

61:00-5/3175-3

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Санкт-Петербургский институт машиностроения

На правах рукописи

КОЗЛОВА

Екатерина Борисовна

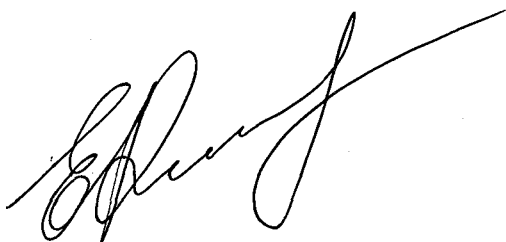
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ
ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 05.03.01 — Процессы механической
и физико-технической обработки, станки и инструмент

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.Л. Вейц

Санкт-Петербург 2000

Содержание

Введение	6
1 Состояние проблемы, цель и задачи исследования	14
1.1 Современные представления в области построения моделей стружкообразования	14
1.2 Физические основы моделирования процесса струж- кообразования	20
1.3 Условия возникновения автоколебаний при резании металлов	31
1.4 Задачи оптимизации режимов резания при лезвийной механической обработке	36
1.5 Цель и задачи исследования	47
2 Исследование реологических характеристик материала заготовки в зоне стружкообразования	49
2.1 Постановка задачи моделирования на основе дисло- кационного представления о механизме деформации и разрушения материала в процессе стружкообразования	49

2.2	Реологические модели процесса стружкообразования	59
2.3	Обобщенная реологическая модель процесса стружкообразования	65
2.3.1	Обоснование выбора реологической модели стружкообразования	65
2.3.2	Математическое моделирование процесса стружкообразования на основе обобщенной реологической модели	74
2.4	Результаты и выводы по главе	84
3	Имитационное моделирование лезвийной обработки на основе реологического описания процесса стружкообразования	86
3.1	Выбор и обоснование инструментальных средств для имитационного моделирования процесса стружкообразования	86
3.2	Моделирование зоны пластической деформации в процессе стружкообразования	102
3.3	Моделирование контактного взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента	108
3.4	Моделирование напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности в результате динамического нагружения	126

3.4.1	Моделирование контактного взаимодействия сходящей стружки с задней поверхностью инструмента	126
3.4.2	Моделирование контактного взаимодействия с обработанным изделием задней поверхности инструмента в случае подвижной нагрузки	134
3.5	Результаты и выводы по главе	144
4	Экспериментальные исследования реологических процессов в зоне стружкообразования	146
4.1	Динамическое моделирование технологической системы механической обработки с учетом реологических процессов в зоне стружкообразования	146
4.2	Алгоритмы определения реологических характеристик при моделировании процесса резания	159
4.3	Результаты динамического моделирования технологической системы с учетом реологических процессов в зоне стружкообразования	166
4.3.1	Стенд для динамического моделирования	166
4.3.2	Расчетные и экспериментальные динамические исследования по проявлению реологических свойств при обработке точением изделий из различных материалов	173

4.4	Повышение эффективности лезвийной обработки на основе моделирования реологических процессов в зо- не стружкообразования	181
4.5	Результаты и выводы по главе	201
	Заключение и общие выводы	203
	Литература	207
	Приложение	224

Введение

Технологические процессы обработки изделий резанием занимают и будут в дальнейшем занимать ведущее место во многих отраслях обрабатывающей промышленности. Автоматизация процессов механической обработки, использование современного высокопроизводительного оборудования приводит к повышению эффективности процесса резания. В свою очередь, необходимо использовать новые подходы для всестороннего изучения явлений, происходящих в процессе стружкообразования, как основы для повышения эффективности механической обработки.

За последнее время был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, основанных на дислокационном представлении структуры материала. Данный подход позволяет более полно отобразить явления, происходящие в зоне стружкообразования в процессе механической обработки резанием. Вместе с тем, важной проблемой механической обработки, имеющей большое практическое значение, является изучение колебаний в технологической системе "станок — приспособление — инструмент — заготовка". Анализ процессов, связанных с различного рода ко-

лебаниями при обработке резанием, является весьма сложной и актуальной проблемой.

В зависимости от физической сущности механизма возникновения вибраций, возмущающие силы являются причиной возникновения собственных колебаний вследствие каких-либо нерегулярных воздействий, которые затухают под действием диссипативных сил, вынужденных колебаний, возбуждаемых от постороннего источника, вынужденных колебаний, возбуждаемых во время процесса резания, и автоколебаний. Наличие возмущений в упругой системе приводит к изменению состояния деформированной зоны и, следовательно, к изменению силы резания. Поскольку данное изменение силы резания не может произойти мгновенно, имеет место некоторое запаздывание в изменении состояния технологической системы, что и является одной из основных причин возникновения автоколебаний. Наличие вибраций приводит к снижению точности обработки и ухудшению качества поверхностного слоя изделия. Следствием этого является ограничение технологических возможностей оборудования и снижение производительности данного вида обработки.

На характер образующейся при резании стружки в значительной степени влияют упругопластические свойства металла срезаемого слоя. Однако, несмотря на то, что данные свойства обычно не учитываются при анализе динамических свойств технологиче-

ской системы, именно они играют важную роль в процессе возникновения автоколебаний.

Указанное взаимодействие является сложным и недостаточно изученным процессом. К настоящему времени не создано единой теории, всесторонне объясняющей данное явление. Представление о том, что сила резания является квазистатической характеристикой, не позволяет с необходимой полнотой отобразить поведение динамической системы. Одновременно, процесс пластического деформирования материала при стружкообразовании носит нестационарный характер, что оказывает существенное влияние на данный процесс.

Все изложенное выше приводит к необходимости выделения в качестве самостоятельного объекта исследования проблему стружкообразования в динамике процесса резания. Ее актуальность обусловлена также тем, что решение данной проблемы позволяет с максимально доступной полнотой определить состояние динамической системы станка и ее характеристики.

Объект исследования. Данная работа посвящена исследованию процессов лезвийной обработки заготовок для повышения эффективности на основе обеспечения динамической стабильности процесса стружкообразования.

Цель исследований. Целью работы является разработка методов моделирования процесса стружкообразования для обеспе-

чения динамической стабильности при лезвийной обработке.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих основных задач:

- анализ теоретических положений, отображающих процессы пластического деформирования и разрушения металла в зоне стружкообразования на основе современных представлений механики твердого тела;

- построение модели процесса стружкообразования в зоне активного пластического деформирования обрабатываемого материала, отображающей физико-механические и вязкоупругопластические характеристики используемых обрабатываемых материалов;

- математическое описание реологических процессов с учетом вязкоупругопластических свойств материала срезаемого слоя и контактного взаимодействия сходящей стружки по передней поверхности инструмента;

- имитационное моделирование дискретной упруговязкопластичной среды с использованием реологических уравнений процесса стружкообразования;

- расширение области реализуемых режимов резания в вариативном пространстве параметров технологической системы на основе учета реологических процессов в зоне стружкообразования;

- разработка частных задач оптимизации режимов механиче-

ской обработки на основе динамических критериев качества.

Методы исследования. Диссертационная работа основана на использовании фундаментальных положений теории резания металлов, теории упругости и пластичности, металловедения, теории колебаний, физики металлов. Моделирование процессов стружкообразования осуществлялось с помощью современных компьютерных систем. Экспериментальные исследования проводились на экспериментально-лабораторном комплексе лаборатории "Динамика и моделирование технологических систем" ПИМаш с использованием современных вычислительных средств.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов и выводов базируется на корректном использовании методов постановки задач и их решения, адекватности разработанных моделей экспериментально наблюдаемым закономерностям, на положительном опыте внедрения разработок в практику производства энергетических машин и установок.

Научная новизна. Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

— реализована гипотеза формирования процесса стружкообразования, предполагающая образование тонкой структуры пластинчатого типа с равномерной периодичностью отражающей свойства обрабатываемого материала в зоне первичной пластической деформации и формирование крупных внешних элементов стружки

пилообразной формы;

— разработана реологическая модель процесса резания с учетом пластической деформации и разрушения металла в зоне стружкообразования, отражающая процесс первичной деформации металла срезаемого слоя (среды Ишлинского), и процесс деформации и трения сходящей стружки (среды Фойхта);

— установлено, что причина неустойчивости процесса резания заложена в природе пластической деформации металла срезаемого слоя и во взаимодействии двух процессов: повышении локальных внутренних напряжений и их пластической релаксации.

Практическая ценность выполненных разработок. Практическая ценность результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

— разработано программно-алгоритмическое обеспечение для решения задач динамики и термоупругопластичности, которое явилось основой для формирования областей допустимых режимов механической обработки в пространстве варьируемых параметров технологической системы;

— выявлены резервы повышения режимов механической обработки с обеспечением требований динамического качества (прежде всего, устойчивости технологической системы).

Реализация в промышленности. Результаты исследований, реализованные в виде технологических рекомендаций и программно-

аппаратных комплексов, приняты к внедрению на АО "Ленинградский Металлический завод", АО "Электросила", НПО "Прометей", СПбГТУ и др. Учитывая актуальность и высокую эффективность выполненных разработок, АЦИА приняла решение о распространении их через "Инжиниринг-сеть России", включающую 88 промышленных центров северо-западного региона Российской Федерации.

Апробация работы. Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на:

- научно-методических семинарах ПИМаш (1996 — 1999 гг.);
- Международной Школе по нелинейным колебаниям механической системы, РАН РФ - Санкт-Петербург (1996 г.);
- Международной конференции "Сварка, электротермия, механообработка" (1999 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции - Рыбинск (1999 г.).

В течение 1998 и 1999 годов исследования велись при финансовой поддержке (в форме индивидуального гранта) Конкурсного Центра Фундаментальных Исследований при Санкт-Петербургском Государственном Университете.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Считаю своим долгом выразить благодарность научному консультанту — действительному члену Балтийской академии Информатизации, доктору техни-

ческих наук, профессору Д.В.Василькову за постоянное внимание, плодотворные дискуссии и помощь при выполнении данной работы.

Приношу благодарность соавтору по совместным публикациям — доктору технических наук, профессору В.В.Максарову, а также сотрудникам лаборатории "Динамики и моделирования технологических систем" ПИМаш и кафедры теоретической механики.

Глава 1

Состояние проблемы, цель и задачи исследования

1.1 Современные представления в области построения моделей стружкообразования

Процесс резания характеризуется сложным комплексом физико-механических явлений (механических, адгезионных, диффузионных, тепловых и др.), которые сопровождают взаимодействие инструмента с материалом обрабатываемой детали в условиях больших контактных давлений и температур. Вследствие этого, создание физически достоверной формализованной модели, адекватно отображающей закономерности процесса резания на базе фундаментальных наук (физики металлов, механики сплошных сред, теплофизики и пр.), до конца не завершено. Разработка такой модели связана с рядом трудностей.

1. Описание различных факторов процесса взаимодействия ре-

жущего инструмента с заготовкой (упругая и пластическая деформация, разрушение, нагрев и пр.) должны основываться на единой физической концепции для обеспечения их логической взаимосвязи и единства математической формализации [97].

2. Модель должна описывать структурно-чувствительные свойства материалов обрабатываемой заготовки и инструмента, от изменения которых зависят силовые характеристики процесса механической обработки, износ инструмента, упрочнение и разупрочнение поверхностного слоя обрабатываемой заготовки и, следовательно, в целом — эффективность и качество процесса резания.

За несколько последних десятилетий опубликовано значительное количество работ по основам механики резания металлов, разработаны модели для описания процесса стружкообразования, однако, несмотря на значительные успехи в описании процесса, ни одна из теорий не может точно предсказать условия, возникающие в практике резания. Среди ученых, внесших значительный вклад в работу по созданию теории резания, необходимо отметить А.А.Безъязычного, В.Ф.Боброва, Г.И.Грановского, А.Н.Еремина, Н.Н.Зорева, М.И.Клушина, В.А. Кривоухова, М.Н.Ларина, Т.Н.Лоладзе, Л.С.Мурашкина, С.Л. Мурашкина, В.Н.Подураева, Н.И.Резникова, А.М.Розенберга, С.С.Силина, В.К.Старкова, а также И.Дж.Армарего и Р.Х.Брауна, Д.Кумабэ, М.Е.Мерчанта, Е.М.Трента и др.

Первоначально изучение процесса резания (в частности, определение силы резания) осуществлялось эмпирическими методами. Данному вопросу были посвящены исследования, выполненные И.А.Тиме, который впервые провел исследование процесса стружкообразования, создал схему этого процесса и предложил формулу для определения силы резания и усадки стружки. Исследования процесса стружкообразования на начальном этапе выполнены А.В.Гадолиным, А.А.Бриксом, К.А.Зворыкиным. П.Д.Афанасьев впервые учитывал силы трения по передней и задней поверхностям резца. Однако малая изученность процесса резания не позволяла получить качественные аналитические решения, поэтому в перечисленных работах приведены эмпирические зависимости, которые полагались в основу разрабатываемых нормативов по режимам резания. Среди более поздних работ, где либо качественно исследуются локальные процессы, связанные со стружкообразованием, либо рассмотрены условия равновесия режущего клина, можно назвать работы С.Ф.Глебова, Н.Н.Зорева, А.Н.Еремина, М.И.Клушина, В.Д.Кузнецова, Т.Н.Лоладзе, В.К.Старкова и др. Однако, до настоящего времени аналитическая теория резания не создана. К основным недостаткам теории, разработанной на основе эмпирических подходов, относится необходимость использования системы поправочных коэффициентов для отображения влияния многообразия факторов, неучтенных при проведении экспери-

ментов. Отметим, что значения этих коэффициентов варьируются в довольно широких пределах, что ставит под сомнение достоверность полученных результатов.

Недостатки эмпирических формул и развитие практики обработки резанием побудили многих исследователей еще в пятидесятых годах вновь вернуться к созданию теоретических методов определения сил резания [44, 45, 82, 85, 86, 92, 94]. Для успешного решения этой задачи к тому времени уже были созданы необходимые предпосылки, благодаря развитию механики процесса резания, теории пластичности, методов испытания механических свойств металлов и прочих разделов наук о металлах и твердых телах.

Поскольку в энергетическом балансе процесса резания значительная часть приходится на работу пластической деформации материала обрабатываемой детали [96], для построения модели резания целесообразным является привлечение теории пластичности. Исходя из этого, в работах [4, 41] предлагается рассматривать процесс резания как установившееся пластическое течение, считая, что зона пластической деформации локализуется у острия резца, а в отдельных частях заготовки и стружки металл является жестким.

У.Джонсон и П.Б.Меллор в работе [41] приводят анализ феноменологических моделей резания, предложенных рядом исследовате-

лей, с точки зрения теории пластичности. Так, модель Х.Эрнста и В.Мерчанта была основана на предположении о существовании единственной плоскости сдвига, при этом распределение напряжений не учитывалось. Экспериментальная проверка показала, что такая теория дает удовлетворительное качественное описание процесса резания. Однако было обнаружено, что величины касательных напряжений и коэффициента трения, подсчитанные по формулам, несколько завышены по сравнению со значениями, полученными опытным путем. Д.Ли и Б.У.Шаффер воспользовались методами линий скольжения и показали, что напряжения, по крайней мере в части объема стружки, ниже напряжений текучести. Недостаток теории заключается в том, что решение методом линий скольжения дает только верхнюю оценку для выбранной конфигурации. Непосредственное применение результатов невозможно, поскольку они отражают лишь качественную сторону явлений, сопровождающих процесс резания и показывают влияние различных факторов на формирование процесса пластической деформации и стружкообразования. Существует некоторое несоответствие между результатами расчетов и данными эксперимента, поэтому непосредственное использование их для расчета режимов резания в практике механической обработки устанавливают на основе обработки результатов экспериментов [41].

В работе М.Е.Эльясберга [109] процесс резания рассмотрен с

точки зрения совместного взаимодействия деформации обрабатываемого металла и динамических свойств технологической системы. Неустойчивость системы в процессе стружкообразования вызывается запаздыванием сил по отношению к возмущениям, которые образуются в результате разрушающей деформации упруговязких металлов.

В работе В.А.Кудинова [55] процесс стружкообразования представлен как упругопластическое внецентренное сжатие и изгиб (отгиб) образующейся стружки, в механике данного процесса учитываются действия моментов сил. Рост растягивающих напряжений, возникающих в результате действия изгибающего момента, создает условия для образования трещины у вершины резца. Анализ напряженно-деформированного состояния, эволюционирующего в процессе деформирования материала и роста трещины, позволяет получить характеристики автоколебательного процесса стружкообразования (амплитуду и частоту колебаний).

В работах В.Л.Вейца и Д.В.Василькова [14, 17], а также в докторской диссертации Д.В.Василькова [12] предложен новый подход к отображению процесса стружкообразования на основе рассмотрения двухфазного процесса контактного взаимодействия резца с обрабатываемым материалом заготовки. Указанное позволило уточнить характеристики процесса, выявить резервы повышения производительности механической обработки.

Дальнейшее развитие данное направление получило в работах В.Л.Вейца и В.В.Максарова [16, 29, 30], а также в докторской диссертации В.В.Максарова [62]. Анализ особенностей процессов пластической деформации и разрушения металла на основе дислокационного подхода позволил разработать реологическую модель стружкообразования высокого уровня и разработать основы имитационного моделирования процессов механической обработки.

Система стружкообразования является нелинейной системой, что и обуславливает возможность возникновения при определенных условиях автоколебаний при механической обработке резанием. Амплитуда и частота изменения параметров резания определяются характеристиками деформированного материала. Следовательно, при анализе технологической системы механической обработки необходимо в полной мере учитывать характеристики процесса стружкообразования.

1.2 Физические основы моделирования процесса стружкообразования

Как было отмечено выше, под действием возмущений состояние деформированной зоны в процессе стружкообразования также изменяется, что приводит к соответствующему изменению силы резания. Данный процесс не может мгновенно распространяться на

всю зону, что вызывает запаздывание в изменении силы резания [12, 109]. Наличие запаздывающих сил полагается, согласно исследованиям М.Е.Эльясберга, причиной возникновения автоколебаний в процессе резания. Эта концепция положена ниже в качестве основы для проведения исследований [19, 22, 31, 53].

Доминирующее влияние на формирование и развитие автоколебательных процессов при резании металлов оказывают упруго-пластические свойства материала срезаемого слоя в зоне пластической деформации и в зоне контактного взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента. До момента образования элемента стружки деформация происходит следующим образом [55, 97, 99]: деформация до плоскости сдвига ($\sigma < \sigma_{пл}$) и сдвиг элемента малой толщины по плоскости сдвига ($\sigma \geq \sigma_{пл}$). Условие перехода ($\sigma < \sigma_{пл}$), исходя из схемы образования срезаемого слоя (рис. 1.1) и реологической модели стружкообразования (рис. 1.2), может быть представлено в виде системы неравенств:

при $\sigma < \sigma_{пл}$

$$\begin{aligned} c_{1\tau}(x - u) &< \sigma_{пл} \cdot S_{ср} \operatorname{tg} \beta; \\ c_{1n}(y - w) &< \sigma_{пл} \cdot S_{ср} \operatorname{ctg} \beta, \end{aligned} \tag{1.1}$$

при $\sigma \geq \sigma_{пл}$

$$\begin{aligned} c_{1\tau}(x - u) &\geq \sigma_{пл} \cdot S_{ср} \operatorname{tg} \beta; \\ c_{1n}(y - w) &\geq \sigma_{пл} \cdot S_{ср} \operatorname{ctg} \beta, \end{aligned} \tag{1.2}$$

где x, y, u, w — координаты механической системы; $c_{1\tau}, c_{1n}$ — коэффициенты жесткости, характеризующие упругое поведение реологической модели стружкообразования по направлениям τ и n , Н/м; $\sigma_{пл}$ — предел текучести, Н/м; $S_{ср}$ — площадь срезаемого слоя, мм²; β — угол сдвига.

Находя из уравнений (1.1) и (1.2) величину равнодействующей силы, условия фазового перехода можно записать следующим образом:

при $\sigma < \sigma_{пл}$

$$\sqrt{[c_{1\tau}(x - u)]^2 + [c_{1n}(y - w)]^2} < \sigma_{пл} \cdot S_{ср}, \quad (1.3)$$

при $\sigma \geq \sigma_{пл}$

$$\sqrt{[c_{1\tau}(x - u)]^2 + [c_{1n}(y - w)]^2} \geq \sigma_{пл} \cdot S_{ср}. \quad (1.4)$$

Изучение деформации срезаемого слоя являлось предметом многочисленных исследований, в результате которых выявлены особенности процесса стружкообразования и предложены модели данного процесса. Между стружкой и передней поверхностью инструмента имеет место трение, и характер контакта обрабатываемого материала с инструментом в различных условиях обработки позволяет судить о механизме процесса трения.

