалов на примере обработки трубных заготовок [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Флаксман A. JI. ; ЭНИМС.-М., 1999.-20 с.
20. **Грановский, Г. И.** Резание металлов [Текст] / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. - М. : Высшая школа, 1985. - С. 93-94.
21. **Савилов, А. Д.** Исследование процесса образования и дробления стружки [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Савилов А. Д. ; ЛПИ. - JL, 1970.
22. **Dawe, С. С.** Analysis of chip curvature [Text] / С. С. Dawe, С Ruben- stein // Advances in Machine Tool Design and Research. - Oxford. - 1970. - P. 283­298.
23. **Таратынов, О. В.** Управление формой стружки при токарной обра­ботке [Текст] / О. В. Таратынов // СТИН. - 2002. - № 2. - С. 26-27.
24. **Зорев,** Н. Н. Исследование процесса резания металлов в США. Вып.1. Механика процесса резания [Текст] / Н. Н. Зорев. - М. : НИИМаш, 1965. - 125 с.
25. **Люттервельт, С. А.** Стружкообразование при резании поверхностей малого диаметра [Текст] / С. А. Люттервельт // Режущие инструменты. Экс­пресс-информация. - М.: ВИНИТИ, 1976. - № 45. - С. 1-17.
26. **Михайлов,** С. **В.** Анализ существующих теорий и разработка новой физической модели завивания стружки [Текст] / С. В. Михайлов, В. Н. Чижов // Математическое обеспечение операций механической обработки: сб. науч. тр. / ЯПИ. - Ярославль, 1988. - С. 59-65.
27. **Hahn, R. S.** Some Observations on Chip Curl In Metal-Cutting Process Under Orthogonal Cutting Conditions [Text] / R. S. Hahn // Trans. ASME. - 1953. vol. 75.-P. 581-590.
28. **Ernst, H.** Chip Formation Friction and High Quality Machined Surfaces [Text] / H. Ernst, М. E. Merhant ***II*** Trans. ASME. - 1941. Vol. 29. - 299 p.
29. **Власов,** A. **H.** Определение критической толщины среза при резании пластинками с радиусной стружкозавивательной канавкой [Текст] / А. Н. Вла­сов, В. Н. Власов // Режущие инструменты. Экспресс-информация (Отечествен­ный опыт, технология, оборудование, организация и экономика машинострои­тельного производства). - М.: ВНИИТЭМР, 1985. - Вып. 10. - С. 5-7.
30. **Kudo, Н.** Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-stale machining [Text] / H. Kudo // International Journal of mechanical science. — 1965.—Vol. 7. -№ 1. - P. 45-57.
31. **Zhang, H.** The theoretical calculation of naturally curling radius of chip [Text] / H. Zhang, P. Lin, R. Hu // Int.J. Mach. Tools and Manuf. - 1989. -29 - № 3. -P. 323-332.
32. **Куфарев, Г.** Л. Связь радиуса завивания стружки с параметрами зо­ны вторичной деформации [Текст] / Г. JI. Куфарев, В. П. Прокопьев // Техниче­ский прогресс в машиностроении : Доклады III научно-технической конферен­ции. -Томск, 1971.