Изучение характера контакта при *низких* скоростях резания показало, что между взаимодействующими поверхностями происхо-

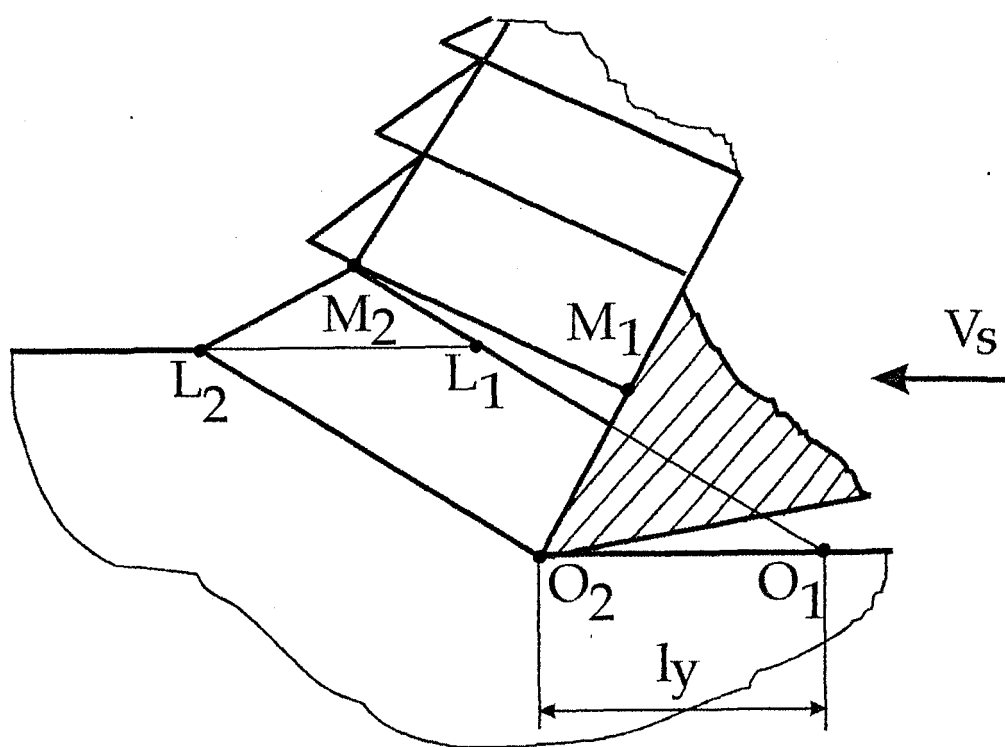


Рис. 1.1. Условная модель процесса стружкообразования, где $O_1L_1L_2O_2$ — вновь образованный элемент стружки; l_y — путь, который проходит вершина режущей кромки за время t ; $M_1M_2L_2O_2$ — элемент стружки, в который трансформируется элемент $O_1L_1L_2O_2$ за время t , v_s — скорость резания

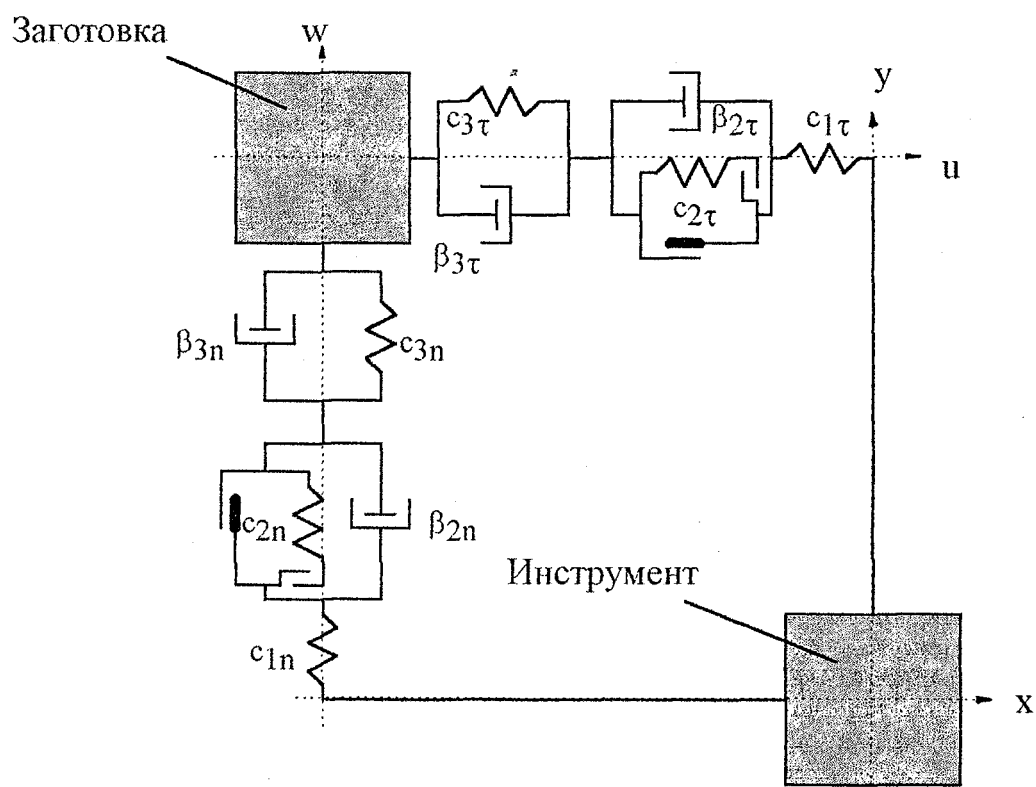


Рис. 1.2. Реологическая модель стружкообразования в процессе резания, где c_{τ} , c_n , β_{τ} , β_n — квазиупругие и диссипативные коэффициенты в касательном и нормальном направлениях зоны стружкообразования

дит местная адгезия — возникают пятна схватывания [17, 59]. В процессе резания по всей площади контакта непрерывно образуются и срезаются пятна схватывания. Срез происходит в наиболее слабом месте, чаще всего в толще обрабатываемого материала. Срезанные частицы прилипают к более твердой поверхности инструмента и в дальнейшем сами являются основой новых очагов схватывания, так как когезия между частицами обрабатываемого материала проявляется сильнее, чем адгезия между материалами детали и инструмента. В процессе периодического схватывания и среза отдельных частиц между стружкой и передней поверхностью образуются поры — контакт не является *сплошным* [106, 107].

При *высоких* скоростях резания характер контакта резко изменяется — по передней поверхности инструмента существует сплошной контакт, вследствие того, что микронеровности инструмента заполнены обрабатываемым материалом. Появление точечного или сплошного контакта связано с величиной нормального давления и с состоянием контактных слоев инструментального и обрабатываемого материалов (в основном с температурой контактного слоя).

Наличие сплошного контакта приводит к ряду специфических особенностей при резании металлов. Образующиеся вследствие адгезии площадки схватывания, которые периодически срезаются и возобновляются, являются источником так называемого сухо-

го трения. Сила трения рассматривается как сумма элементарных сил, необходимых для срезания этих площадок. Сила трения тем больше, чем больше фактическая площадь контакта, величина которой зависит от нормальной нагрузки. Предполагается, что для несплошного контакта фактическая площадь контакта пропорциональна нормальной нагрузке, и справедлив закон Кулона-Амонтона [40]:

$$F_N = \mu N. \quad (1.5)$$

В случае сплошного контакта сила трения представляет собой сопротивление пластическому сдвигу менее твердого материала (стружки). Абсолютное значение силы трения пропорционально площади контакта (которая равна фактической площади) и пределу текучести материала на сдвиг [40]:

$$F_\tau = A\tau, \quad (1.6)$$

где A — фактическая площадь контакта, τ — напряжение сдвига.

Закон трения (1.5) включает в себя зависимость силы трения от нормальной нагрузки лишь постольку, поскольку нормальное напряжение влияет на сопротивление пластическому сдвигу пропорционально коэффициенту внутреннего сопротивления. Так как этот коэффициент для пластичных материалов мал, то и зависимость от нормального напряжения получается слабая. Следовательно, закон Кулона-Амонтона для случая резания на высоких скоростях практически неприменим.

Эти два представления о природе сил трения являются идеализациями, и моделирование реального процесса резания должно включать в себя обе силы трения в тех или иных сочетаниях. Более того, характер контакта может указывать и на другие особенности процесса резания. При наличии сплошного контакта и схватывания появляется возможность химической реакции и диффузии между взаимодействующими поверхностями, так как адсорбированные на поверхности защитные пленки окислов солей и газов отсутствуют. Последнее обстоятельство указывает на существенную роль величины скорости резания на процесс формирования адгезионных связей.

В соответствии с работами [12, 16], при рассмотрении контактного взаимодействия в процессе стружкообразования можно принять следующие допущения: процесс имеет дискретный характер; в фазе схватывания относительная скорость равна нулю; при переходе из фазы схватывания в фазу скольжения скорость изменяется скачкообразно; в установившемся режиме данный процесс имеет регулярный характер; в фазе скольжения происходят чисто механические процессы, сила сопротивления смещению пропорциональна нормальному давлению; в фазе схватывания осуществляются молекулярно-механические процессы; адгезия носит односторонний характер.

При рассмотрении контактного взаимодействия режущего ин-

струмента и заготовки в процессе стружкообразования имеют место два режима взаимодействия инструмента и стружки: скольжение и схватывание [106, 107]. Здесь целесообразно ввести понятие *несущей способности контакта* S_H , под которой понимается максимальное значение силы, обеспечивающей переход из фазы схватывания в фазу скольжения: схватывание продолжается до тех пор, пока выполняется неравенство

$$P_{сд} < S_H^T, \quad (1.7)$$

где $P_{сд}$ — сдвигающее усилие в контакте, направленное по касательной к передней поверхности режущего инструмента; S_H^T — касательная составляющая несущей способности контакта.

Несущая способность контакта S_H определяется как сумма молекулярной $S_{H, \text{мол}}$ и механической $S_{H, \text{мех}}$ составляющих

$$S_H = S_{H, \text{мол}} + S_{H, \text{мех}}. \quad (1.8)$$

Формула (1.8) отражает факт проявления двух видов трения (1.5) и (1.6) в условиях высоких упругопластических нагрузок. Строго говоря, молекулярная составляющая $S_{H, \text{мол}}$ может рассматриваться как статическая (не зависящая от времени) величина только в *неподвижном* контактном соединении, когда процесс разрушения адгезионных связей под действием внешней касательной силы всегда компенсируется образованием новых связей. Этому случаю соответствует полное насыщение адгезионных связей, то есть максимальное значение молекулярной составляющей $S_{H, \text{мол}}^{\text{макс}}$. С другой

стороны, ненасыщенный адгезионный контакт может образоваться в результате недостаточного времени контактирования при данной нормальной нагрузке, и тогда молекулярная составляющая нагрузочной способности контакта определится из выражения

$$T_{\text{мол}} \frac{dS_{\text{н, мол}}}{dt} + S_{\text{н, мол}} = S_{\text{н, мол}}^{\text{макс}}. \quad (1.9)$$

Здесь $T_{\text{мол}}$ — постоянная времени адгезионного взаимодействия, $T_{\text{мол}} = l_{\text{мол}}/[v_{\text{кр}}]$, $l_{\text{мол}}$ — длина участка схватывания, $[v_{\text{кр}}]$ — критическая скорость относительного движения стружки и инструмента, ниже которой начинается адгезионный процесс.

Представление о динамическом характере несущей способности контакта позволяет исследовать фазы скольжения и схватывания на основе различных подходов. Взаимодействие режущего инструмента и заготовки в *фазе скольжения* рассматривается как взаимодействие твердых тел, при этом тангенциальная сила формируется на основе макропредставления как величина, пропорциональная нормальной составляющей силы реакции. Физической основой такого допущения служит предположение, что адгезионные связи при больших скоростях относительного движения формироваться не успевают. В *фазе схватывания* контактное взаимодействие между режущим инструментом и заготовкой формируется на основе микропредставления, когда контактный слой рассматривается как сплошная среда. В этой фазе роль адгезионных процессов становится определяющей.

В работах [17, 105, 107] было установлено, что адгезионные связи формируются и разрушаются периодически, что может явиться одной из основных причин возникновения автоколебаний. Данное явление было исследовано применительно к процессу резания в рамках нелинейной модели [1, 106]. Переход из фазы скольжения в фазу схватывания осуществляется при одновременном выполнении двух условий [106].

$$\delta_{kn} > [\delta_{kn}]; \quad V_k < [V_k], \quad (1.10)$$

где δ_{kn} — нормальная контактная деформация в зоне взаимодействия стружки и передней поверхности резца; V_k — скорость относительного движения стружки и инструмента; $[\delta_{kn}]$ — критическая нормальная контактная деформация; $[V_k]$ — критическая скорость относительного движения стружки и инструмента.

Условием обратного перехода является неравенство

$$P_{сд} > S_n. \quad (1.11)$$

Процесс вторичной деформации и трение сходящей стружки приводит к образованию фазовых переходов, состоящих из фаз схватывания (1.10) и скольжения (1.11), которые в зависимости от условий деформации и формируют функцию переключения $Sg(w)$ [12]:

$$S_g(W) = \begin{cases} W > [v]; \\ W \leq [v], \end{cases} \quad (1.12)$$

где $W = v_s + \dot{x} - \dot{y}$; v_s — скорость резания.

В табл.1.1 представлены условия переключения фаз, описанные соотношениями (1.3), (1.4), (1.10) и (1.11). Каждая фаза представлена своей реологической моделью [17]. Однако, существует проблема формирования этих реологических моделей, связанная с выбором и обоснованием вида модели и инструментальных средств для этого моделирования.

1.3 Условия возникновения автоколебаний при резании металлов

Важной проблемой, с которой приходится сталкиваться в процессе механической обработки резанием, является потеря устойчивости, приводящая к образованию периодических колебаний (вибраций). Вибрационные явления снижают точность обработки и, как следствие, качество поверхностного слоя изделия, увеличивают интенсивность износа инструмента и приводят к сокращению межремонтного цикла [77, 78, 112].

В процессе механической обработки могут возникать различные виды колебаний.

1. Свободные колебания вследствие изменения состояния технологической системы. Такие колебания будут затухать вследствие влияния диссипативных факторов.

Таблица 1.1

Переходные и основные режимы для функции переключения в зависимости от условий деформации и контактного взаимодействия в процессе резания

N	$P_{сд}$	V_k	Условие деформации	Уравнение движения	Фазовый режим
1	2	3	4	5	6
1	$P(t)$	$> [V]$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	1 2	Скольжение
2	$\geq S_H$	$= [V]$ $dV_k/dt < 0$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	1 2	Скольжение (переходный режим)
3	$< S_H$	$= [V]$ $dV_k/dt < 0$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	3 4	Переход
4	$< S_H$	$< [V]$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	3 4	Схватывание
5	$\geq S_H$	$< [V]$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	3 4	Схватывание (переходный режим)
6	$< S_H$	$= [V]$ $dV_k/dt > 0$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	3 4	Схватывание (переходный режим)
7	$\geq S_H$	$= [V]$ $dV_k/dt > 0$	$\sigma < \sigma_{пл}$ $\sigma \geq \sigma_{пл}$	1 2	Переход

2. Вынужденные колебания, возбуждаемые от постороннего источника.

3. Вынужденные колебания, возбуждаемые во время процесса резания.

4. Параметрические колебания, обусловленные изменением динамических параметров системы.

5. Автоколебания.

Кроме того, в технологической системе могут проявиться сложные неавтономные многочастотные режимы (периодические и квазипериодические), явления синхронизации и др. [34, 35]).

Автоколебания характеризуются тем, что вибрационное движение, возникающее в процессе резания, порождает процессы поддержания колебаний, т.е. автоколебания являются самовозбуждающимися колебаниями. Автоколебания возможны лишь в замкнутых автономных нелинейных системах. Частоты автоколебаний обычно близки к собственным частотам технологической системы и практически не зависят от характеристик режима резания; амплитуда автоколебаний зависит от условий обработки и от уровня диссипации энергии в системе. Одной из основных задач динамического анализа является определение границы области устойчивости технологической системы в многомерном пространстве ее параметров.

Результаты исследований вибрационных явлений в процессе

стружкообразования изложены в работах ряда авторов. Изучению автоколебаний при резании металлов посвящены фундаментальные исследования В.Л.Вейца, Д.В.Василькова, Ю.И.Городецкого, Н.А.Дроздова, В.Н.Подураева, В.И.Петрова, А.П.Соколовского, Н.И.Ташлицкого, М.Е.Эльясберга, а также В.Ву, С.Дой, С.Като, К.Пикенбринка и др. Однако до настоящего момента нет единства взглядов в понимании данного процесса в связи с его сложностью и недостаточной изученностью.

В работах [43, 50, 69, 72, 115] природа образования автоколебаний объясняется влиянием пластических деформаций и тепловых явлений на силы трения при резании. В отличие от остальных работ данного направления, в работах [71, 72] возбуждение колебаний при резании связано с наличием так называемой "падающей" характеристики силы резания от скорости скольжения стружки о резец.

В работе [95] возникновение колебаний в технологической системе с одной степенью свободы объясняется различием между величиной сил резания при врезании режущего инструмента в недеформированный металл и его отталкивании от уже частично наклепанного слоя металла.

В работах [54, 100] рассмотрен механизм возникновения автоколебаний за счет наличия координатной связи в упругих контурах. В работе [54] введено понятие динамической характеристики ре-

зания, определяющей фазовый сдвиг между изменением силы резания и изменением координаты (относительным смещением заготовки и инструмента). Здесь же введено понятие постоянной времени стружкообразования T_p . Показано, что она обратно пропорциональна скорости резания v_s . Таким образом, сила, возникающая при резании, отстает по фазе от изменения толщины срезаемого слоя, что является причиной возбуждения автоколебательного процесса в технологической системе.

Теоретические и экспериментальные исследования [4, 59, 105, 107] показали, что в процессе стружкообразования в зоне контактного взаимодействия стружки с инструментом возникают пятна схватывания, т.е. имеет место явление местной адгезии. В работах [105, 107] было установлено, что периодическое разрушение и восстановление адгезионных связей может явиться одной из причин возникновения автоколебаний.

В настоящее время наибольшее применение в практике динамических расчетов технологических систем механической обработки резанием имеют гипотезы о замкнутости динамической системы станка при наличии динамической характеристики резания в виде дифференциального оператора, связывающего силу резания с перемещением по нормали к поверхности резания [54], и запаздывание силы резания относительно перемещения по нормали к поверхности резания и силы трения по отношению к усилию резания [109].

В большинстве работ исследования свойств динамической системы опираются на квазистатическую характеристику процесса резания, которая не отражает в полной мере свойств динамической системы и не дает возможности с необходимой точностью определить границы области устойчивости технологической системы.

1.4 Задачи оптимизации режимов резания при лезвийной механической обработке

Основной задачей оптимизационного проектирования технологического процесса механической обработки является обеспечение оптимальных режимов на основе определенных критериев. На каждом этапе проектирования технологических процессов ставится целый ряд оптимизационных задач:

- выбор припусков на обработку резанием;
- оптимизация технологических параметров станков;
- выбор режимов резания, инструмента;
- выбор параметров процессов резания при различных видах обработки: точении, сверлении, повторной расточке или развертывании, фрезеровании на обычных станках и станках с ЧПУ.

Формальная постановка задачи обеспечения качества обработанной поверхности заключается в задании в пространстве параметров некоторой области, где удовлетворяются заданные крите-

рии качества.

Конечной целью исследования процесса механической обработки лезвийным инструментом является достижение максимальной производительности при минимальных затратах с одной стороны, и обеспечение высокого качества обработки с другой стороны. Поскольку перечисленные требования являются противоречивыми, то становится очевидной актуальность постановки задачи оптимизации. Постановка задачи оптимизации относительно глобального критерия должна включать, наряду с квазистатическими характеристиками, еще и динамические характеристики. В частности, важным является определение границ области устойчивости, динамической ошибки, параметров шероховатости, уровня остаточных напряжений и пр. Одна из важных особенностей технологической системы механической обработки (ТСМОР) заключается в том, что эти параметры качества механической обработки формируются в результате динамического взаимодействия элементов технологической системы, отличающегося высокой сложностью и многообразием. Создание глобальной модели для расчета таких задач на современном этапе практически невозможно.

Важнейшей процедурой при постановке задачи оптимизации процесса резания является формирование целевых функций. Целевая функция, определяющая выбор наилучшего решения, характеризуется различными структурой и степенью сложности. Зада-

ча выбора решения при наличии многих критериев технологической системы относится к классу наиболее сложных и недостаточно разработанных задач векторной оптимизации [7, 8, 26, 73, 74]. Оптимизация осуществляется путем нахождения экстремума целевой функции. Процесс выбора принципа оптимальности сводится, в основном, к задаче скаляризации вектора эффективности K . Задача скаляризации вектора K заключается в выборе обобщенного скалярного критерия эффективности Δ [8]:

$$\Delta = \Delta(k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (1.13)$$

где k_j — компоненты m -мерного вектора эффективности K .

По аналогии с [74], обобщенный скалярный критерий в задачах оптимизации можно представить следующим образом:

$$\Delta(P) = \sum_{j=1}^m \theta_{jj} |c_j(P) - \xi_j(P)|, \quad (1.14)$$

где c_j — j -я компонента вектора-функции $C(P)$ -характеристики, реализуемой технологической системой; ξ_j — j -я компонента заданной характеристики m -мерного динамического отклика; θ_{jj} — элемент $(m \times m)$ -диагональной матрицы $\Theta(P)$ весовых коэффициентов ($\theta_{jj} > 0$; $j = 1, \dots, m$); P — r -мерный вектор варьируемых параметров, причем $P \in G_p$; G_p — допустимая область в пространстве варьируемых параметров.

Свойства поверхностного слоя детали формируются в результате динамического взаимодействия элементов технологической

системы механической обработки и определяются особенностями этого взаимодействия. Такие характеристики качества поверхностного слоя, как макро- и микрогеометрия обрабатываемой поверхности, структура металла поверхностного слоя и остаточные напряжения не могут быть исследованы без учета динамического взаимодействия элементов технологической системы механической обработки резанием [17, 55].

Особенностью ТСМОР является довольно узкое вариативное пространство инерционных и упруго-диссипативных параметров и существенно расширенное вариативное пространство параметров процесса резания (скорости резания v , толщины δ и ширины b_c срезаемого слоя, параметров запаздывания сил резания и трения и др.). К числу варьируемых параметров относятся также параметры режущих инструментов (число режущих кромок, угла резца) и др.

Устойчивость процесса резания в достаточно широком диапазоне технологических режимов является одним из основных условий, которому должна удовлетворять технологическая система [109]. Оптимизация параметров по критерию устойчивости является одной из наиболее важных и часто встречающихся задач оптимизационного проектирования технологических процессов металлообработки. Из числа показателей динамического состояния технологической системы он является основой для формирования кри-

терия J динамического качества. Задача устойчивости "в малом" основывается на теореме Ляпунова об устойчивости тривиального решения дифференциальных уравнений состояния [2, 108]. В соответствии с этой теоремой, нелинейная система устойчива "в малом", если все корни λ_j характеристического уравнения $f(\lambda) = 0$ линеаризованной модели технологической системы имеют отрицательные действительные части

$$\operatorname{Re} \lambda_j < 0; \quad j = 1, \dots, m. \quad (1.15)$$

Компоненты k_j m -мерного вектора критерия K динамического качества определяются как действительные части $\operatorname{Re} \lambda_j$ характеристического уравнения линеаризованной модели

$$k_j = \operatorname{Re} \lambda_j \quad j = 1, \dots, m. \quad (1.16)$$

Принципом оптимальности в задачах исследования устойчивости, используемым при скаляризации вектора эффективности K , является принцип Чебышевской равномерной оптимизации [8]

$$\Delta(P) = \max(j) [\gamma_j \operatorname{Re} \lambda_j], \quad (1.17)$$

где γ_j — компоненты вектора приоритетов Γ , которые принимаются, как правило, одинаковыми ($\gamma_j = \gamma; \quad j = 1, \dots, m$).

Если регламентируются запасы устойчивости для различных собственных значений линеаризованной модели системы, то компоненты γ_j вектора Γ можно принять в виде

$$\gamma_j = |1/\operatorname{Re} \lambda_{j0}|, \quad (1.18)$$

где $Re\gamma_{j_0}$ — максимально допустимая по запасу устойчивости величина действительной части j -й пары комплексно-сопряженных собственных значений модели.

Представление $\Delta(P)$ в форме (1.17) позволяет осуществить также оптимизацию по качеству процесса управления на основе степени устойчивости [108]. Оптимизация собственных спектров динамических моделей ТСМОР заключается в обеспечении вывода возможных резонансных скоростных режимов $\Omega_{s\nu}$ исполнительного устройства главного привода станка за границы рабочего скоростного диапазона $[\Omega_1, \Omega_2]$.

$$\Omega_{s\nu} \notin [\Omega_1, \Omega_2]; \quad s, \nu = 1, 2, \dots, \quad (1.19)$$

где $\Omega_{s\nu}$ — средняя угловая скорость исполнительного устройства главного привода станка на (s, ν) -м резонансном режиме, порождаемом s -й собственной формой динамической модели ТСМОР и ν -й гармонике возмущающего момента вращающейся заготовки некруглого регулярного профиля.

Функциональная пригодность ТСМОР может быть обусловлена также степенью неравномерности вращения исполнительного устройства (шпиндель металлорежущего станка). Тогда при решении задачи параметрической оптимизации ТСМОР вводится дополнительное ограничение [27]:

$$\max |\dot{\varphi}_{uy}| / \Omega_0 \leq \delta_{uy} / 2, \quad (1.20)$$

где $\dot{\varphi}_{uy}$ — динамическая составляющая угловой скорости исполнительного устройства главного привода; δ_{uy} — регламентированная степень неравномерности на номинальном скоростном режиме Ω_0 .

При выбранной структуре ТСМОР задача параметрической оптимизации со скалярным критерием эффективности (1.17) представляется следующим образом:

$$\Delta(P) = \min_P; \quad \operatorname{Re} \lambda_j < 0; \quad P \in G_P, \quad (1.21)$$

где P — r -мерный вектор варьируемых параметров; G_P — допустимая область в пространстве варьируемых параметров.

Задачу (1.21) параметрической оптимизации с критериями эффективности, отражающими степень устойчивости динамической модели технологической системы в пространстве G_P в первом приближении можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta_r(P) &= \max_{P^*}; \\ \sum_{j=1}^m f_{jk} p_j^* &< \xi_k; \quad k = 1, \dots, n; \quad k \neq r; \quad P^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_m^*); \\ p_j^* &< p_j^{(B)} - p_j^{(H)}; \quad p_j^* \geq 0; \quad j = 1, \dots, m; \\ \Delta_r(P) &= \sum_{j=1}^m f_{jr} p_j^*; \quad \xi_k^* = -\xi_0 - \xi_k, \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

где ξ_0 — нормативная величина степени устойчивости динамической модели ТСМОР; $p_j^* = p_j - p_j^{(H)}$; $p_j^{(H)}, p_j^{(B)}$ — граничные (минимальное и максимальное) значения j -го параметра; r — индекс собственного значения базовой динамической модели ТСМОР в рассматриваемой локальной области варьирования, имеющего наи-

большую действительную часть

$$a_r > a_k; \quad k = 1, \dots, n; r \in [1, n]; r \neq k. \quad (1.23)$$

На практике динамические расчеты технологической системы механической обработки в ряде случаев основываются на рассмотрении простых феноменологических моделей подсистем при их автономном представлении. Результаты такого моделирования имеют, как правило, весьма ограниченную область значимости из-за малой достоверности, поскольку не учитывают взаимосвязь элементов и процессов в технологической системе. Уровень адекватности подобных моделей обычно является очень низким и не поддается достоверной оценке [16, 17].

В настоящее время существующие нормативные данные по режимам резания, усилиям и стойкости инструмента при различных видах механической обработки являются весьма ориентировочными. Как правило, не сообщаются условия, при которых были установлены базовые величины, которые рекомендуется корректировать набором коэффициентов, предназначенных для учета конкретных условий механической обработки. Полученные в результате обработки зависимости учитывают влияние основных параметров: механических характеристик материалов заготовки и инструмента при различных видах обработки, геометрии режущей части инструмента, глубины резания и подачи, вида смазочно-охлаждающей жидкости и пр. Такого рода зависимости можно

рассматривать как более или менее правдоподобные аппроксимации квазистатических характеристик резания. Любые попытки получения некоторыми исследователями из указанных зависимостей "динамических характеристик резания" путем анализа влияния изменений параметров в реальных условиях колебаний нельзя признать состоятельными. Действительные динамические характеристики процесса резания формируются в результате динамического взаимодействия подсистем технологической системы [54, 100, 109, 116].

Целесообразно, следуя традиционной методике, разделить решение задачи оптимизации на два этапа. Такое разделение является условным и необходимо только при современном уровне знаний. Первый этап заключается в решении задачи статической оптимизации. При этом используются известные, полученные на основе обработки результатов экспериментов, зависимости для скорости резания (при заданной стойкости инструмента), усилий и мощности резания и др. Как уже было сказано, такие зависимости являются, как правило, *квазистатическими*, полученными в условиях установившихся процессов резания. Учитывая структуру эмпирических зависимостей мультипликативного вида, задачу можно свести к стандартной задаче линейного программирования. Принимая во внимание технические ограничения, в пространстве определяющих параметров "подача s — частота вращения n " строится

область допустимых значений D и определяются значения n_{opt}^{st} и s_{opt}^{st} . Подробно это будет рассмотрено в 4 главе.

Второй этап начинается с проверки технологической системы механической обработки по критерию устойчивости при найденных значениях n_{opt}^{st} и s_{opt}^{st} . Поскольку автоколебательный режим работы технологической системы обычно исключается из числа эксплуатационных, то определение границ устойчивости допустимо проводить на основе линеаризованной модели. Исследование таких систем, а также построение решений для них можно выполнить численно-аналитическим методом, разработанным проф. В.Л.Вейцем [23, 28, 32]. В результате могут быть получены два разных решения:

1. Найденные значения n_{opt}^{st} и s_{opt}^{st} удовлетворяют критерию устойчивости. На этом решение задачи заканчивается и появляется возможность уточнения характеристик ТСМОР (определение динамической погрешности, шероховатости и пр.) с учетом динамических явлений.

2. Найденные значения n_{opt}^{st} и s_{opt}^{st} не удовлетворяют критерию устойчивости. Анализ чувствительности моделей к изменению параметров позволяет получить функции чувствительности, по которым выделяются существенные и несущественные параметры [12]. Такими параметрами являются, например, скорость резания и рабочая подача. Тогда для выведения рабочей точки в область

устойчивости можно считать найденные существенные параметры фиксированными, осуществляя варьирование за счет других. Получаемое решение отличается от оптимального (будет являться квазиоптимальным).

1.5 Цель и задачи исследования

На основании выполненного анализа состояния проблемы можно сформулировать цель работы.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ теоретических положений, отображающих процессы пластического деформирования и разрушения металла в зоне стружкообразования на основе современных представлений механики твердого тела.
2. Построение модели процесса стружкообразования в зоне активного пластического деформирования обрабатываемого материала, отображающей физико-механические и вязкоупруго-пластические характеристики используемых обрабатываемых материалов.
3. Математическое описание реологических процессов с учетом вязкоупругопластических свойств материала срезаемого слоя и контактного взаимодействия сходящей стружки по передней поверхности инструмента.
4. Имитационное моделирование дискретной упруговязкопластичной среды с использованием реологических уравнений процесса стружкообразования.

5. Расширение области реализуемых режимов резания в вариативном пространстве параметров технологической системы на основе учета реологических процессов в зоне стружкообразования.
6. Разработка частных задач оптимизации режимов механической обработки на основе динамических критериев качества.

Глава 2

Исследование

реологических характеристик материала заготовки в зоне стружкообразования

2.1 Постановка задачи моделирования на основе дислокационного представления о механизме деформации и разрушения материала в про- цессе стружкообразования

Физико-механические основы пластического деформирования и разрушения материала в процессе стружкообразования. Процесс стружкообразования включает в себя процесс пластического деформирования и разрушения в их взаимосвязи. С точки зрения теории дислокаций процесс пластической деформации можно рассматривать как результат движения и размножения дефектов кристаллической решетки деформируемого материала заготовки.

Дислокации располагаются главным образом в наиболее плотноупакованных плоскостях кристаллической решетки. Если материал подвергается действию внешних сил, то при возрастании нагрузки первыми начнут движение дислокации той системы скольжения, в которой касательное напряжение максимально. Чтобы началось пластическое течение, касательное напряжение должно превысить некоторое критическое сдвиговое напряжение (близкое к пределу текучести), величина которого определяется исходной дислокационной структурой недеформируемого материала. Теоретически, напряжение, необходимое для движения дислокаций в идеальной решетке (напряжение Пайерлса), может быть вычислено по формуле:

$$\tau_0 = G \frac{2b}{w} \cdot e^{-2\pi \frac{w}{b}},$$

где G — модуль сдвига; b — вектор Бюргерса; w — ширина дислокации.

Скорость движения отдельной дислокации в материале, свободном от других дислокаций и препятствий ее движению, может достигать скорость звука. Подвижность большого ансамбля дислокаций несколько меньше.

В результате развития пластической деформации плотность дислокаций существенно увеличивается и, скапливаясь по определенным плоскостям скольжения, они образуют множество дислокационных полос скольжения. Конфигурация пластически деформиро-

ванной зоны резания представляет собой область множества полос скольжения, в ней происходят процессы зарождения новых дислокаций, их перемещение, торможение, выбросы в параллельные плоскости скольжения. Таким образом, происходит развитие полосы скольжения вглубь обрабатываемого материала. С увеличением плотности дислокаций уменьшается среднее расстояние между ними и, соответственно, уменьшается энергия их образования (U_D). Движение дислокаций порождает точечные дефекты. Вследствие взаимодействия упругих полей дислокаций с вакансиями и дислоцированными атомами происходит их группирование вблизи дислокаций, что, в свою очередь, препятствует движению дислокаций. В результате данной эволюции возникает необходимость постоянного увеличения напряжения для поддержания постоянной скорости деформации — *деформационное упрочнение*.

Наряду со скольжением, материалы могут пластически деформироваться с помощью механизма двойникования. В основе двойникования лежит механизм скольжения особых двойникующих дислокаций. Двойникование является распространенным механизмом пластической деформации металлов и имеет особое значение вследствие того, что образование двойников, как и пластическое течение, вносит вклад в остаточную деформацию. Наиболее благоприятные условия для деформирования двойникованием — понижение температуры и повышение скорости деформации. Тенден-

ция к двойникованию заметно уменьшается при возрастании энергии дефектов упаковки.

Стадия развитой пластической деформации. На ранних стадиях пластического деформирования вне зависимости от типа кристаллической решетки увеличение плотности дислокаций ρ ведет к локальным возмущениям дислокационной плотности и, как следствие, происходит формирование слабо разориентированной ячеистой структуры. С увеличением степени деформации ϵ плотность дислокаций ρ возрастает пропорционально ей, а, следовательно, уменьшаются расстояния между ними. По достижению плотности дислокаций ρ некоторого критического значения $\rho_{кр}$ движение дислокаций нельзя уже рассматривать независимо от ее окружения. Возникают коллективные эффекты [89]. Для металлов $\rho_{кр}$ обычно составляет $10^{13} \dots 10^{14} \text{ м}^{-2}$ [36].

В процессе пластического деформирования вследствие прохождения дислокаций направление отдельных атомных плоскостей не меняется даже в полосе скольжения, AB на рис.2.1, а. Наблюдаются и другие полосы, внешне дающие такой же макроскопический сдвиг, но материал в них повернут на некоторый угол относительно окружающего объема (рис. 2.1, б). Такие полосы называются полосами сброса.

Элементарным носителем поворота в кристаллической решетке является *дисклинация*, аналогично тому, как носителем трансля-

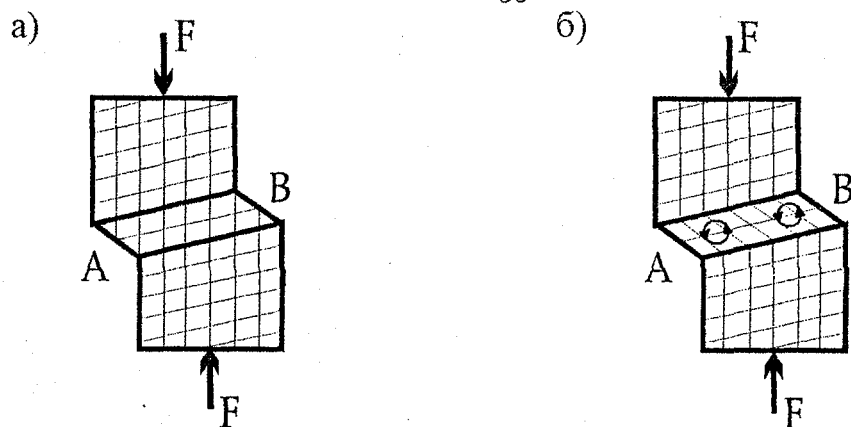


Рис. 2.1. Сравнение полос скольжения и сброса: а) полоса скольжения; б) полоса сброса. Линиями показана ориентация атомных плоскостей

ционного сдвига является дислокация. Направленное, непрерывно происходящее в процессе пластической деформации движение дислокаций приводит к фрагментации кристалла — разбиению его на микрообласти, разориентированные на углы порядка нескольких градусов.

Величина фрагментов напрямую зависит от степени деформации: чем она выше, тем мельче становятся фрагменты, сильнее вытягиваются вдоль осей макродеформации и сильнее разворачиваются относительно друг друга.

Существует несколько уровней фрагментации [89]:

а) однородная фрагментированная структура (образуются фрагменты размером 0.5...1 мкм, угол разориентировки составляет от 1 до 15°);

б) "ножевые" границы с разориентировкой в десятки градусов, отстоящие друг от друга на расстояние от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров.

При достижении деформации ε весьма больших значений, размеры микрополос остаются неизменными, кристалл, заключенный внутри нее, очищается от дислокаций, микрополосы образуют связки — мезополосы. При увеличении деформации образуются полосы сдвига. Как и микрополосы, полоса сдвига после своего образования перестает участвовать в продолжающейся пластической деформации. Последующее течение связано с зарождением все новых и новых полос сдвига. Постепенно они превращают его структуру в сильнофрагментированную.

Неоднородность пластической деформации в зоне стружкообразования. Данное свойство проявляется в локализации деформации в полосах скольжения, неодновременности ее начала в различных зернах, скоплении полос скольжения и отдельных дислокаций у границ зерен и т.д. Причинами, вызывающими пространственную неоднородность и локализацию пластической деформации, являются [79]:

1. Неоднородность структуры материала, что приводит к наличию участков с разной величиной сопротивления пластической деформации.
2. Пространственная неоднородность поля внутренних напряжений.
3. Снижение с ростом деформации коэффициента деформационного упрочнения.

4. Различная длина полос скольжения.
5. Образование сложных дислокационных структур в виде сплетений, клубков, жгутов и т.д.
6. Сложные превращения упрочняющих фаз обрабатываемых материалов с изменением их формы, размеров и характера распределения по объему.

Неоднородность пластической деформации в зоне резания может являться причиной неустойчивости процесса резания [99].

Если иметь в виду полную деформацию (упругую и пластическую), зарождение и распространение дислокаций представляет собой процесс потери механической устойчивости на уровне рассмотрения атомной решетки, т.е. в объемах V_l с характерными размерами l_1

$$b \leq l_1 \leq \rho^{-1/2},$$

где b — межатомное расстояние; ρ — плотность дислокаций.

На данном уровне происходит чередование процессов перехода решетки из механически устойчивого состояния в неустойчивое и выход из него.

Следующий микроуровень с объемом V_{l_2} с размерами l_2 определяется соотношением

$$\rho^{-1/2} \leq l_2 \leq d,$$

где d — размер ячеек.

В этом случае локализация пластической деформации возника-

ет в результате перехода к коллективным формам движения в дислокационном ансамбле.

Мезоуровень рассмотрения процесса пластической деформации в объемах V_{l_3} с характерными размерами l_3 отвечает условиям

$$\rho^{-1/2} \leq d \leq l_3 \leq D,$$

где D — размер зерна.

Предметом физической теории и источником дополнительной информации на мезоуровне являются лишь неоднородности пластической деформации, особенно те из них, которые сосредоточены на границе разориентации.

Локализация пластического течения и связанная с этим неустойчивость проявляются и на макроуровне пластической деформации, т.е. в объемах, характерные размеры которых l_4 удовлетворяют условию

$$\rho^{-1/2} \leq d \leq D \leq l_4 \leq L,$$

где L — характерный размер образца или неоднородности внешнего поля.

Полосы сдвига формируют рельеф на внешней поверхности деформируемого объема. Ротационные неустойчивости резко переориентируют кристаллическую решетку и приводят к направленному переносу вещества в деформируемом кристалле.

Структурно-кинетические аспекты разрушения в зоне стружкообразования. Основой процесса обработки резанием является

процесс стружкообразования, т.е. отделение срезаемого слоя материала от заготовки. Формирование дислокационной структуры представляет собой термически активный процесс, кинетикой которого нельзя пренебрегать [89]. В процессе стружкообразования скорость пластической деформации $\dot{\epsilon}$ задается извне, а внутренние возможности материала определяют лишь нагрузку, достаточную для поддержания выбранной скорости. Тормозящее воздействие атомных и дислокационных перестроек, идущих в соответствии с принципом Ле-Шателье — Брауна, в каждый момент времени компенсируются изменением внешней нагрузки. Структура не приходит в стационарное (квазистационарное) состояние и непрерывно изменяется. Время до разрушения становится пропорциональным предельной пластичности материала $\epsilon_{кр}$ и зависит от температуры лишь в меру зависимости от нее $\epsilon_{кр}$.

Термофлуктуационная природа атомных и дислокационных перестроек проявляется в зависимости от температуры деформации уровня действия напряжений. При активном нагружении элементарные атомные и дислокационные перестройки по-прежнему остаются термически активируемыми, но на первый план выходит силовой фактор.

Существуют два конкурирующих процесса: повышение локальных внутренних напряжений и их пластическая реализация. Пластическую деформацию, направляемую внутренними напряжения-

ми, представляет собой пластическая аккомодация. Если скорость пластической деформации процесса стружкообразования задается как скорость резания, то скорость пластической аккомодации определяется термофлуктуационной зависимостью от температуры процесса. Соотношение между скоростью пластической аккомодации $\dot{\epsilon}_{akk}$ и скоростью деформации $\dot{\epsilon} \equiv const$ определяет состояние материала. При $\dot{\epsilon}_{akk} > \dot{\epsilon} \equiv const$ металл деформируется без образования микротрещин.

В случае $\dot{\epsilon}_{akk} < \dot{\epsilon} \equiv const$ создаются условия для трещинообразования.

Из изложенного выше следует, что процесс пластической деформации срезаемого слоя при стружкообразовании сопровождается неоднородностью пластических сдвигов и разворотов, местами локализации которых служат границы фрагментов структуры обрабатываемого материала. При этом, сила резания, необходимая для поддержания процесса резания, определяется внутренними возможностями непрерывно эволюционирующей структуры металла. Волновая природа пластической деформации, локализация пластических сдвигов и поворотов на разных структурных уровнях металла и одновременное действие двух противоположно направленных процессов — повышения локальных внутренних напряжений и их пластической релаксации — являются причиной неустойчивости пластической деформации в процессе резания.

2.2 Реологические модели процесса стружкообразования

Процессы в зоне резания, локализованные обычно в достаточно узкой, хотя и перемещающейся области обрабатываемой заготовки, отличаются высокой сложностью, поэтому до настоящего времени аналитическая теория резания с учетом стружкообразования не достаточно разработана. Механика сплошной среды, на ее современном уровне, не может быть непосредственно применена для получения обоснованных аналитических зависимостей. Теория упругости применима только в пределах упругих деформаций в рамках использования обобщенного закона Гука. Поскольку металл в зоне резания подвергается интенсивным пластическим деформациям, естественным является привлечение для построения модели резания теории пластичности. Однако, существующие теории пластичности непременно требуют выполнения условий сплошности и, следовательно, их непосредственное применение к анализу процессов стружкообразования также проблематично. Хотя теория сплошной среды не может описать процесс резания как целостное явление, она, вместе с тем, дает правильное качественное понимание локальных явлений. В основе данной главы лежат результаты исследований, полученные на основе численного решения уравнений теории сплошной среды, моделирующих напряженно-деформированное состояние стружки, сходящей с пе-

редней поверхности инструмента. Результаты исследований применяются к вычислению коэффициентов в уравнениях для простых механических моделей (реологических тел) процесса резания.

Учитывая конечную цель исследования — получение достоверных качественных и количественных характеристик исследуемой системы, важным является согласование математического описания с достоверностью получения исходных данных для выполнения динамических расчетов и вычислительными возможностями используемых средств, [33]. В практике динамических расчетов механических систем используются, в основном, модели систем с сосредоточенными параметрами. Такое модельное представление обусловлено стремлением к наиболее простому математическому описанию процессов с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений. Модели с сосредоточенными инерционными параметрами соответствуют представлениям об абсолютно твердом теле, используемом в теоретической и прикладной механике. В рамках модели с сосредоточенными параметрами приемлимым является разделение упругих и диссипативных параметров и отображение их в модели упругими и диссипативными звеньями. Одним из модельных представлений механических систем, широко применяемых в практике динамических расчетов, является рассмотрение их в виде цепных систем с сосредоточенными параметрами (дискретных реологических моделей). Теория цепей с сосре-

доточенными параметрами оперирует с идеальными элементами, соединенными определенным образом и приближенно отображающими механические процессы в реальных системах. Предполагается, что параметры элементов механических систем не зависят от величины и интенсивности внешнего воздействия, что позволяет ограничиться, в основном, рассмотрением линейных систем. Динамические свойства таких систем могут быть описаны в общем случае линейными обыкновенными дифференциальными или интегродифференциальными уравнениями.

В настоящее время недостатком многих исследований закономерности взаимосвязи между параметрами зон стружкообразования и контакта стружки с инструментом является неполная ясность в представлении о реологической модели процесса резания, а также отсутствие цельной гипотезы, позволяющей отразить в достаточно полном объеме закономерности взаимосвязи между элементами реологической модели.

Физические свойства деформируемого металла могут быть наглядно отображены в виде некоего механического аналога (дискретной реологической модели), представленного определенной совокупностью механических элементов: упругости (H), вязкости (N) и пластичности ($St.V$) [3, 6, 9, 41, 90]. Каждый из них или их сочетание характеризуют фундаментальные свойства материала и позволяют представить напряженно-деформированное состо-

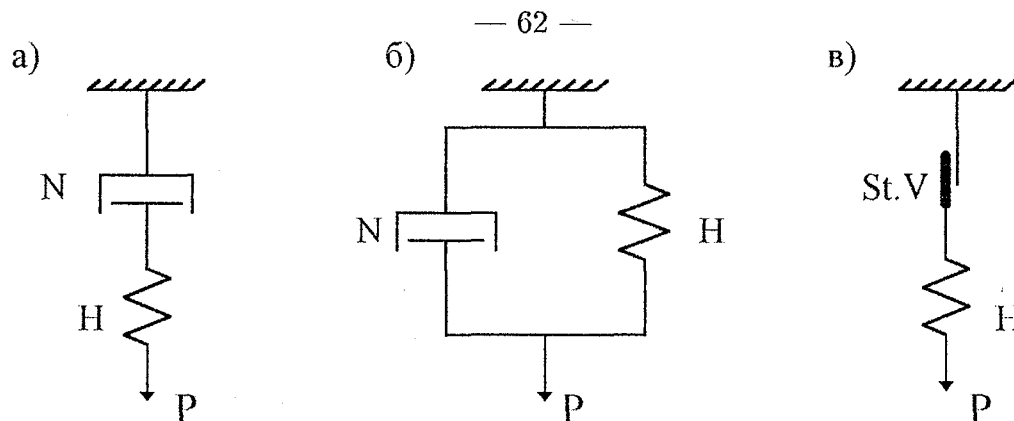


Рис. 2.2. Простые реологические тела Максвелла, Фойхта и Прандтля (слева направо), где H — обозначения упругих элементов, N — вязких элементов и $St.V$ — пластичных элементов; P — прилагаемая нагрузка

яние металла под действием внешних нагрузок. Математическое описание процесса резания с учетом пластической деформации и разрушения металла в зоне стружкообразования обычно базируется на трех основных реологических моделях: вязко-упругая модель Максвелла, вязко-наследственная модель Фойхта и упруго-пластическая модель Прандтля, рис.2.2 [12, 29, 62]. Однако, реологические модели с трех и четырехэлементными неперiodическими схемами дают более детальное отображение динамики деформации и разрушения твердого тела при резании. Показано, что трехэлементное тело Бингама и четырехэлементные тела Шведова и Ишлинского (рис.2.3), наилучшим образом подходят для этой цели [61].

Достаточно подробно поведение деформируемого тела отображает обобщенная реологическая среда Шведова (рис.2.3, б), где вязкий элемент N , моделирующий диффузионные релаксационные

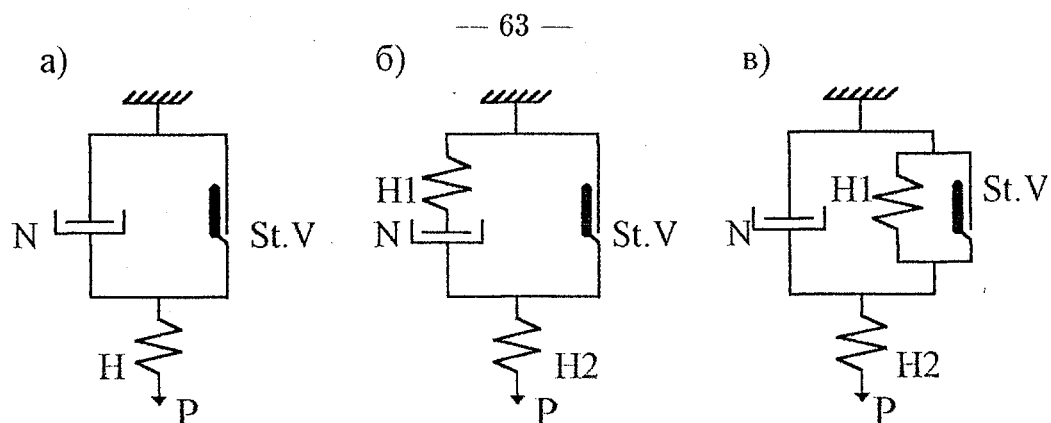


Рис. 2.3. Сложные реологические тела Бингама, Шведова и Ишлинского (слева направо), где H — обозначения упругих элементов, N — вязких элементов и $St.V$ — пластичных элементов; P — прилагаемая нагрузка

процессы, соединен последовательно с элементом упругости H , описывающим деформационное упрочнение. Если деформация металлов протекает при таких температурах, когда диффузионные процессы заторможены, то работой вязкого механизма можно пренебречь, и модель Шведова преобразуется в обобщенную модель упруго-пластического тела с упрочнением (среда Ишлинского).

В работе [29] предложена реологическая модель (называемая в дальнейшем обобщенной реологической моделью) в виде последовательного соединения упруговязкопластической релаксирующей среды Ишлинского и среды Фойхта с запаздыванием деформации (рис.2.4). Такая комбинация элементов отображает динамическое взаимодействие между процессом пластификации металла срезаемого слоя (тело Ишлинского) и процессом деформации и трения сходящей стружки (тело Фойхта) и, следовательно, дает наиболее полное описание процесса резания.

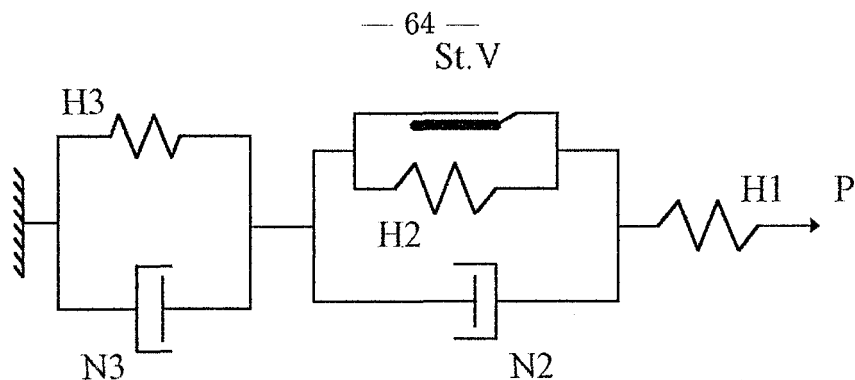


Рис. 2.4. Модель механической системы процесса стружкообразования (обобщенная реологическая модель), где H — обозначения упругих элементов, N — вязких элементов и $St.V$ — пластичных элементов; P — прилагаемая нагрузка

В третьей главе будут представлены данные, полученные при компьютерном моделировании процесса стружкообразования, которые используются для качественного анализа напряженно-деформированного состояния сходящей с передней поверхности инструмента стружки. Для пластичных сталей наиболее подходящей моделью оказывается модель Максвелла. При переходе к более хрупким сталям она должна быть заменена моделью Фойхта. Используя данные компьютерного моделирования, предложен и осуществлен алгоритм расчета коэффициентов реологической модели Максвелла для различных материалов.

2.3 Обобщенная реологическая модель процесса стружкообразования

2.3.1 Обоснование выбора реологической модели стружкообразования

Выше была рассмотрена стружка в стадии адгезионного схватывания, которая моделировалась реологическим телом Максвелла и в результате численных экспериментов были рассчитаны ее упруго-диссипативные характеристики c_t и b . Для хрупких материалов тело Максвелла должно быть заменено на тело Фойхта. Это рассмотрение ограничено тем, что в учет принимался только один аспект процесса стружкообразования — динамика вторичной деформации и не была рассмотрена активная первичная деформация металла, то есть, не учитывался сам процесс образования стружки. На пути к более общему представлению о процессе стружкообразования необходимо провести подобное реологическое моделирование и для описания динамической пластификации металла срезаемого слоя. Показано, что наиболее адекватное описание последнего дается моделью Ишлинского и среды Фойхта (для хрупких металлов) с двумя упруго-диссипативными элементами. Эта комбинация реологических тел получила название обобщенной реологической модели.

Реологическое тело Ишлинского. Механическая схема этого

тела приведена на рис.2.3, в. Из схемы следует, что при $|\sigma| > \sigma_{пл}$

$$\sigma(t) = 2 \cdot \mu_1 \cdot \varepsilon(t). \quad (2.1)$$

Уравнение модели для $|\sigma| > \sigma_{пл}$ дается в виде:

$$\dot{\sigma} + \frac{\mu_1 + \mu_2}{\eta} \sigma = 2\mu_1 \dot{\varepsilon} + \frac{2\mu_1 \mu_2}{\eta} \varepsilon \pm \frac{\mu_1}{\eta} \sigma_{пл}. \quad (2.2)$$

Сила, приложенная к нижней точке модели, будет сначала растягивать лишь внешний упругий элемент, который характеризуется параметром μ_1 . В этом состоянии тело Ишлинского ведет себя как упругое тело Гука. При $|\sigma_1| > |\sigma_{пл}|$ начнет перемещаться поршень вязкого элемента и одновременно растягиваться (или сжиматься) внутренний упругий элемент, возникают усилия $\sigma_2 = 2\mu_2 \varepsilon_2$, $\sigma_3 = 2\eta \dot{\varepsilon}_3$ и сохраняется условие $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$. При продолжительном действии силы ($|\sigma| > |\sigma_{пл}|$) сменится положение поршня в вязком элементе и, в конечном итоге, будет определяться деформацией внутреннего упругого элемента.

При быстром снятии нагружения внешний упругий элемент непосредственно следует за ним и в то же мгновение перейдет в “естественное” состояние. При $|\sigma_2| < |\sigma_{пл}|$ деформация пластического элемента прекращается в положении, которое характеризуется остаточной деформацией. В соответствующем положении фиксируется и вязкий элемент. Поскольку в момент остановки пластического элемента и вязкого элемента никаких внутренних усилий не будет ($\dot{\varepsilon}_3 = 0$), то внутренний упругий элемент растянется уси-

лиями $|\sigma_2| < |\sigma_{пл}|$. Если теперь принять это состояние за “начальное” (которое теперь не отвечает “естественному” состоянию тела) и изменить знак внешних сил, то для сдвига пластического тела вследствие оставшихся напряжений σ_2 во внутреннем упругом элементе необходимо будет усилие меньше, чем $\sigma_{пл}$ и при $\sigma = \sigma_2$ модель начнет перемещаться. Таким образом, модель Ишлинского описывает эффект уменьшения границы пластичности при повторном нагружении обратной по знаку силой до достижения границы пластичности (эффект Баушингера).

Схема дает возможность связать воедино процессы хрупкого и вязкого разрушения материала, если принять, что хрупкое разрушение отвечает разрыву внешнего упругого элемента, а вязкое — разрыву внутреннего упругого элемента. Так, при быстром нагружении модели от $\sigma = 0$ до $\sigma > \sigma_{пл}$ скорость деформации вязкого элемента ($\dot{\epsilon}$) велика, и в нем сосредотачиваются значительные напряжения. Тогда поведение остальных элементов модели при $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$ будет определяться поведением вязкого элемента, а деформация всей модели в целом будет характеризоваться деформацией внешнего упругого элемента, поскольку поршень вязкого элемента за очень малый промежуток времени не успевает заметно сдвинуться. Таким способом можно моделировать хрупкое разрушение.

Если принять, что в модели внутренний упругий элемент менее мощный, чем внешний, то при резком или достаточно медленном

(однако при таком, что не разрывается внешний упругий элемент) нагружении модели $\sigma_2 \gg |\sigma_{пл}|$ через какое-то время разорвется внутренний упругий элемент. Разрыву внутреннего упругого элемента предшествует перемещение поршня вязкого элемента и вместе с ним перемещение пластичного элемента. Это отвечает возрастанию “пластической деформации” внутреннего упругого элемента, что вызовет ослабление натяжения внешнего упругого элемента. Модельно это отвечает релаксации напряжений в реальных телах.

Обобщенное реологическое тело. На рис.2.4 представлена модель, отражающая гипотезу процесса стружкообразования и состоящая из двух подсистем. Элемент H_1 в первой подсистеме — теле Ишлинского — имитирует упругую мгновенную деформацию, образуемую впереди области пластического деформирования в зоне стружкообразования. Следующий за упругим элементом составной блок из элемента Гука H_2 и диссипативного элемента N_2 , также входящий в модель Ишлинского, имитирует длительную упруговязкую деформацию. При достижении предела пластичности $\sigma_{пл}$ вступает в действие элемент Сен-Венана $St.V$, и возникает мгновенная остаточная деформация. Это приводит к формированию локализованных полос сдвига в зоне первичной деформации срезаемого слоя. Затем наступает длительная необратимая деформация. По мере сдвига материала, в работу последовательно включается модель Фойхта, состоящая из вязкого элемента N_3

и элемента упругости H_3 , которые имитируют длительную упруговязкую деформацию, возникающую за счет изменения сил при контактном взаимодействии сходящей стружки с передней поверхностью инструмента. Тот факт, что обобщенная реологическая модель содержит тело Ишлинского в качестве своей составляющей, дает возможность связать воедино процессы хрупкого и вязкого разрушения материала, как это описано выше.

Для анализа сложной многоэлементной реологической модели с сосредоточенными параметрами привлекалось операторное представление, в основе которого лежат свойства интегрального преобразования Лапласа [33]. Обобщенная реологическая модель была получена методом операторного представления исходя из того, что в данной модели последовательно соединены среда Ишлинского, отражающая процесс первичной деформации металла срезаемого слоя, и среда Фойхта, отражающая процесс деформации и трения сходящей стружки. Выше было показано, что в зависимости от соотношения действующих напряжений и предела пластичности процесс стружкообразования может быть представлен следующим образом:

при $|\sigma_2| < |\sigma_{пл}|$

$$\sigma(t) = c_1 \cdot \varepsilon(t); \quad (2.3)$$

при $|\sigma_2| > |\sigma_{пл}|$

$$\dot{\sigma}(t) + \frac{c_1 + c_2}{\beta} \sigma(t) = c_1 \dot{\varepsilon}(t) + \frac{c_1 c_2}{\beta} \varepsilon(t) \pm \frac{c_1}{\beta} \sigma_{пл}. \quad (2.4)$$

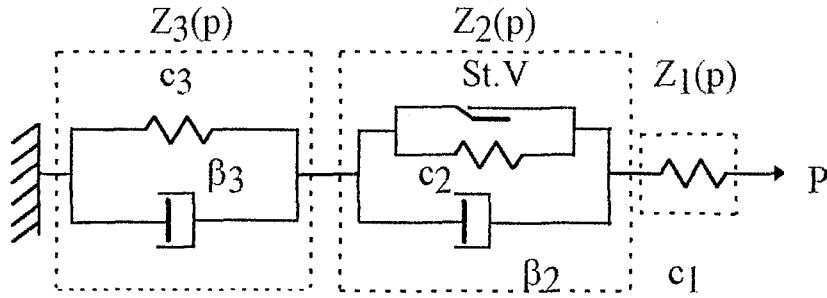


Рис. 2.5. Модель механической системы процесса стружкообразования (операторное представление)

Реологическое уравнение модели Фойхта, описывающее вторичную деформацию стружки и ее перемещение по передней поверхности инструмента, имеет вид

$$\sigma(t) = c_3 \cdot \varepsilon(t) + \beta_3 \cdot \dot{\varepsilon}(t). \quad (2.5)$$

Механическая система (рис.2.5) представляет собой последовательность элементов, соединенных определенным образом [29]. Элементы или их совокупность можно рассмотреть относительно деформации — с входом и выходом. Направление стрелки указывает на направление деформации в системе. Исходя из этого, можно получить общее выражение операторного сопротивления в виде

$$z(p) = z_{\text{И}}(p) + z_{\text{Ф}}(p) = z_1(p) + z_2(p) + z_3(p), \quad (2.6)$$

где $z_{\text{И}}(p)$, $z_{\text{Ф}}(p)$ — операторные сопротивления для последовательно соединенных моделей Ишлинского и Фойхта соответственно.

Свойства элементов упругости H_1 , H_2 , H_3 механической системы определяются коэффициентами жесткости c_i (или податливости e_i

$= 1/c_i$), характеризующими способность деформируемых звеньев накапливать потенциальную энергию деформации. Операторное сопротивление для идеально упругих элементов в соответствии с законом Гука определяется следующим образом:

$$z_e(p) = e \cdot p, \quad (2.7)$$

где p — оператор дифференцирования $p \equiv d/dt$.

Элементы демпфирования N_2, N_3 в механической системе рассматриваются как идеальные линейные элементы, создающие силы сопротивления, пропорциональные относительной скорости деформации. Они характеризуют необратимые процессы, связанные с рассеянием энергии как вследствие внутренних, так и внешних вязких сопротивлений. Такое представление диссипативных свойств является модельным и в общем случае основано на линеаризации упруго-диссипативных характеристик реальных звеньев. Элемент демпфирования в общем случае характеризуется коэффициентом линеаризованного сопротивления β_i (или $\gamma_i = 1/\beta_i$). Операторное представление элемента демпфирования имеет вид:

$$z_\beta(p) = \gamma. \quad (2.8)$$

Таким образом, первое звено в механической модели, содержащее упругий элемент H_1 с операторным сопротивлением $z_1(p)$, может быть определено по формуле:

$$z_1(p) = e_1 \cdot p. \quad (2.9)$$

Второе звено, включающее упругий и демпфирующий элементы, в операторном представлении имеет вид:

$$\frac{1}{z_2(p)} = \frac{1}{e_1 \cdot p} + \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{(1/c_2) \cdot p} + \beta_2 = \frac{c_2 \cdot p + \beta_2}{p}. \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует, что

$$z_2(p) = \frac{p}{\beta_2 \cdot p + c_2} \quad (2.11)$$

Теперь может быть найдено операторное сопротивление для модели Ишлинского:

$$z_{\text{И}}(p) = z_1(p) + z_2(p) = \frac{p}{c_1} + \frac{p}{\beta_2 \cdot p + c_2} = \frac{\beta_2 \cdot p + (c_1 + c_2)}{c_1 \cdot (\beta_2 \cdot p + c_2)} \cdot p. \quad (2.12)$$

Используя (2.11), определяем операторное сопротивление модели Фойхта:

$$z_{\Phi}(p) = \frac{p}{\beta_3 \cdot p + c_3}. \quad (2.13)$$

После ряда преобразований операторное сопротивление полной механической системы имеет вид:

$$z(p) = \left(\frac{\beta_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} p^2 + \frac{\beta_2 c_3 + \beta_3 c_2 + \beta_3 c_1 + \beta_2 c_1}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} p + 1 \right) \times \\ \times \left(\frac{\beta_2 \beta_3 c_1}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} p^2 + \frac{\beta_2 c_1 c_3 + \beta_3 c_1 c_2}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} p + \frac{c_1 c_2 c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \right)^{-1} \quad (2.14)$$

Введем обозначения постоянных коэффициентов, входящих в (2.14):

$$a_1 = \beta_2 \beta_3, \quad (2.15)$$

$$a_2 = c_1 \beta_2 + c_1 \beta_3 + c_2 \beta_3 + c_3 \beta_2, \quad (2.16)$$

$$a_3 = c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3, \quad (2.17)$$

$$a_4 = c_1 \beta_2 \beta_3. \quad (2.18)$$

$$a_5 = c_1 c_3 \beta_2 + c_1 c_2 \beta_3, \quad (2.19)$$

$$a_6 = c_1 c_2 c_3. \quad (2.20)$$

Окончательно операторное сопротивление имеет вид

$$z(p) = p \cdot \left[\left(\frac{a_1}{a_2} \cdot p^2 + \frac{a_2}{a_4} \cdot p + 1 \right) / \left(\frac{a_4}{a_3} \cdot p^2 + \frac{a_5}{a_3} \cdot p + \frac{a_6}{a_3} \right) \right]. \quad (2.21)$$

Переходя от операторного представления к дифференциальному уравнению, получаем реологическое уравнение модели в виде

$$a_1 \ddot{\sigma} + a_2 \dot{\sigma} + (\sigma - a_3 \sigma_{\text{пл}}) = a_4 \varepsilon + a_5 \dot{\varepsilon} + a_6 \ddot{\varepsilon}, \quad (2.22)$$

где коэффициенты a_i , $i = 1, \dots, 6$ являются линейными комбинациями характерных констант элементарных реологических тел

$$a_1 = \frac{\beta_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}, \quad (2.23)$$

$$a_2 = \frac{c_1 \beta_2 + c_1 \beta_3 + c_2 \beta_3 + c_3 \beta_2}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}, \quad (2.24)$$

$$a_3 = \frac{c_1 c_2 + c_1 c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}, \quad (2.25)$$

$$a_4 = \frac{c_1 c_2 c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}, \quad (2.26)$$

$$a_5 = \frac{c_1 c_3 \beta_2 + c_1 c_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}, \quad (2.27)$$

$$a_6 = \frac{c_1 \beta_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}. \quad (2.28)$$

Наиболее известные реологические модели, представленные в дифференциальной форме, имеют не более, чем первый порядок

производных от деформаций и напряжений. Обобщенное реологическое тело отличается тем, что дифференциальное уравнение, описывающее его, имеет второй порядок производных по времени. Повышение порядка уравнения сопровождается более сложной динамикой решений. Следовательно, открывается возможность описать процесс стружкообразования значительно детальнее. Ниже приведен анализ возможных решений, которые, в свою очередь, применены к решению базовой задачи реологии.

2.3.2 Математическое моделирование процесса стружкообразования на основе обобщенной реологической модели

Уравнение для напряжений. При моделировании различных процессов обычно полагают (привлекая дополнительные соображения), что поведение деформации во времени известно. Тогда правая часть (2.22) оказывается известной функцией времени

$$f(t) = (a_4\varepsilon + a_5\dot{\varepsilon} + a_6\ddot{\varepsilon})/a_1, \quad (2.29)$$

где обе части уравнения разделены на коэффициент a_1 ($a_1 \neq 0$). Не задавая явный вид функции $f(t)$, перепишем дифференциальное уравнение (2.22) в общем виде

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = f(t), \quad (2.30)$$

где осуществлен переход от σ к новой переменной $x \equiv \sigma - a_3\sigma_{\text{пл}}$. Решая дифференциальное уравнение (2.30) относительно переменной x , рассмотрим эволюцию напряжений.

Правая часть уравнения (2.30) имеет смысл вынуждающей силы, множитель перед первой производной, $n = a_2/2a_1$, представляет собой коэффициент сопротивления, $\omega_0 = 1/\sqrt{a_1}$ — круговая частота. Коэффициенты a_i , $i = 1 \dots 6$ положительны по своему физическому смыслу, поэтому n и ω_0 также действительные положительные величины. Важно отметить характерное свойство обобщенной реологической модели, выражающееся в том, что коэффициент сопротивления n всегда больше круговой частоты ω_0 . Так, обращаясь к виду коэффициентов a_i , (2.23)—(2.28), можно записать

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{a_1}} = \sqrt{\frac{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}{\beta_2 \beta_3}}, \quad (2.31)$$

$$n = \frac{a_2}{2a_1} = \frac{c_1 \beta_2 + c_1 \beta_3 + c_2 \beta_3 + c_3 \beta_2}{2\beta_2 \beta_3}, \quad (2.32)$$

и, сравнивая их, получить

$$n^2 - \omega_0^2 = \left[\frac{c_1 \beta_2 + c_1 \beta_3 + c_2 \beta_3 + c_3 \beta_2}{2\beta_2 \beta_3} \right]^2 - \frac{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3}{\beta_2 \beta_3} = \quad (2.33)$$

$$\left[\frac{\beta_2(c_1 + c_3) - \beta_3(c_1 + c_2)}{2\beta_2 \beta_3} \right]^2 + \frac{3c_1^2}{4\beta_2 \beta_3} > 0.$$

Таким образом, разность оказывается всегда положительной, и это свойство не зависит от параметров модели. В такой системе колебания возникнуть не могут.

Рассмотрим решение однородного уравнения, положив правую часть в (2.30) равной нулю,

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2.34)$$

При $n > \omega_0$ решение записывается в виде

$$\bar{x} = C_1 \exp [-(n + \omega) t] + C_2 \exp [-(n - \omega) t], \quad (2.35)$$

где константа ω введена по формуле

$$\omega = \sqrt{n^2 - \omega_0^2}. \quad (2.36)$$

Решение $\bar{x}$ при $n > \omega_0$ в виде

$$\bar{x} = \left[x_0 \operatorname{ch}(\omega t) + \frac{\dot{x}_0 + nx_0}{\omega} \operatorname{sh}(\omega t) \right] e^{-nt}, \quad (2.37)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 находятся из начальных условий по формулам: $x_0 = C_1 + C_2$ и $\dot{x}_0 = -(n + \omega)C_1 - (n - \omega)C_2$, где x_0 имеет смысл начального значения переменной x ; $\dot{x}_0 = \dot{x}(t = 0)$.

Решение (2.35) описывает экспоненциальное затухание системы, когда n столь велико, что не успевает произойти даже единичный период осцилляции. Конкретные численные значения констант определяются заданием двух начальных условий.

Возвращаясь теперь к уравнению с вынуждающей силой $f(t)$, можно записать частное решение $\tilde{x}(t)$ уравнения (2.30) в виде

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^t f(\tau) e^{-n(t-\tau)} \operatorname{sh} [\omega(t - \tau)] d\tau. \quad (2.38)$$

Это решение удовлетворяет уравнению (2.30) при произвольном виде функции $f(\tau)$ в правой части. И, наконец, общее решение уравнения (2.30) есть сумма двух решений (2.35) и (2.38)

$$x(t) = \bar{x}(t) + \tilde{x}(t), \quad (2.39)$$

или, более подробно,

$$x(t) = e^{-nt} \left\{ x_0 \operatorname{ch}(\omega t) + \frac{\dot{x}_0 + nx_0}{\omega} \operatorname{sh}(\omega t) + \frac{1}{\omega} \int_0^t f(\tau) e^{n\tau} \operatorname{sh}[\omega(t - \tau)] d\tau \right\}. \quad (2.40)$$

Решение для x , а, следовательно, и для напряжения σ найдено в общем виде, и его дальнейший анализ требует задания конкретного вида $f(t)$. Ниже подробно разобраны наиболее часто встречающиеся на практике случаи.

Решение при постоянной деформации

В механике деформируемого тела наибольший интерес представляет изучение динамики напряжений в реологическом теле при заданном постоянном значении деформации. В результате решения этой задачи становится возможным оценить характерные временные масштабы, на которых напряжения релаксируют к некоторой равновесной величине. Итак, положим, что значение деформации поддерживается на постоянном уровне

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}. \quad (2.41)$$

Однако, одного условия (2.41) еще недостаточно, чтобы найти полное решение задачи. Как известно из теории дифференциальных уравнений, порядок высшей производной в уравнении определяет количество произвольных постоянных в его общем решении. Уравнение (2.22) имеет второй порядок, поэтому решение содержит две

произвольные константы C_1 и C_2 , см. (2.35). Чтобы их определить, необходимо, привлекая дополнительные соображения, задать два условия, а именно: значение напряжения и/или его производной в какой-нибудь момент времени, например, t_1 и t_2 . Для уравнения второго порядка весь набор возможных условий будет:

$$\begin{aligned} 1) \quad & \sigma(t_1) \quad \text{и} \quad \sigma(t_2) \\ 2) \quad & \dot{\sigma}(t_1) \quad \text{и} \quad \dot{\sigma}(t_2) \\ 3) \quad & \sigma(t_1) \quad \text{и} \quad \dot{\sigma}(t_2). \end{aligned} \tag{2.42}$$

В дальнейшем изложении выбран третий набор условий и предположено, что в начальный момент времени $t = 0$ известны значение напряжения и его производная:

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0, \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0, \end{aligned} \tag{2.43}$$

где для краткости пользуемся переменной x . Подставляя выражение для деформации (2.41) в правую часть решения (2.40), и, пользуясь начальными условиями (2.43), получим в явном виде выражение для x как функции времени

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_4 \varepsilon_0}{a_1 \omega_0^2} \left\{ 1 - \left[\text{ch}(\omega t) + \frac{n}{\omega} \text{sh}(\omega t) \right] e^{-nt} \right\} \\ &+ \left[x_0 \text{ch}(\omega t) + \frac{\dot{x}_0 + n x_0}{\omega} \text{sh}(\omega t) \right] e^{-nt}. \end{aligned} \tag{2.44}$$

Решение (2.44) позволяет сделать вывод о временной эволюции напряжений. Известно, что для многих материалов характерно явление *релаксации напряжений*, которое заключается в постепенном

(со временем) уменьшении напряжений в теле, если величина деформации при этом поддерживается постоянной. Действительно, вид решения (2.44) описывает этот эффект, и значения напряжений в образце со временем затухают, стремясь к своему равновесному значению,

$$x(t) \longrightarrow \frac{a_4}{a_1} \frac{\varepsilon_0}{\omega_0^2} \quad \text{при} \quad t \gg (n - \omega)^{-1}. \quad (2.45)$$

В большинстве реологических тел релаксация происходит по экспоненциальному закону, то есть характеризуется одним временем релаксации. Обобщенная реологическая модель дает две, в общем случае различных, скорости релаксации $(n + \omega)$ и $(n - \omega)$ (скорость релаксации есть величина, обратная времени релаксации), и, следовательно, реализуется закон затухания более сложный, чем просто экспоненциальный. Представим скорости релаксации в развернутом виде через константы элементарных составляющих реологической модели

$$n + \omega = \frac{a_2}{2a_1} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2a_1}{a_2^2}} \right) \quad (2.46)$$

$$= \frac{c_1\beta_2 + c_1\beta_3 + c_2\beta_3 + c_3\beta_2}{2\beta_2\beta_3} + \frac{\sqrt{[\beta_2(c_1 + c_3) - \beta_3(c_1 + c_2)]^2 + 3c_1^2\beta_2\beta_3}}{2\beta_2\beta_3},$$

$$n - \omega = \frac{a_2}{2a_1} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2a_1}{a_2^2}} \right) \quad (2.47)$$

$$= \frac{c_1\beta_2 + c_1\beta_3 + c_2\beta_3 + c_3\beta_2}{2\beta_2\beta_3} - \frac{\sqrt{[\beta_2(c_1 + c_3) - \beta_3(c_1 + c_2)]^2 + 3c_1^2\beta_2\beta_3}}{2\beta_2\beta_3}.$$

Заметим, что при получении решения (2.44) мы воспользовались

одним из возможных типов начальных условий (третьим из 2.42). Подобное рассмотрение можно провести для двух оставшихся типов из этого набора.

Уравнение для деформаций. Ту же процедуру решения линейного неоднородного дифференциального уравнения применим к уравнению (2.22), переписанному относительно деформации ε

$$\ddot{\varepsilon} + 2\tilde{n}\dot{\varepsilon} + \tilde{\omega}_0^2\varepsilon = \tilde{f}(t), \quad (2.48)$$

считая правую часть известной функцией напряжений

$$\tilde{f}(t) = [a_1 \ddot{\sigma} + a_2 \dot{\sigma} + (\sigma - a_3 \sigma_{пл})] / a_6. \quad (2.49)$$

Чтобы подчеркнуть сходство подходов, сохраняем для переменных те же буквенные обозначения, но теперь снабжаем их знаком "тильда". В новых обозначениях коэффициент затухания задается формулой $\tilde{n} = a_5/2a_6$, а собственная частота $\tilde{\omega}_0 = \sqrt{a_4/a_6}$. В качестве вынуждающей силы в уравнении (2.48) выступает $\tilde{f}(t)$.

Приравнивая к нулю правую часть уравнения (2.48), приходим к однородному дифференциальному уравнению

$$\ddot{\varepsilon} + 2\tilde{n}\dot{\varepsilon} + \tilde{\omega}_0^2\varepsilon = 0. \quad (2.50)$$

Заметим, что, обращаясь к виду коэффициентов (2.26)—(2.28), можно переписать собственную частоту и константу релаксации через характеристики элементов реологической модели

$$\tilde{\omega}_0 = \sqrt{\frac{a_4}{a_6}} = \sqrt{\frac{c_2 c_3}{\beta_2 \beta_3}}, \quad (2.51)$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{a_5}{2a_6} = \frac{c_3\beta_2 + c_2\beta_3}{2\beta_2\beta_3}. \quad (2.52)$$

Так же, как в уравнении для напряжений, $\tilde{n}$ всегда оказывается больше $\tilde{\omega}_0$:

$$\tilde{n}^2 - \tilde{\omega}_0^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{c_3}{\beta_3} - \frac{c_2}{\beta_2} \right)^2 > 0, \quad (2.53)$$

поэтому для ε реализуется только аperiодический режим.

Формально уравнение (2.48) тождественно (2.30) с точностью до переобозначения коэффициентов, поэтому можно сразу выписать его общее решение, избегая повторных вычислений

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & e^{-\tilde{n}t} \left\{ \varepsilon_0 \operatorname{ch}(\tilde{\omega}t) + \frac{\dot{\varepsilon}_0 + \tilde{n}\varepsilon_0}{\tilde{\omega}} \operatorname{sh}(\tilde{\omega}t) \right. \\ & \left. + \frac{1}{\tilde{\omega}} \int_0^t \tilde{f}(\tau) e^{\tilde{n}\tau} \operatorname{sh}[\tilde{\omega}(t-\tau)] d\tau \right\}, \end{aligned} \quad (2.54)$$

где $\tilde{\omega}$ определяется как

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\tilde{n}^2 - \tilde{\omega}_0^2}. \quad (2.55)$$

Решение при постоянном напряжении

Рассмотрим частный случай общего решения (2.54) и проследим динамику деформации в реологическом теле на простом примере, когда значение напряжения поддерживается постоянным

$$x = \sigma - a_3 \sigma_{\text{пл}} = x_0 = \text{const}. \quad (2.56)$$

Чтобы определить значения произвольных постоянных ε_0 и $\dot{\varepsilon}_0$, зададимся следующим видом начальных условий

$$\varepsilon(t=0) = \varepsilon_0,$$

$$\dot{\varepsilon}(t=0) = \dot{\varepsilon}_0. \quad (2.57)$$

Теперь задача полностью определена и можно получить выражение для деформации как функции времени

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \frac{1}{a_6} \frac{x_0}{\tilde{\omega}_0^2} \left\{ 1 - \left[\text{ch}(\tilde{\omega}t) + \frac{\tilde{n}}{\tilde{\omega}} \text{sh}(\tilde{\omega}t) \right] e^{-\tilde{n}t} \right\} \\ & + \left[\varepsilon_0 \text{ch}(\tilde{\omega}t) + \frac{\dot{\varepsilon}_0 + \tilde{n}\varepsilon_0}{\tilde{\omega}} \text{sh}(\tilde{\omega}t) \right] e^{-\tilde{n}t}. \end{aligned} \quad (2.58)$$

На этом пути становится возможным определить характерное время запаздывания отклика деформации при быстром снятии нагрузки. Это время играет важную роль в технологических приложениях. Предположим, что в некоторый момент времени t_1 , когда деформация достигает величины

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_1) = & \frac{1}{a_6} \frac{x_0}{\tilde{\omega}_0^2} \left\{ 1 - \left[\text{ch}(\tilde{\omega}t_1) + \frac{\tilde{n}}{\tilde{\omega}} \text{sh}(\tilde{\omega}t_1) \right] e^{-\tilde{n}t_1} \right\} \\ & + \left[\varepsilon_0 \text{ch}(\tilde{\omega}t_1) + \frac{\dot{\varepsilon}_0 + \tilde{n}\varepsilon_0}{\tilde{\omega}} \text{sh}(\tilde{\omega}t_1) \right] e^{-\tilde{n}t_1}, \end{aligned} \quad (2.59)$$

нагружение мгновенно снимается. Чтобы проследить дальнейшую эволюцию деформации, необходимо повторить решение уравнения (2.48), задав значение $x_0 = 0$. Тогда решение для деформации записывается в виде

$$\varepsilon(t) = \left[\varepsilon_1 \text{ch}(\tilde{\omega}t) + \frac{\dot{\varepsilon}_1 + \tilde{n}\varepsilon_1}{\tilde{\omega}} \text{sh}(\tilde{\omega}t) \right] e^{-\tilde{n}t}, \quad \text{при } t > t_1 \quad (2.60)$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon(t = t_1)$ и $\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}(t = t_1)$. Решение (2.60) показывает, что процесс возвращения тела к недеформированному состоянию происходит с некоторым запаздыванием. Релаксация описывает-

ся суммой двух экспонент с различными показателями и, следовательно, характеризуется не одним, как для большинства реологических моделей, а двумя временами запаздывания. Последние можно выразить через основные характеристики реологической модели,

$$\tau_{ret}^{(1)} = \frac{1}{\tilde{n} + \tilde{\omega}} = \frac{c_3}{2\beta_3} + \frac{c_2}{2\beta_2} + \left| \frac{c_3}{2\beta_3} - \frac{c_2}{2\beta_2} \right|, \quad (2.61)$$

$$\tau_{ret}^{(2)} = \frac{1}{\tilde{n} - \tilde{\omega}} = \frac{c_3}{2\beta_3} + \frac{c_2}{2\beta_2} - \left| \frac{c_3}{2\beta_3} - \frac{c_2}{2\beta_2} \right|. \quad (2.62)$$

2.4 Результаты и выводы по главе

1. Процессы пластической деформации и разрушения рассмотрены с точки зрения теории дислокаций как результат движения и размножения дефектов кристаллической решетки деформируемого материала. Выявлены важнейшие условия возникновения пространственной неоднородности и локализации пластической деформации, что может явиться причиной неустойчивости процесса резания.
2. Построена обобщенная математическая модель, которая позволяет описывать процесс стружкообразования с учетом упруго-пластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей процесса стружкообразования в зоне активного пластического деформирования.
3. Проведен анализ системы реологических уравнений, который позволил обнаружить сложный неэкспоненциальный закон релаксации напряжений, характеризующийся двумя константами затухания.
4. Анализ динамики деформации позволил выявить два характерных времени запаздывания, что подтвердило принятую в качестве основной гипотезу о запаздывании сил.
5. В основу описания процесса резания положено сочетание ме-

тодов реологического моделирования со средствами компьютерного анализа, реализующего описание деформации металла с помощью теории сплошных сред. Такой комбинированный подход позволяет варьировать реологическую модель и усложнять вид нагружения при моделировании процесса резания.

Глава 3

Имитационное моделирование лезвийной обработки на основе реологического описания процесса стружкообразования

3.1 Выбор и обоснование инструментальных средств для имитационного моделирования процесса стружкообразования

Изучение механизмов деформации и стружкообразования при механической обработке приобретает особую актуальность в связи с широким внедрением в производство автоматизированных станочных систем. Резание металлов является сложной совокупностью различных деформаций: смятия, сдвига, среза, сопровождающихся трением отделившейся стружки о переднюю поверхность резца и трением поверхности резания заготовки о заднюю поверхность резца.

Представление о характере взаимодействия резца и заготовки можно получить из следующего схематического описания. В начальный момент, когда движущийся резец под действием силы F вдавливается в металл, в срезаемом слое возникают упругие деформации. При движении резца упругие деформации, накапливаясь по абсолютной величине, переходят в пластические. В прирезцовом снимаемом слое материала заготовки возникает сложное упругонапряженное состояние. В плоскости, перпендикулярной к траектории движения резца, возникают нормальные напряжения, а в плоскости, совпадающей с траекторией движения резца — касательные напряжения. В точке приложения силы значения касательных напряжений максимальны. По мере удаления от этой точки касательные напряжения уменьшаются. Нормальные напряжения вначале действуют как растягивающие, а затем быстро уменьшаются и, переходя через нуль, превращаются в напряжения сжатия. Срезаемый слой металла находится под действием давления резца, касательных и нормальных напряжений.

Сложное упругонапряженное состояние металла приводит к пластической деформации, а рост ее — к сдвиговой деформации, т.е. к смещению частей кристаллов относительно друг-друга по плоскости сдвига, см. рис.3.1. Сдвиговые деформации происходят в зоне стружкообразования ЛОК, причем, деформации начинаются по плоскости ОЛ и заканчиваются по плоскости ОК, в которой завер-

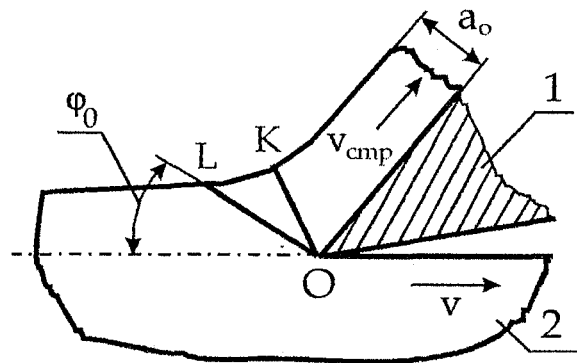


Рис. 3.1. Схема образования стружки: 1 — резец; 2 — заготовка; OL и OK — границы пластической зоны; φ_0 — угол сдвига; a_0 — толщина срезаемого слоя; v — скорость резания; $v_{ср}$ — скорость стружки

шается разрушение кристаллов, т.е. скалывается элементарный объем металла и образуется стружка. Далее процесс повторяется и образуется следующий элемент стружки. Сформулируем отличительные черты процесса резания:

1. Протекает при исключительно высоких значениях относительной деформации. В зоне пластической деформации действуют большие сжимающие напряжения, которые препятствуют разрыву материала, несмотря на то, что относительная деформация превосходит значение, при котором происходит разрушение образца при растяжении.
2. Деформация локализована в малом объеме пластической зоны. Скорость деформации необычайно высока.
3. Свежеобразованная поверхность срезаемого деформированного металла, трущаяся о переднюю поверхность инструмента, химически чиста. Это делает ее химически более активной

по сравнению с обычными окисленными поверхностями, участвующими в процессах трения. Это увеличивает адгезию и повышает силу трения. Активизации химических процессов также способствует нагревание металла в результате тепловыделения при трении резца о поверхность металла.

Высокие значения относительных деформаций и скорости деформации показывают, что свойства материала в зоне резания сильно отличаются от свойств этого же материала, возникающих при других процессах деформации. Поэтому универсальная модель стружкообразования должна была бы включать химические, термодинамические и механические процессы в системе "резец — металл" во всей сложности их взаимодействия и самосогласованном взаимовлиянии. На современном этапе такая общая модель недоступна. Упрощение возможно на пути выделения механических процессов в отдельное рассмотрение, применяя к ним классическую теорию пластичности. Надо отметить, что целостного представления о характере напряженного и деформированного состояния в зоне стружкообразования до сих пор не сформулировано.

Построение эквивалентной механической модели включает в себя формулировку ряда упрощающих предположений. Взаимодействие резца с заготовкой в зоне стружкообразования представляется как контакт твердого тела (резца) и сплошной среды (за-

готовки). Модель не учитывает процессов разрушения металла в срезаемом слое. Вместо этого, основной упор делается на исследование физико-механического состояния поверхностного слоя заготовки после обработки резанием. Теория сплошной среды вынуждает делать такое предположение, поскольку в ее основе заложено условие сплошности. Это упрощение позволяет получить аналитические и численные данные о состоянии деформируемого прирезцового слоя металла, но оставляет открытым вопрос описания самого процесса отделения стружки от заготовки. Решение рассмотренной выше задачи может быть эффективно осуществлено с использованием теории сплошной среды в дискретной постановке путем решения нелинейной задачи термоупругопластичности с использованием методов конечных элементов [51, 56]. Достаточно широкое распространение при решении подобных задач нашел интегрированный конечно-элементный комплекс COSMOS/M.

Метод конечных элементов (МКЭ) является мощным численным методом для решения инженерных и физических задач широкого класса. Он применяется для расчета напряжений в сложных конструкциях, для решения задач теплопроводности, гидродинамики, электромагнетизма, для расчета собственных частот колебаний системы. МКЭ представляет собой один из видов вариационно-разностных подходов, предназначенный для численного решения дифференциальных уравнений или их систем. Основная идея ме-

тогда состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Алгоритм построения дискретной модели непрерывной величины реализуется в виде следующей последовательности:

1. Рассматриваемая область разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Каждый элемент ограничен конечным числом точек — узлами.

2. На каждом элементе непрерывная величина аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого определяются значениями этой величины. Кусочно-непрерывные функции задаются на каждом элементе, аппроксимируя тем самым изменение той физической величины, решение для которой требуется найти. Например, при рассмотрении задачи о нахождении поля температур в образце соответствующему дифференциальному уравнению сопоставляется функционал, процедура минимизации которого сводится к решению системы алгебраических уравнений с коэффициентами, зависящими от значений кусочно-непрерывных функций в узловых точках.

В настоящее время существует целый ряд программных продуктов, позволяющих получить численные решения рассматриваемого круга задач. Мощным по своим вычислительным возможностям и

удачным с точки зрения реализации пользовательского интерфейса является программный комплекс COSMOS/M. Интегрированный конечно-элементный комплекс COSMOS/M предназначен для расчета конструкций, находящихся под действием статических и динамических нагрузок, для решения задач теплопроводности, гидродинамики, электромагнетизма. Несомненным достоинством пакета является возможность решения нелинейных задач.

Комплекс COSMOS/M реализован в виде удобной для пользователя модульной структуры, в которой каждый модуль отвечает за свой класс задач. Модули эффективно взаимодействуют между собой и работают с единой базой данных. Работа пользователя осуществляется в интерактивном режиме.

В рамках модельного представления процесса резания как независимой эволюции двух подсистем, заготовки и стружки, возможно применение теории сплошной среды. Численное моделирование с помощью программного комплекса COSMOS/M, основанное на реализации метода конечных элементов, позволяет провести широкий спектр исследований напряженно-деформированного состояния поверхности. Решая нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных для сплошной среды, программный комплекс дает достаточно полную картину нестационарного отклика исследуемой механической системы на формируемое воздействие.

В данной главе рассмотрены два аспекта процесса резания. Процесс пластического деформирования и контактных взаимодействий срезаемого слоя осуществляется путем рассмотрения стружки как сплошной среды при взаимодействии с передней поверхностью инструмента.

Для обоснования применимости программного комплекса COSMOS/M к решению задач термоупругопластичности, рассмотрим процесс внедрения индентора в поверхностный слой изделия. Здесь прототипом является определение микротвердости непосредственно под нагрузкой. В работе [13] для определения упруго-пластических свойств поверхностного слоя изделия был использован ИВК "Твердость". Он позволяет построить диаграммы состояния поверхностного слоя — временную (рис.3.2) и силовую (рис.3.3). На диаграммах имеются 4 характерных участка, отмеченных точками А, В, С, D:

— ОА — внедрение индентора при равномерном увеличении силы нагружения от 0 до P_{max} , время нагружения t_a , глубина внедрения индентора h_a ;

— АВ — выстой индентора под постоянной нагрузкой P_{max} , время выстоя $t_b - t_a$, глубина внедрения индентора h_b ;

— ВС — упругое восстановление отпечатка при равномерном уменьшении силы нагружения от P_{max} до $P_{упр}$, время упругого восстановления $t_c - t_b$, глубина внедрения индентора h_c ;

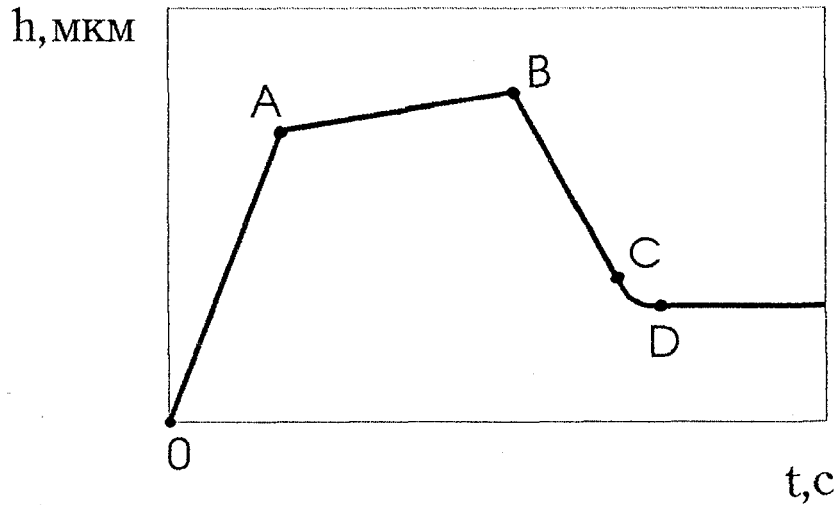


Рис. 3.2. Временная диаграмма внедрения индентора

— CD — пластическое восстановление отпечатка при уменьшении силы нагружения от $P_{\text{упр}}$ до 0, время пластического восстановления $t_d - t_c$, глубина внедрения индентора h .

Рассмотрим применение программного комплекса COSMOS/M для приведенного выше примера решения задачи термоупруго-пластичности изделия прямоугольной формы при трех различных программах нагружения.

Пределы текучести при простейших напряженных состояниях (растяжение, сжатие, сдвиг) для различных конструкционных материалов можно получить путем непосредственного эксперимента. Однако, в большинстве случаев приходится иметь дело со сложными напряженными состояниями, когда непосредственное экспериментальное определение условий текучести для различных напряженных состояний связано с большими трудностями. Опреде-

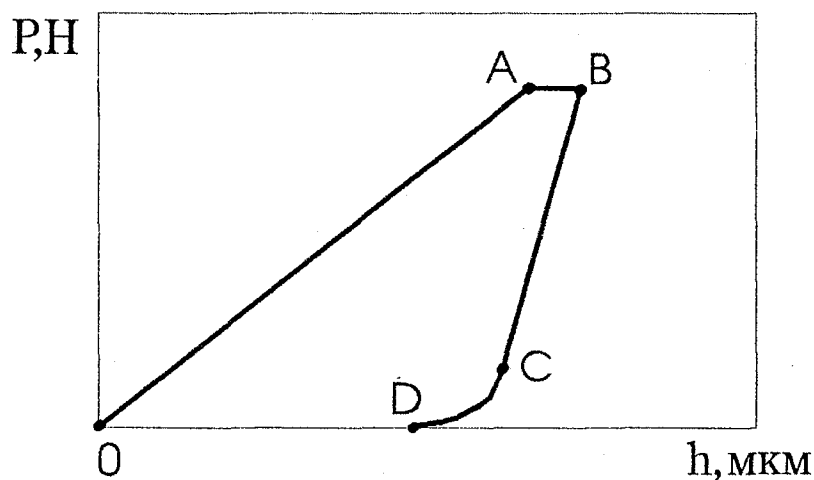


Рис. 3.3. Силовая диаграмма внедрения индентора

ленную информацию о характере напряженного состояния, при котором наступает пластическая деформация, можно получить, используя механические теории (критерии) прочности и пластичности. Каждый такой критерий имеет общее значение для некоторой определенной группы или класса конструкционных материалов данного типа [38].

Когда нагрузка, действующая на идеально пластичное тело, достигает некоторого критического значения, происходит образование местных трещин и наступает состояние разрушения. Другими словами, как только внешняя нагрузка достигает критического значения, тело оказывается неспособным воспринимать дальнейшее увеличение этой нагрузки. Поэтому такую критическую нагрузку называют разрушающей или предельной нагрузкой. В состоянии пластического разрушения система, вначале жесткая, превращает-

ся в механизм с определенным распределением скоростей деформаций.

При большой величине нагружения деформации значительно искажают геометрию образца, и линейная теория перестает быть справедливой. Наиболее адекватен ситуации нелинейный анализ, при котором на каждом последующем шаге решения задачи расчет напряжений и деформаций производится уже для деформированной конструкции, вид которой определен на предыдущем шаге. В условиях рассматриваемого сложного напряженного состояния представляется целесообразным использовать условие Мизеса [114], предложенное им для анизотропных кристаллов и развитое впоследствии Р.Хиллом [104] применительно к металлам и сплавам, получающим анизотропию в процессе деформирования.

Компьютерное моделирование с помощью программного комплекса COSMOS/M в применении к выбранной конструкции реализуется следующим образом:

1. Физическая область задачи (прямоугольная пластина) делится на подобласти или конечные элементы (прямоугольники). Вид разбиения исследуемой пластины на конечные элементы с указанием нумерации узлов показан на рис.3.4.
2. Зависимая переменная (перемещение) аппроксимируется функцией специального вида на каждом конечном элементе и, следовательно, во всей области. Параметры этих аппрокси-

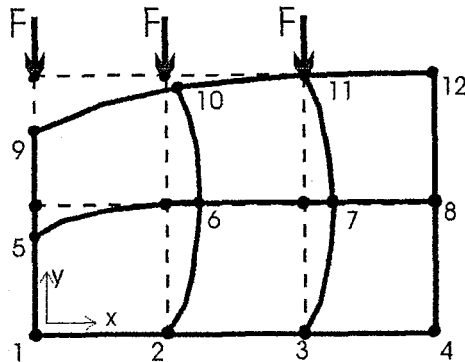


Рис. 3.4. Вид правой половины пластины с указанием нумерации узлов и места приложения силы в момент времени $t = 0$ с (показан пунктиром). Вид деформированной пластины под действием приложенной силы F при $t = 8$ с (задача 1) показан сплошной линией

маций становятся неизвестными параметрами.

3. Используя вариационный подход, аппроксимации подставляются в уравнение, выражающее принцип минимума потенциальной энергии, что дает систему уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения этих параметров и, следовательно, получить приближенное решение задачи.

Конечным результатом расчета является получение полного набора значений смещений для всех узлов и компонент напряжений, включая напряжения Мизеса, во всех узлах и в центре каждого элемента. Динамика процесса деформации описывается путем сравнения результатов анализа для разных моментов времени.

Сначала рассмотрим наиболее простую задачу деформации металлической пластины под действием приложенной силы. Считая, что нагрузка прикладывается симметрично — в центре пластины,

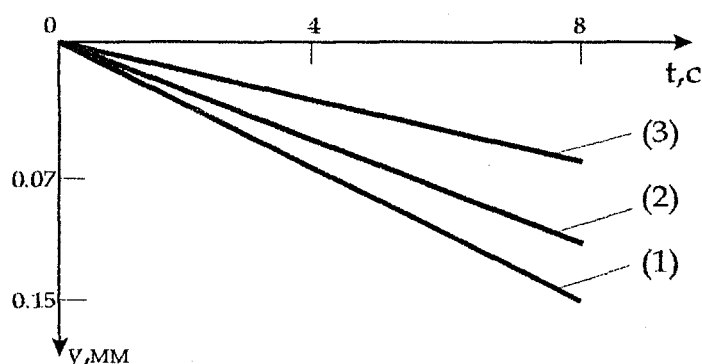


Рис. 3.5. Зависимости смещений узлов 9 [кривая (1)], 10 [кривая (2)], 11 [кривая (3)] вдоль оси ОУ от времени (задача 1)

целесообразно рассмотреть только одну (правую) половину, которая и изображена на рис.3.4. Направления и места приложения силы указаны стрелками, величина силы 10 Н, толщина пластины 1 мм, общее время расчета 8 с. Закрепления наложены на узлы 1, 2, 3, 4, 8, 12, тем самым препятствуя их перемещению в любых направлениях. Неполное закрепление узлов 5 и 9 разрешает перемещение только по вертикальной оси ОУ.

Программный комплекс COSMOS/M выводит результаты расчета в текстовой файл, в котором все данные представлены в виде таблиц с необходимыми комментариями. Однако, наиболее наглядным является графическое представление результатов, осуществляемое с помощью программных модулей PLOTSTAR и GRAPHSTAR. На рис.3.5 приведены графики перемещения узлов 9, 10, 11 по оси ОУ в зависимости от времени. Как и следовало ожидать, наиболее сильно оказывается деформированной центральная часть пластины (узел 9), что, в первую очередь, связано с закреп-

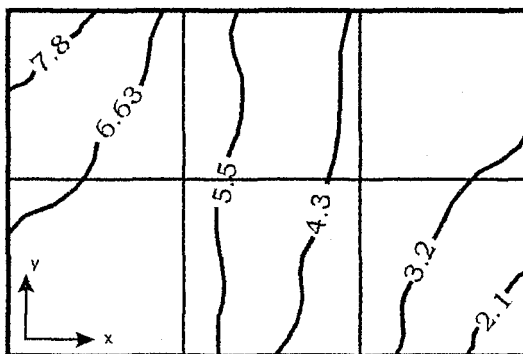


Рис. 3.6. Диаграмма распределения напряжений Мизеса в пластине, $t = 8$ с (задача 1). Величина напряжений измеряется в МПа плением правого края (узлы 4, 8, 12).

На рис.3.6 приведена диаграмма распределения напряжений Мизеса в пластине при $t = 8$ с.

На рис.3.4 указан вид деформированной пластины при $t = 8$ с. Сопоставительные результаты натурального и компьютерного моделирования показали отклонение не более 11% в каждой зоне нагружения (см. рис.3.2 и 3.3).

При необходимости может быть получена любая информация о динамическом состоянии конструкции, используя или файл данных, или их графическое представление. Опуская эти подробности, перейдем к рассмотрению следующей задачи.

На практике часто возникают ситуации, когда элементы конструкции работают в условиях высоких температур, от которых существенно зависят механические характеристики материалов. Принимается, что критерии прочности могут применяться и в этих случаях, если только входящие в них константы материала заме-

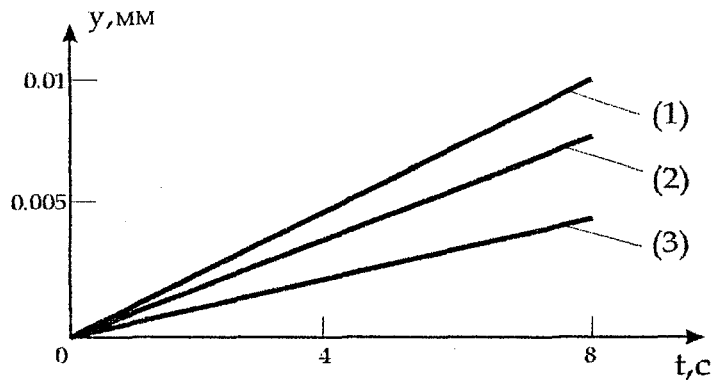


Рис. 3.7. Динамика смещений узлов 9 [кривая (1)], 10 [кривая (2)], 11 [кривая (3)] вдоль оси OY в зависимости от времени (задача 2)

нить соответствующими функциями от температуры. Эти функции могут быть получены экспериментальным путем. Для рассматриваемой задачи заданы два значения модуля упругости: его значение при температуре $T = 200^{\circ}\text{C}$ и $T = 500^{\circ}\text{C}$. Температурная нагрузка приложена следующим образом:

- узел 9 — температура $T = 200^{\circ}\text{C}$;
- узел 10 — температура $T = 200^{\circ}\text{C}$;
- узел 11 — температура $T = 200^{\circ}\text{C}$.

Закрепления пластины те же, что и в задаче, рассмотренной выше. Динамика перемещения узлов 9, 10, 11 представлена на рис.3.7, который иллюстрирует тенденцию к "вспучиванию" материала на незакрепленном крае вследствие температурного расширения. Диаграмма распределения напряжений Мизеса в этом случае имеет вид, изображенный на рис.3.8.

Третья задача объединяет в себе условия двух предыдущих: к

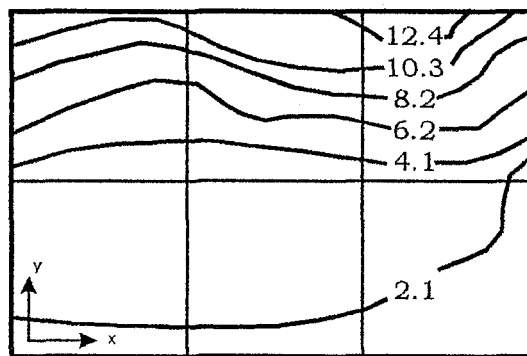


Рис. 3.8. Диаграмма распределения напряжений Мизеса в пластине, $t = 8$ с (задача 2). Величина напряжений измеряется в МПа

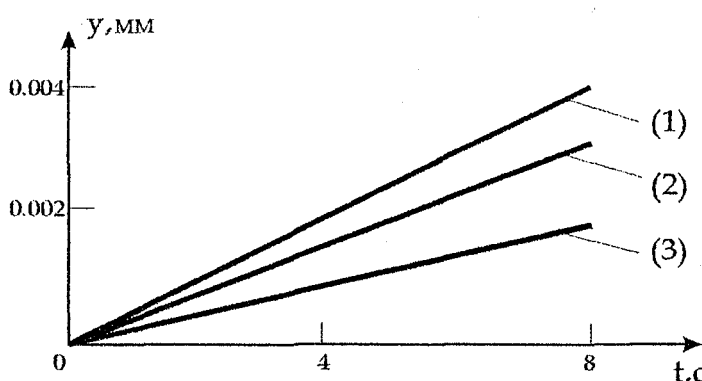


Рис. 3.9. Динамика смещений узлов 9 [кривая (1)], 10 [кривая (2)], 11 [кривая (3)] вдоль оси ОУ в зависимости от времени (задача 3)

узлам 9, 10, 11 прикладывается нагрузка ($F = 10$ Н) и одновременно происходит их нагревание ($T = 200^0$ С). Конкуренция процессов "продавливания" и "вспучивания" приводит к преобладанию последнего, что иллюстрируется рис.3.9. На рис.3.10 приведена диаграмма распределения напряжений Мизеса для рассматриваемой задачи.

На примере решения трех нелинейных динамических задач продемонстрирована эффективность применения программного комплекса COSMOS/М к проблеме термоупругопластичности. Имитационное моделирование позволяет уйти от трудоемких натурных экс-

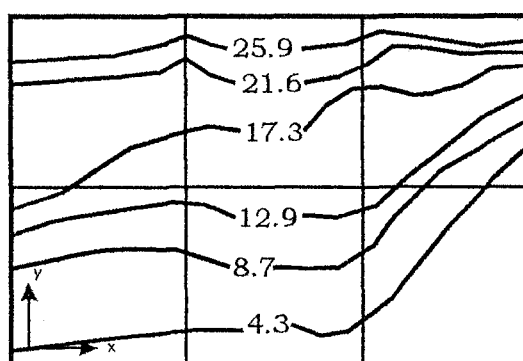


Рис. 3.10. Диаграмма распределения напряжений Мизеса в пластине, $t = 8$ с (задача 3). Величина напряжений измеряется в МПа

периментов с реальными объектами.

3.2 Моделирование зоны пластической деформации в процессе стружкообразования

Как было отмечено выше, связь инструмента с заготовкой осуществляется через процесс резания, учитывающий взаимодействие упруго-диссипативных свойств динамической системы и реологических свойств процесса стружкообразования. При моделировании процесса стружкообразования при лезвийной обработке его можно представить в виде сложной реологической модели — последовательного соединения вязкоупругопластической среды Ишлинского, отражающей процесс первичной деформации металла срезаемого слоя, и среды Фойхта, отражающей процесс деформации и трения сходящей стружки [22, 29, 30, 61].

Определение квазиупругих и диссипативных характеристик ма-

териала в срезаемом слое и при контактном взаимодействии стружки по передней поверхности режущего инструмента связано с решением дискретной нелинейной задачи методом конечных элементов с помощью программного комплекса COSMOS/M [19, 20]. Основная идея метода состоит в том, что рассматриваемая область разбивается на конечное число подобластей (элементов). Каждый элемент ограничивается конечным числом точек — узлами. На каждом элементе непрерывная величина аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого определяются значениями этой величины. Кусочно-непрерывные функции задаются на каждом элементе, аппроксимируя изменение той физической величины, решение для которой требуется найти.

Задача формулируется следующим образом. Физическая область задачи, имитирующая зону пластического деформирования срезаемого слоя, разбивается на элементы (рис. 3.11). Приложенная нагрузка P имитирует действие силы резания. Зависимость силы P от времени приведена на рис. 3.12. Таким образом, задача сводится к двумерной (плоской) модели. Задаются необходимые ограничения на перемещения узлов. Упруго-пластические характеристики варьировались в зависимости от материала обрабатываемой детали. Общее время процесса t для всех расчетов выбиралось равным 0.1 с (подробное описание методики имитационного моделирования представлено в п.4.2).

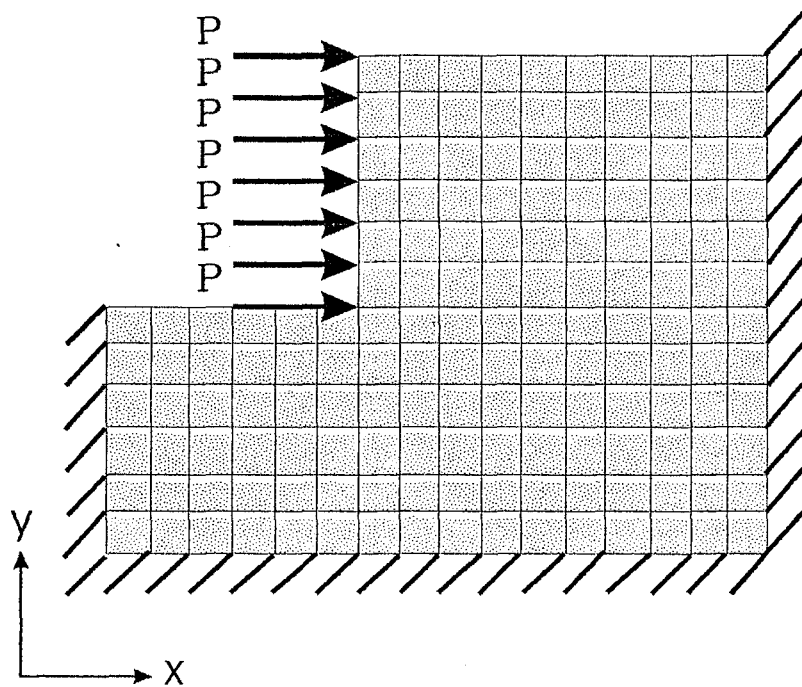


Рис. 3.11. Вид модели с указанием вида разбиения на элементы, граничных условий и мест приложения силы P

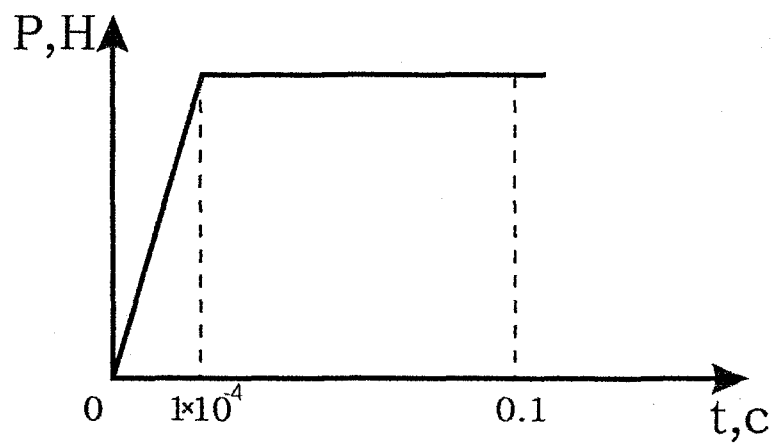


Рис. 3.12. График зависимости силы от времени

Приращение пластических деформаций определялось матричным уравнением, устанавливающим связь между приращением перемещений узлов и действующих в них приращениях сил dF , которое можно представить в виде

$$\{dF\} = [k] \{du\} .$$

Матрица жесткости $[k]$ может быть определена, исходя из следующих соотношений:

для упругого состояния

$$[k^e] = \int_V [B]^T [D^e] [B] dV;$$

для пластического состояния

$$[k^p] = \int_V [B]^T [D^p] [B] dV,$$

где $[B]$ — матрица связи перемещений узлов точки с деформацией; $[B]^T$ — транспонированная матрица $[B]$; $[D^e]$, $[D^p]$ — матрицы связи приращений напряжений и деформаций, составленные согласно законам Гука и Прандтля - Рейсса соответственно; V — пространственная область, граница которой является поверхностью [39, 52].

Вид деформированного тела из стали 45, модуль упругости которой $E = 2.1 \times 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 314$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$ в момент времени $t = 0.1$ с приведен на рис. 3.13.

По результатам работы были построены кривые, характеризующие распределение напряжений вглубь деформированного тела.

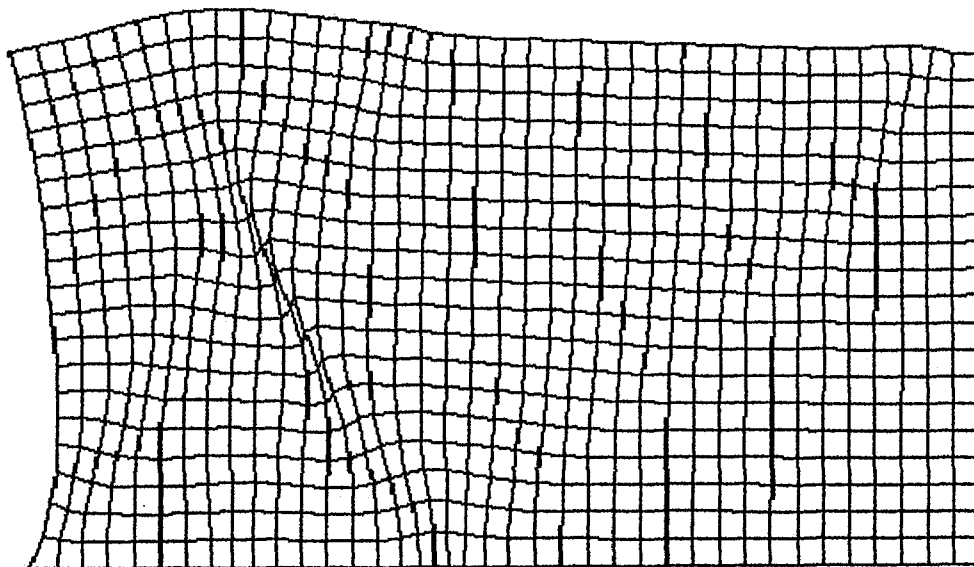


Рис. 3.13. Фрагмент изменения деформации ϵ по сечению деформируемого материала

Зависимости изменения напряжений σ_x от времени t для некоторых материалов приведены на рис. 3.14.

Дополнительную информацию о процессах, происходящих в зоне стружкообразования, дает график зависимости деформаций от времени для узлов, находящихся непосредственно в месте приложения силы (рис. 3.15). Данные зависимости построены для различных материалов.

Сложное напряженно-деформированное состояние стружки иллюстрируется графиком зависимости напряжений от деформаций для узлов, в которых непосредственно приложена механическая нагрузка (рис. 3.16).

Всесторонний анализ полученных данных, а также результаты исследований, проведенных выше, позволили получить зависимость упруго-диссипативных характеристик β_2/c_2 . Результаты

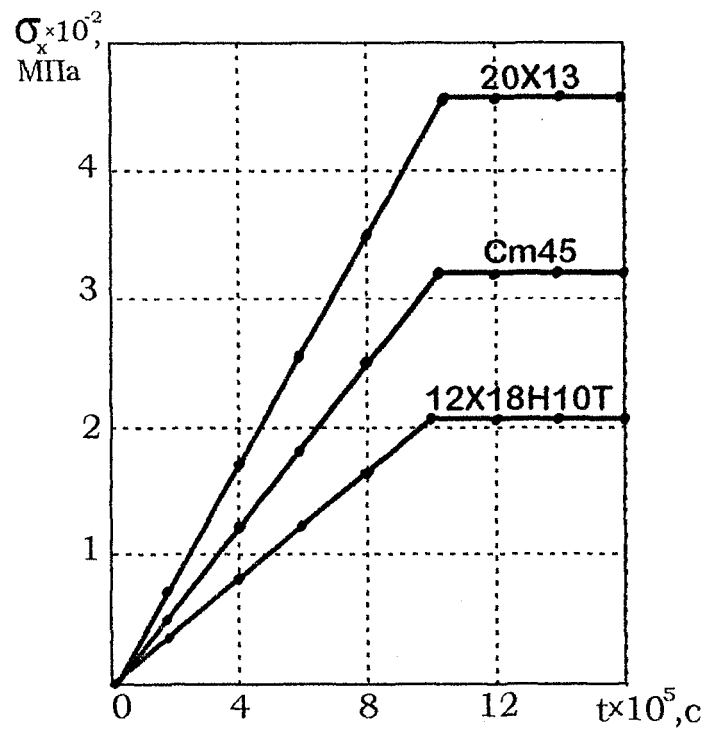


Рис. 3.14. График зависимости напряжения σ_x от времени в момент времени $t = 0.1 \text{ с}$ для различных материалов

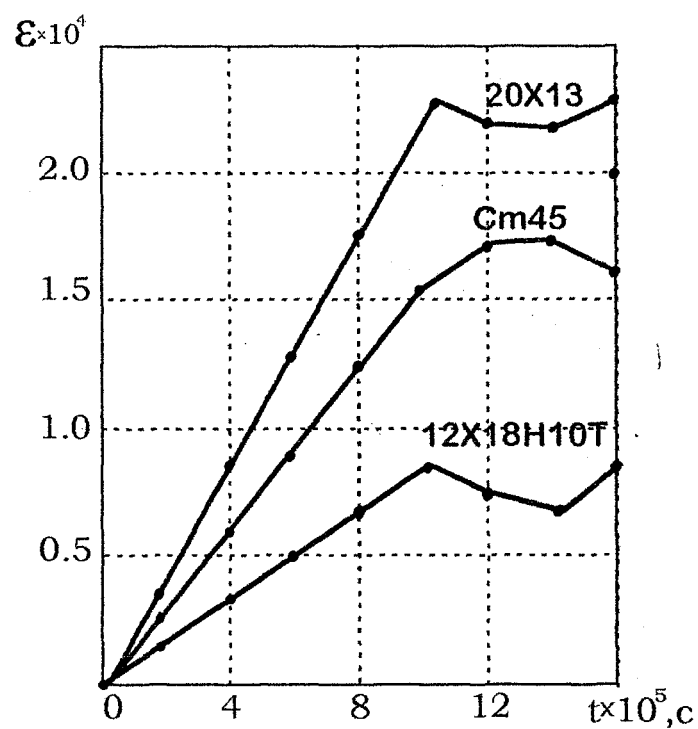


Рис. 3.15. График зависимости деформаций от времени в момент времени $t = 0.1 \text{ с}$ для различных материалов

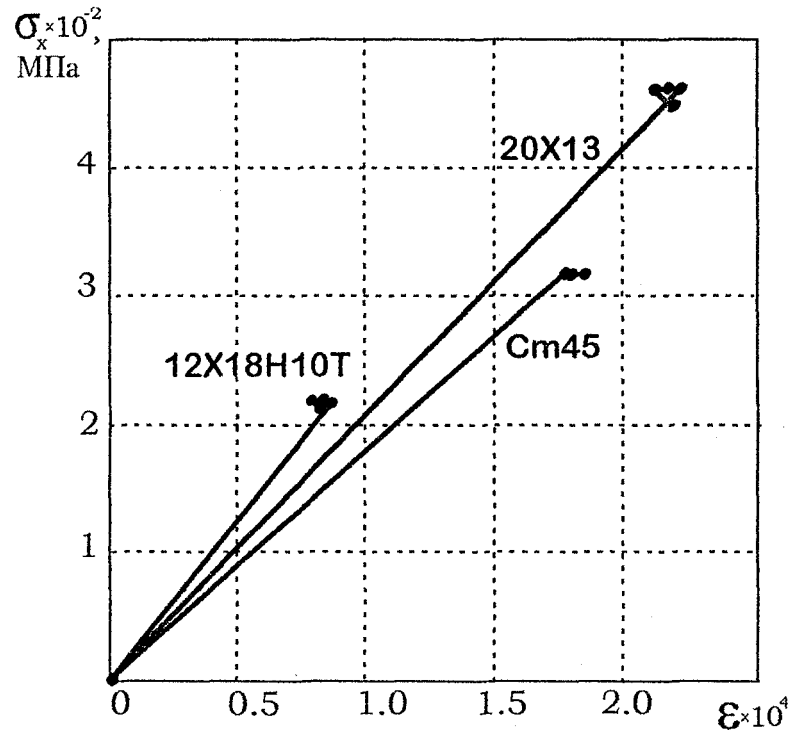


Рис. 3.16. График зависимости напряжений от деформаций в момент времени $t = 0.1$ с для различных материалов

расчетов представлены в виде поверхности на рис. 3.17. Алгоритм решения данной задачи подробно описан в п.4.2.

3.3 Моделирование контактного взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента

В первой главе рассмотрен эффект адгезии в приложении к процессу стружкообразования. Ниже проводится численное моделирование фазы схватывания между инструментом и обрабатываемой заготовкой. Здесь целью является исследование динамики сдвига-

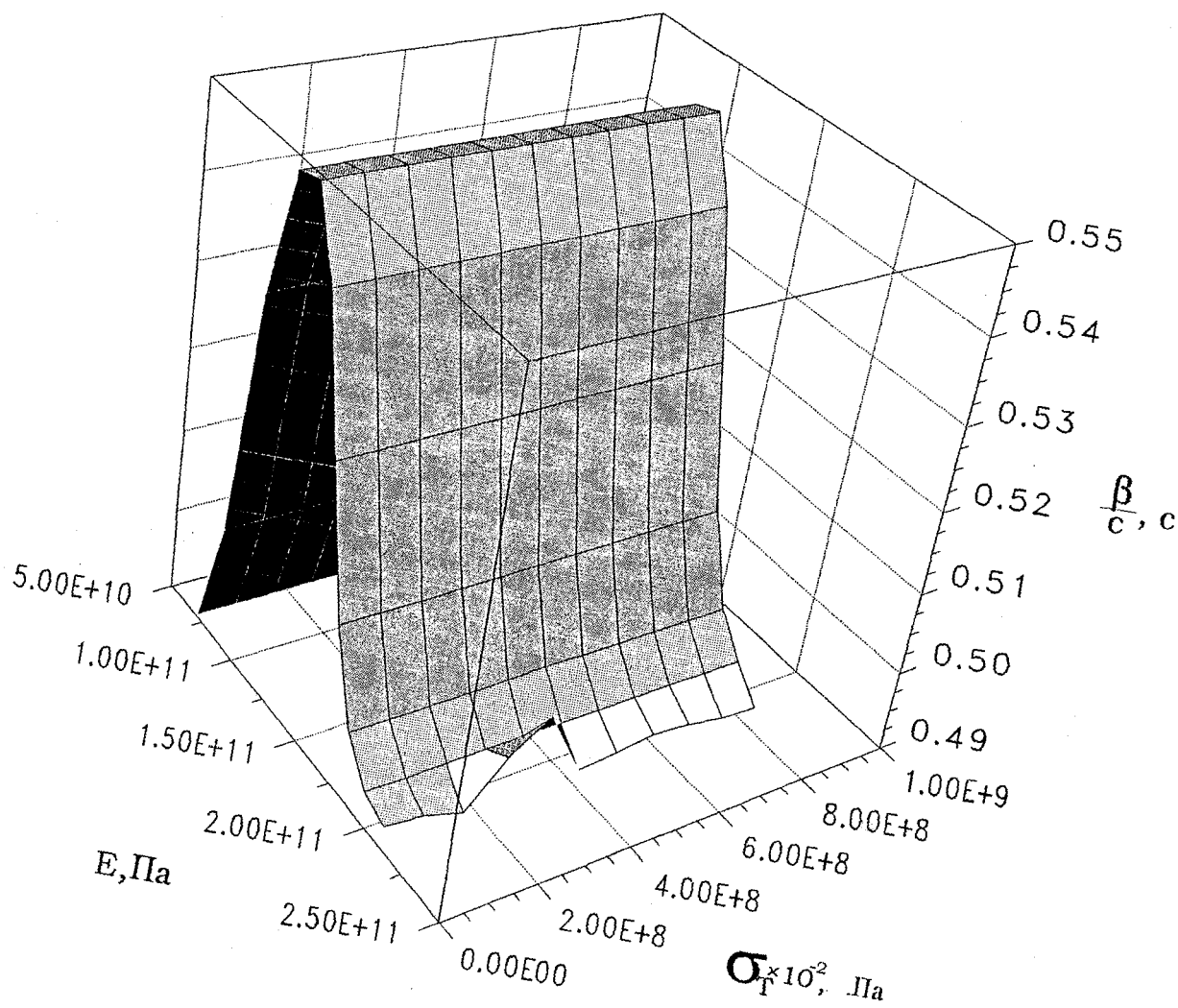


Рис. 3.17. Зависимость упруго-диссипативных характеристик в зоне пластического деформирования от модуля упругости E и предела текучести σ_T

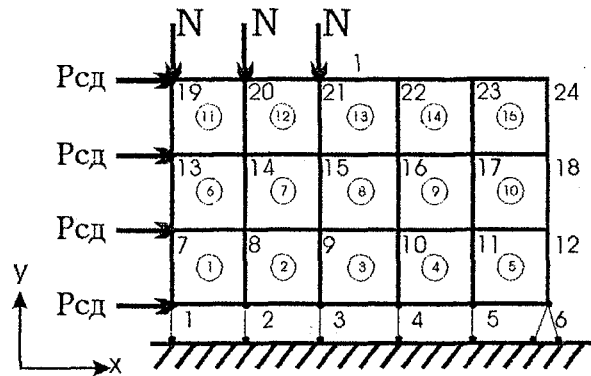


Рис. 3.18. Схематичное изображение фрагмента стружки с указанием нумерации узлов и элементов (обведено кружком) и областей приложения сил $P_{сд}$ и N

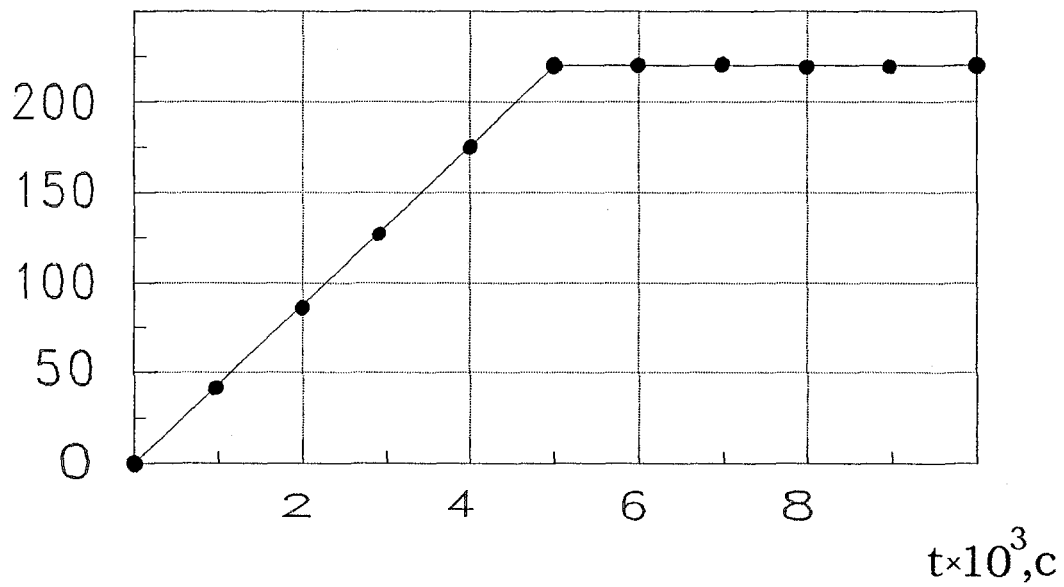
ющей силы $P_{сд}$, и, в частности, установление вида зависимости $P_{сд}$ от величины деформации.

Взаимодействие инструмента со стружкой схематично будем представлять следующим образом. Выделим фрагмент стружки прямоугольной формы (рис. 3.18), осуществляющий контактное взаимодействие с передней поверхностью режущего инструмента. Разделим фрагмент на 15 элементов. На левую торцевую поверхность стружки приложем переменную во времени силу $P_{сд}$, зависимость которой от времени приведена на рис.3.19, а. На левый край верхней части фрагмента будет действовать переменная во времени сила N (см. рис.3.19, б). На узлы 1 ÷ 6 наложены связи, которые исключают смещение в вертикальном направлении. На узел 6 наложена также связь в горизонтальном направлении. Силы $P_{сд}$ и N равномерно распределены по узлам 1, 7, 13, 19 и 19, 20, 21 соответственно.

Динамику упругопластических деформаций стружки рассмат-

а)

$P_{сд}, Н$



б)

$N, Н$

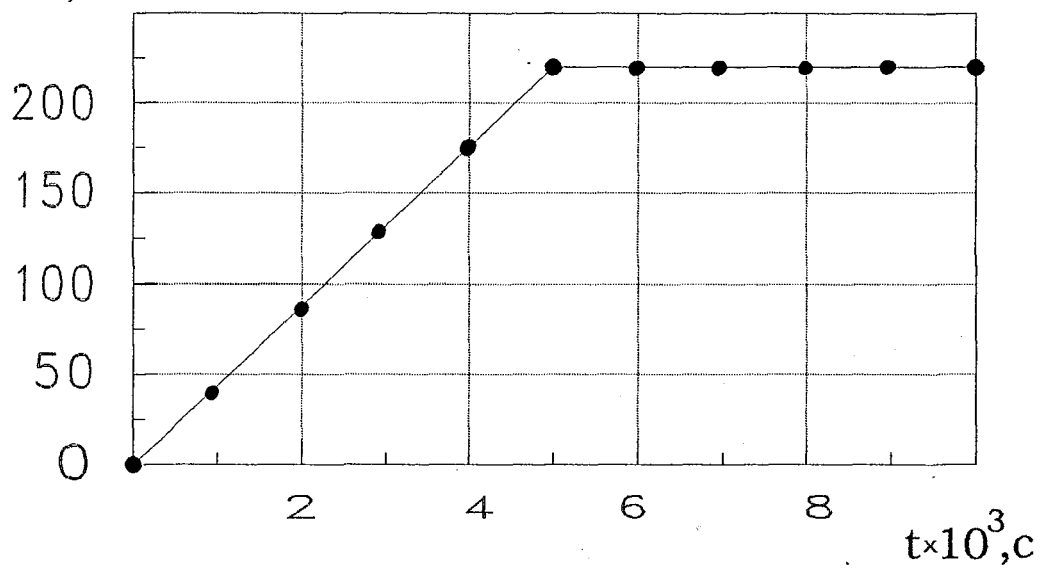


Рис. 3.19. Временная диаграмма нагружения фрагмента стружки: а) для силы, прилагаемой к левому торцу ($P_{сд}$); б) для силы, прилагаемой к верхней части фрагмента (N)

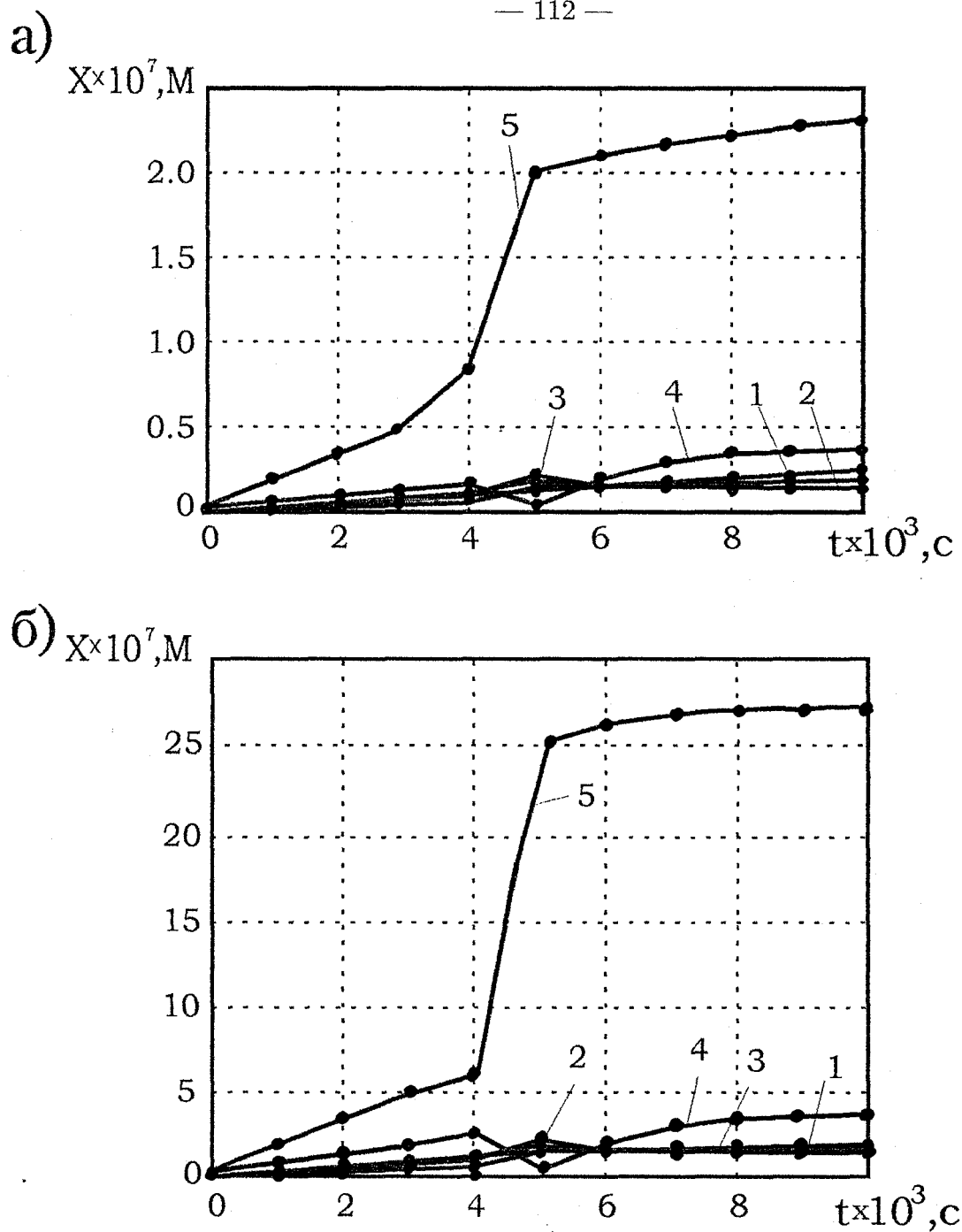


Рис. 3.20. Зависимость деформаций от времени для первого-пятого элементов для материалов с различными упруго-пластическими характеристиками: а) $E = 2.1 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 314$ МПа; б) $E = 1.2 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 15$ МПа

риваем численно с применением пакета COSMOS/M, в основе которого лежит использование метода конечных элементов [20]. Как следует из контекста сформулированной задачи, на фрагмент действуют значительные по величине нагрузки, при которых возникают деформации, значительно искажающие геометрию конструкции. В этой ситуации линейная теория перестает быть справедливой, и следует применить нелинейный анализ, при котором на каждом последующем шаге решения задачи расчет напряжений и деформаций производится уже для деформированной конструкции, вид которой определен на предыдущем шаге.

Под действием силы $P_{сд}$ материал модели испытывает деформацию сжатия. На рис. 3.20, а, б показана зависимость деформаций первого-пятого элементов как функция времени для двух пар значений модуля упругости E и предела текучести σ_T . Из графиков видно, что при достижении сдвигающей силой некоторой критической величины деформация последнего элемента скачком увеличивается в четыре раза.

Чтобы детально проанализировать характеристики напряженно-деформированного состояния стружки, построены графики зависимостей сдвигающей силы, действующей на четвертый и пятый элементы, от времени и от перемещения (см. рис. 3.21, а, б; 3.22, а, б). На начальном этапе нагружения, когда деформации малы, можно условно представить каждый элемент рассматрива-

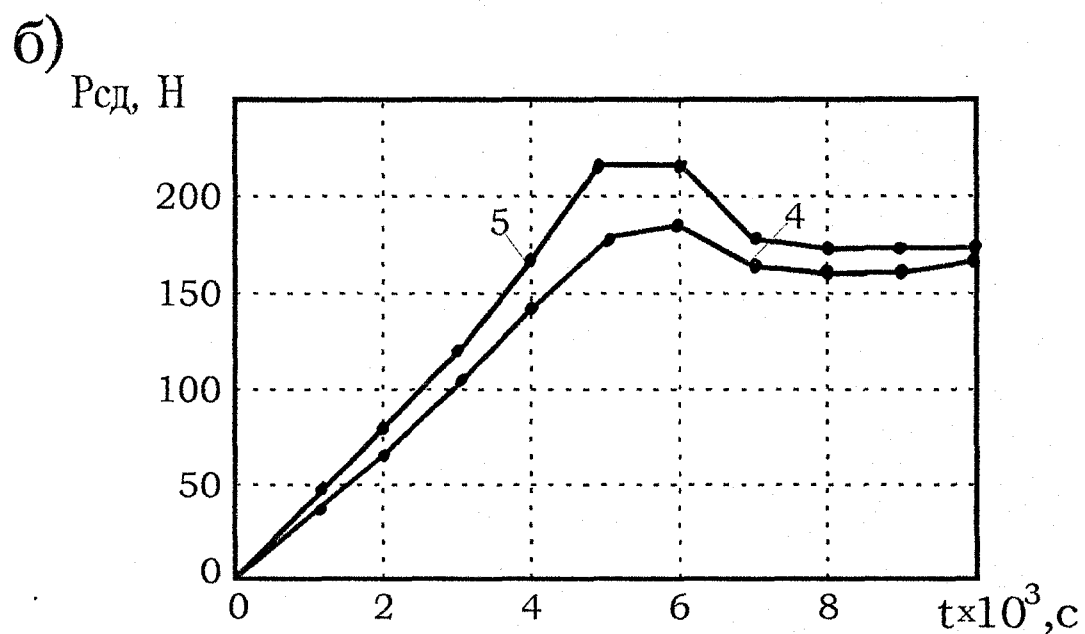
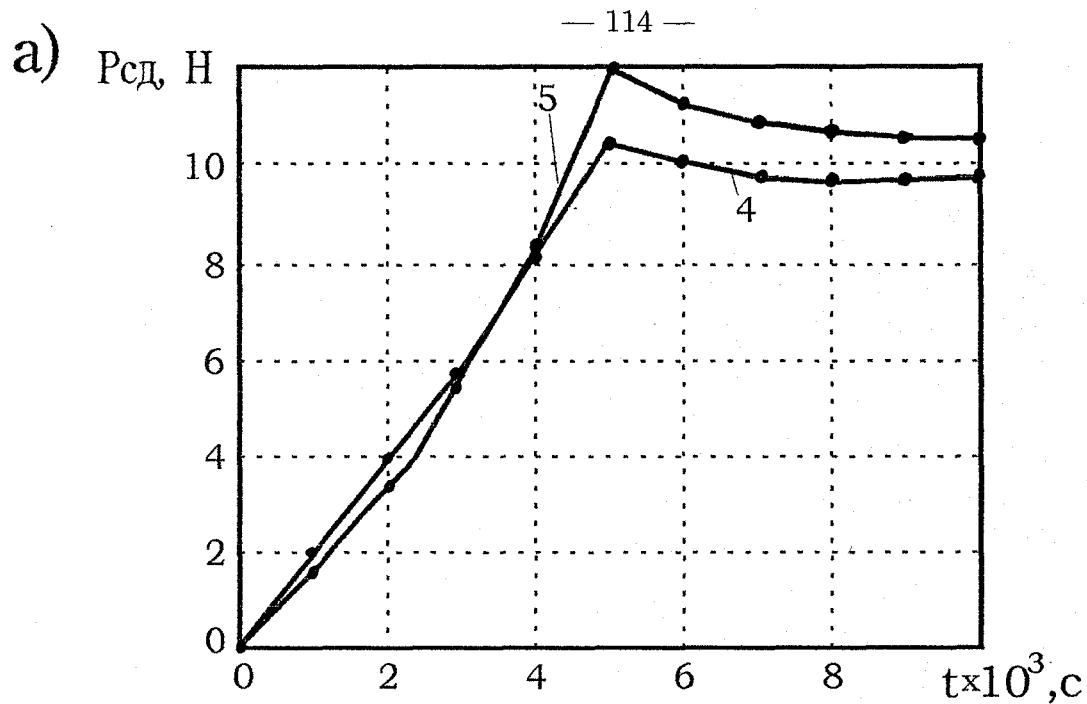


Рис. 3.21. Зависимость сдвигающей силы от времени для четвертого и пятого элементов для материалов с различными упруго-пластическими характеристиками: а) $E = 2.1 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 314$ МПа; б) $E = 1.2 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 15$ МПа

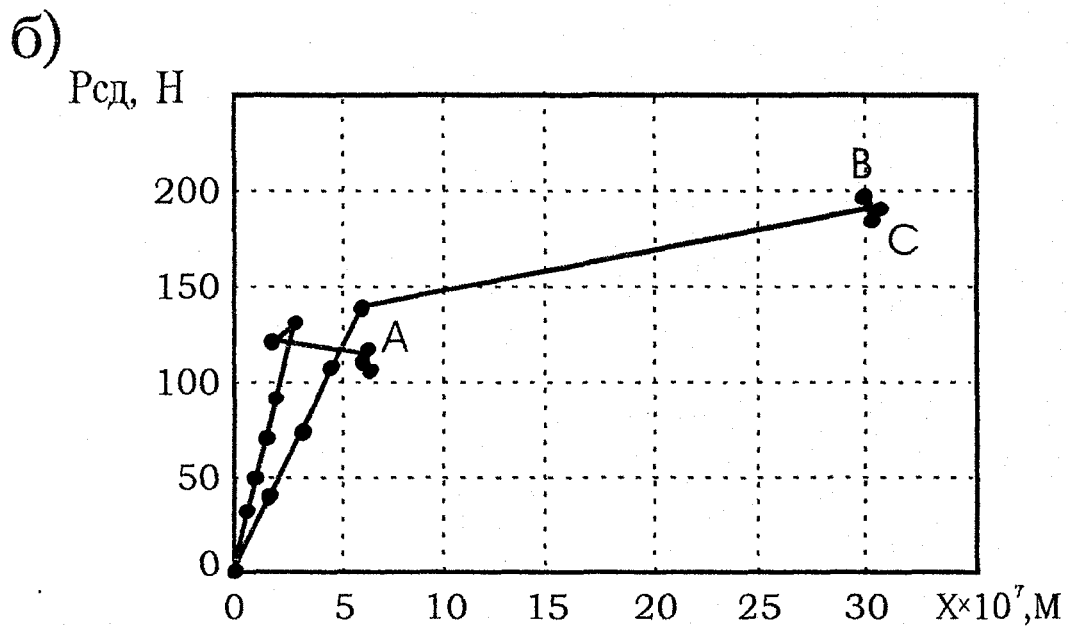
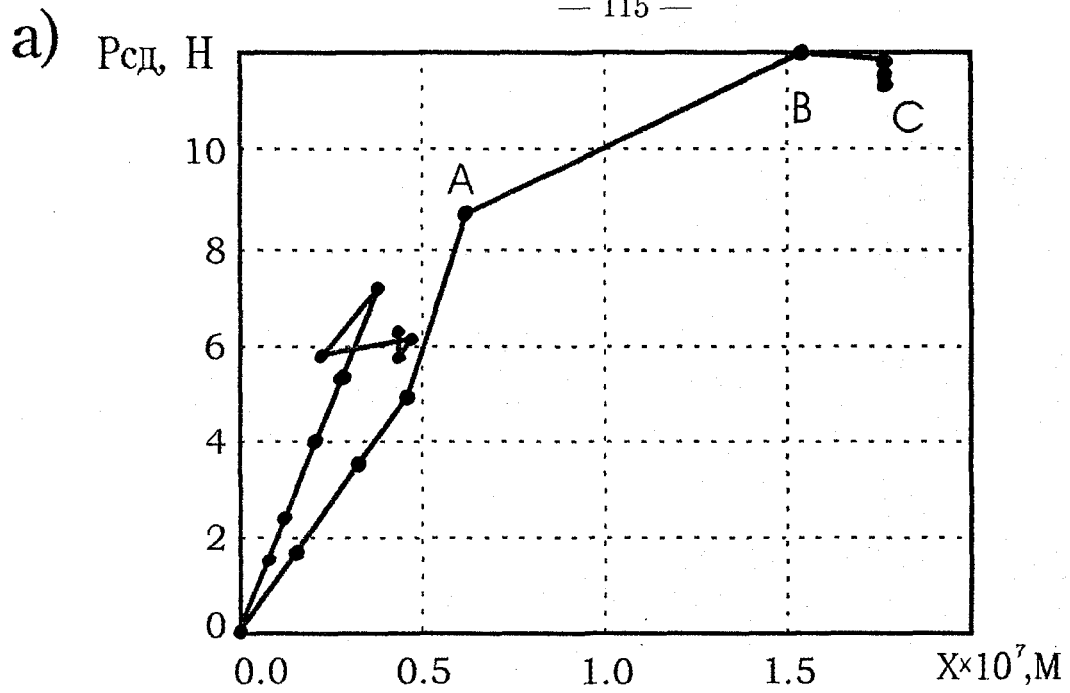


Рис. 3.22. Зависимость сдвигающей силы от деформации в четвертом и пятом элементах для материалов с различными упруго-пластическими характеристиками: а) $E = 2.1 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 314$ МПа; б) $E = 1.2 \times 10^5$ МПа, $\sigma_T = 15$ МПа

емого фрагмента как линейный упругий элемент, откликающийся на приложенную нагрузку в соответствии со своим коэффициентом жесткости. Тогда из рис. 3.22 видно, что последний упругий элемент (пятый) обладает наименьшим коэффициентом жесткости, и сразу становится понятным почему именно последний элемент раньше всех переходит в состояние пластической деформации.

Диаграмма напряжений (см. рис. 3.22) условно может быть разделена на три зоны. Зона **ОА** представляет собой зону упругости, то есть материал подчиняется закону Гука, и точка **А** соответствует пределу текучести. Дальнейшее прямое сопоставление участков диаграмм на рис. 3.22 с диаграммами, полученными из опытов на одноосное растяжение и сжатие, не столь однозначно. Согласно результатам стандартных испытаний, за зоной упругости следует зона развития пластической деформации, сопровождаемой упрочнением металла (здесь не принимается во внимание возможность образования площадки текучести, так этот эффект не характерен для стали). Если из пластического состояния произвести полную разгрузку, и затем вновь растягивать материал из упрочненного состояния, то растяжение материала исследуемой модели будет подчиняться закону Гука вплоть до той точки, из которой произошла разгрузка. Таким образом, условный предел текучести должен повысится по сравнению с начальным значением (точка **А**).

Действительно, на графике рис.3.22, б может быть выделен уча-

сток АВ, соответствующий зоне упрочнения. Однако, важное отличие от случая статических испытаний состоит в том, что длина участка АВ оказывается меньше. Для графика на рис. 3.22, а тангенс угла наклона касательной к кривой упрочнения (из-за малого количества точек кривая упрочнения на графике вырождается в прямую) больше, чем наклон прямой на участке упругой деформации, и, следовательно, после разгрузки останутся значительные остаточные напряжения. Нехарактерное для стадии упрочнения поведение материала связано с рассмотрением только одной выделенной части пластины. Здесь проявляется эффект Баушингера, который заключается в появлении деформационной анизотропии, обусловленной наличием остаточных напряжений в результате предварительной деформации.

Точка В на диаграмме соответствует наибольшей нагрузке, которая обычно предшествует разрушению пластины. Максимальное значение напряжения называют пределом прочности. Начиная с этого значения напряжения, деформация сосредотачивается в одном участке образца, в пятом элементе. В зоне ВС деформация происходит уже с уменьшением сдвигающей силы. Сжатие рассматриваемого фрагмента носит ярко выраженный местный характер, и этот участок кривой называется *зоной местной текучести*. Дальнейшая эволюция исследуемого фрагмента стружки представляет собой "обтекание" деформированной зоной участка

закрепления (шестого узла). Участок ВС качественно схож по поведению с аналогичным участком диаграммы для статических испытаний.

Общий вид диаграммы сжатия подтверждает, что действительно имеет место быстро изменяющаяся нагрузка, когда за время нагружения тела пластические деформации не успевают образоваться полностью. Во-первых, на это указывает малая протяженность участка АВ. Во-вторых — концентрация напряжений в пятом элементе: поскольку при быстром нагружении развитие пластических деформаций затруднено, доминирующим механизмом разрушения оказывается развитие трещин, и материал "обостренно воспринимает" местные повышенные напряжения.

Сложное напряженно-деформированное состояние стружки иллюстрируется также диаграммой сжатия для четвертого элемента, для которого имеют место ярко выраженные гистерезисные явления при больших значениях напряжений.

Дополнительную информацию о процессах в контактной зоне дает график зависимости сдвигающей силы от времени (см. рис. 3.21). На начальном этапе, когда происходит постепенное нарастание внешней нагрузки, наблюдается пропорциональное возрастание сдвигающей силы. При переходе в область пластических деформаций скорость роста внутренних напряжений может увеличиваться (рис. 3.21, а). Затем, после достижения максимума, на-

блюдается ярко выраженная релаксация напряжений.

Поскольку результаты исследований показывают, что при больших величинах нагружения материал реагирует на приложенное внешнее воздействие с запаздыванием, связанным с наличием диссипации, следовательно, модель должна включать вязкий элемент (элемент Ньютона) [18]

$$\sigma = b\dot{\epsilon},$$

где σ — нормальное напряжение; ϵ — линейная деформация; b — коэффициент вязкости.

С другой стороны, на достаточно продолжительном этапе процесса стружкообразования проявляются упругие свойства среды, которые описываются в реологии элементом Гука

$$\sigma = E\epsilon,$$

где E — упругая константа материала.

Пластические деформации вблизи области срыва адгезионных связей при контактном взаимодействии не успевают формироваться, поэтому нет необходимости включать пластичный элемент в реологическую модель.

Известно, что упруговязкие свойства материалов воспроизводятся в реологических моделях Кельвина-Фойхта и Максвелла [3, 75]. Первая из них представляет собой параллельное соединение элементов Гука и Ньютона и описывается уравнением

$$\sigma = E\epsilon + b\dot{\epsilon}. \quad (3.1)$$

Здесь отношение b/E является постоянной времени процессов деформирования (временем запаздывания). При $b/E \ll t$ модель ведет себя как упругое тело, а при $b/E \gg t$ — как вязкая жидкость.

Модель Максвелла представляет собой последовательное соединение элементов Гука и Ньютона. В момент приложения нагрузки в модели мгновенно возникает упругая деформация; поршень демпфера вязкого трения вначале неподвижен, а затем начинается его движение. Уравнение, описывающее эту модель, имеет вид

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/b, \quad (3.2)$$

где $t_p = b/E$ называется временем релаксации модели Максвелла. Если время релаксации мало по сравнению с временем действия силы, то тело ведет себя как идеально жидкое, а если время релаксации велико, то как идеально упругое.

Особый интерес представляют деформации вблизи контактного слоя в области срыва адгезионных связей, т.е. в пятом элементе. Однако, пятый элемент в значительной степени выделен среди остальных — в нем концентрируются напряжения, приводящие к его быстрому разрушению. Четвертый элемент более подходит для анализа характеристик приконтактного слоя, так как, с одной стороны, он расположен в непосредственной близости к области срыва адгезионных связей, а, с другой стороны, обнаруживает более гладкие зависимости, чем пятый элемент (подробное описание

методики имитационного моделирования представлено в п.4.2).

Критерием применимости той или иной модели служит малость влияния вязкости на динамику процесса контактного взаимодействия по сравнению с упругим откликом. Это условие выполняется, если применить модель Максвелла к пластичным металлам. При переходе к более хрупким металлам критерий перестает выполняться, и модель Максвелла не может адекватно описать динамику напряжений в образце. С другой стороны, анализируя модель Кельвина-Фойхта, можно предположить, что она неприменима для высокопластичных материалов, но адекватно описывает динамику контактных взаимодействий хрупких материалов.

В качестве реологической модели ниже использована модель Максвелла.

Расчет упругой константы E модели был проведен по данным графика зависимости сдвигающей силы от относительной деформации (рис. 3.22). Тангенс угла наклона касательной дает значение упругой константы для рассматриваемого элемента. Упругие деформации возникают на начальной стадии нагружения, когда внутренние напряжения еще не слишком велики. Для выбранных граничных условий продолжительность стадии упругих деформаций в четвертом элементе составляет приблизительно первые 0.004 с. Фактически, упругая константа материала определяется как коэффициент жесткости упругого элемента (четвертого

элемента). Параметры материала, а именно, модуль упругости EX и предел текучести σ_T , варьировались в широких пределах. Результаты расчета упругой константы представлены на графике (рис. 3.23). Установлено, что упругая константа материала E практически линейно зависит от модуля упругости материала и мало зависит от предела текучести. На основе построенного графика предложена простая эмпирическая зависимость для нахождения упругой константы

$$E = \frac{3}{4} \cdot EX. \quad (3.3)$$

Расчет коэффициента b более сложен. Записывая уравнение модели Максвелла (3.2), связывающее напряжение и деформацию, в конечно-разностной форме

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta \sigma}{E \Delta t} + \frac{\sigma}{b}, \quad (3.4)$$

получим для b следующее выражение

$$b = \frac{\sigma \Delta t}{\Delta \varepsilon - \Delta \sigma / E}. \quad (3.5)$$

Зная значения напряжений и деформаций на этапе статического нагружения во временном интервале 0.006...0.009 с, и, вычисляя соответствующие разности на каждом временном шаге, получаем набор значений b_i . Среднее арифметическое этих значений

$$b = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{n} \quad (3.6)$$

берется в качестве искомого коэффициента b . Важно отметить,

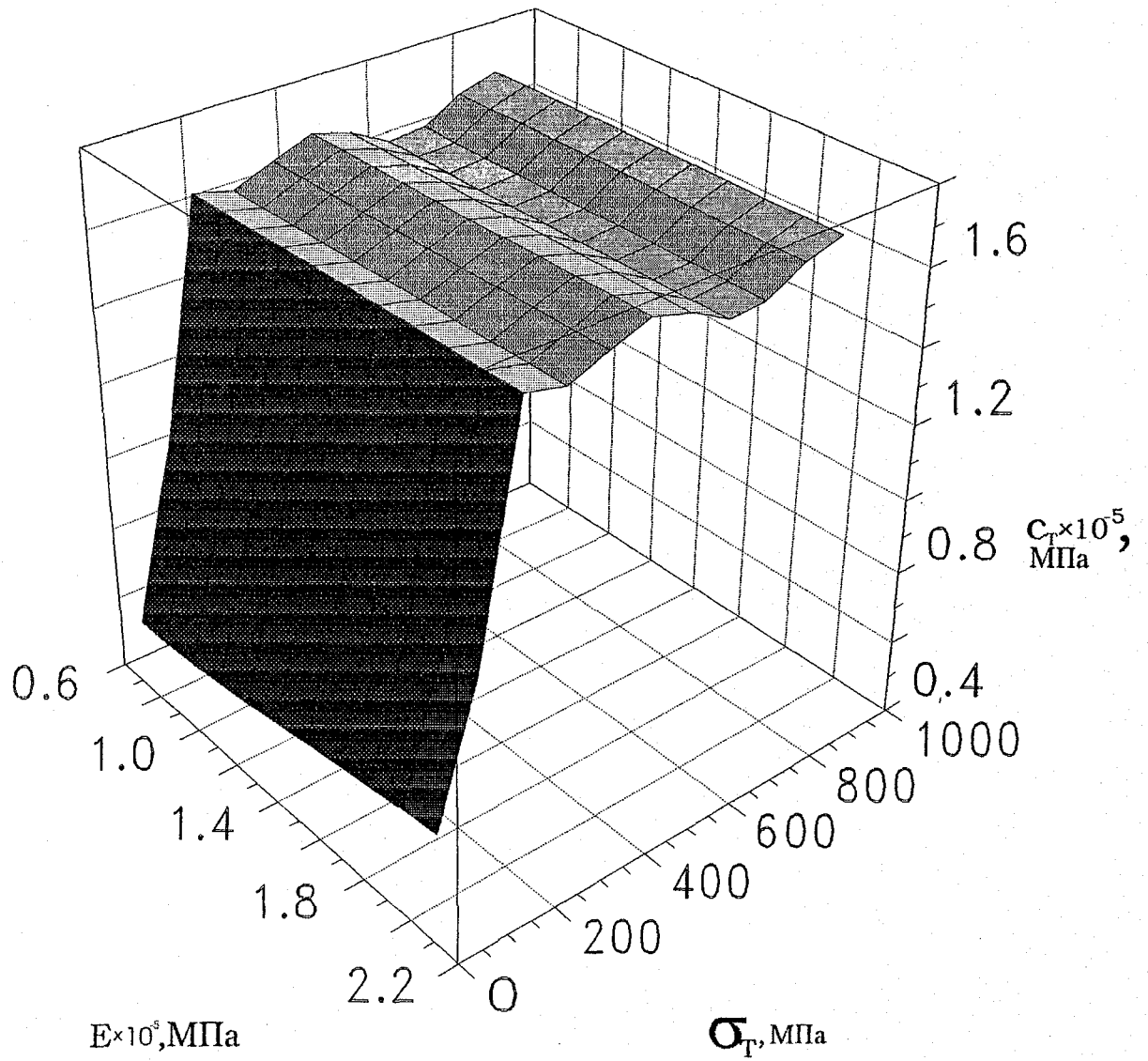


Рис. 3.23. Зависимость упругой характеристики стержня вблизи точки закрепления от модуля упругости и предела текучести материала

что рассчитанные значения напряжений и деформаций зависят от времени линейно, поэтому все значения b_i оказываются близкими.

Для коэффициента b при малых значениях предела текучести ($\sigma_T < 350$ МПа) имеет место монотонное возрастание b с ростом E . Оценивая время релаксации модели Максвелла, $t_p = b/E$, приходим к выводу, что оно на порядок больше характерных времен приложения нагрузки, и, следовательно, материал откликается на внешнее воздействие практически упруго (рис. 3.24).

При больших значениях предела текучести ($\sigma_T > 350$ МПа) зависимость $b(E, \sigma_T)$ приобретает осцилляционную форму. Время релаксации t_p модели Максвелла становится сравнимым с характерным временем приложения нагрузки. Возникает конкуренция упругих и вязких процессов в образце, и динамика отклика образца становится существенно сложнее, что проявляется в возникновении осцилляций на графике зависимости $b(E, \sigma_T)$. Численный анализ показывает, что для еще больших значений предела текучести ($\sigma_T > 450$ МПа) значения коэффициента b получаются отрицательными, что указывает на неприменимость модели Максвелла в этой области параметров.

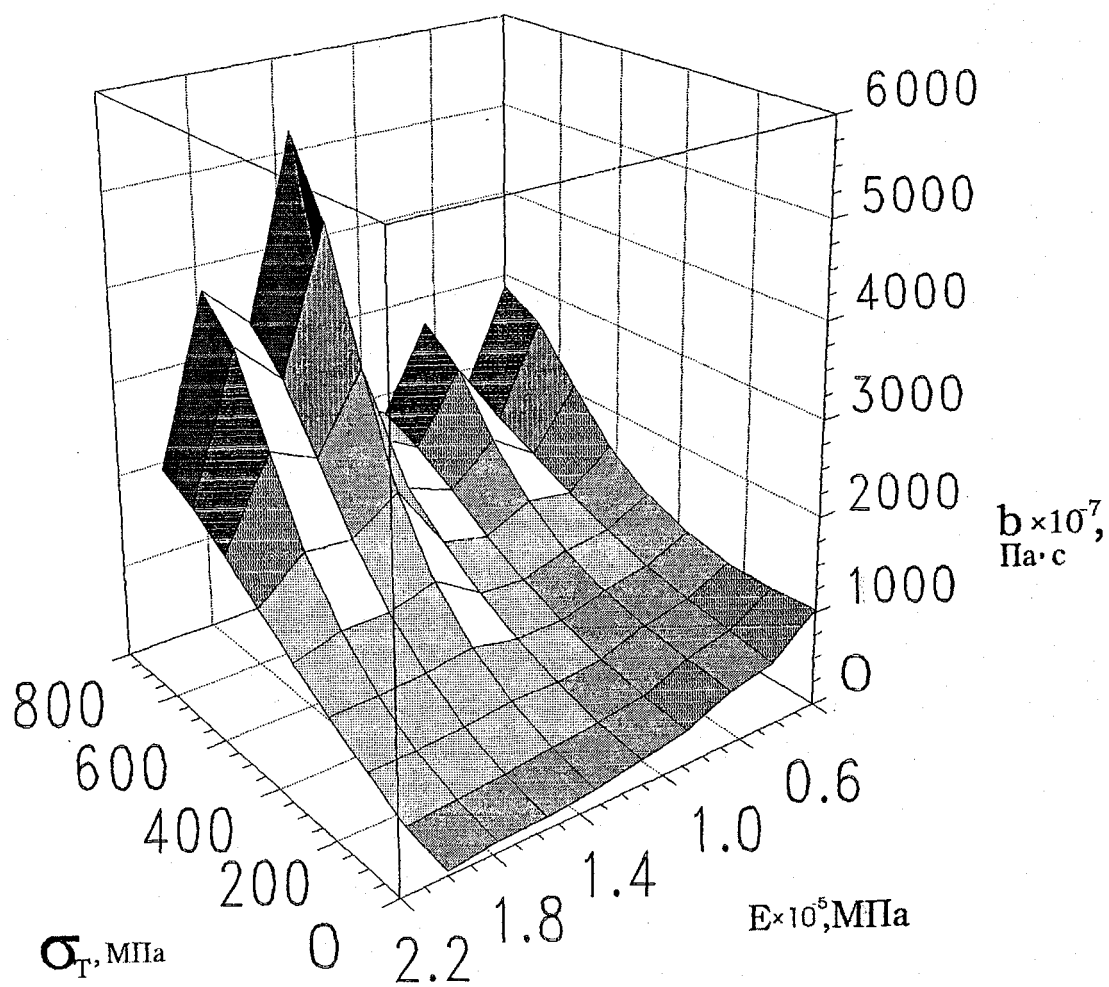


Рис. 3.24. Зависимость коэффициента b от модуля упругости и предела текучести материала

3.4 Моделирование напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности в результате динамического нагружения

3.4.1 Моделирование контактного взаимодействия сходящей стружки с задней поверхностью инструмента

В процессе стружкообразования под действием различных сил возникает напряженное поле, результатом которого являются пластические деформации. Энергия такого поля расходуется на пластическое деформирование и отделение от изделия слоя металла в виде стружки, а также на образование остаточного пластически деформированного слоя на обработанной поверхности некоторой толщины (глубины). В этом слое исходная кристаллическая структура металла претерпевает деформационное упрочнение, которое выражается в нарушении упорядоченного строения вещества, что сопровождается частичной потерей связей между отдельными атомами. Поскольку кристаллическая решетка приобретает запасенную энергию, то для разрушения такой поверхности необходимо затратить уже меньшую энергию. Следовательно, за счет пластической остаточной деформации обработанная поверхность теряет часть работоспособности. С учетом того, что на поверхности атомные связи разрушены (верхняя часть металла удалена), можно предположить, что деформационное упрочнение при реза-

нии оказывает серьезное влияние на физико-механические характеристики обрабатываемого изделия. Правильная оценка деформационного упрочнения, возможности аналитического и опытного анализа, целенаправленное его регулирование является важной научно-прикладной задачей.

При определении свойств поверхностного слоя изделия в процессе механической обработки необходимо учитывать, что они формируются в результате динамического взаимодействия элементов технологической системы и в значительной степени определяются особенностями этого взаимодействия. Состояние поверхностного слоя обрабатываемой заготовки необходимо рассматривать как внешнее проявление интегративных свойств технологической системы, которое на информационном уровне может быть описано совокупностью характеристик качества — микрогеометрии, напряженно-деформированного и фазоструктурного состояния [17].

Под обеспечением качества поверхностного слоя с точки зрения формализации задачи понимается создание в пространстве параметров (характеристик) качества некоторой области, в которой удовлетворяются наперед заданные критерии качества, совокупность которых определяется некоторыми нормативами и требованиями. Судить о фактическом качестве поверхностного слоя изделия можно по результатам количественной оценки его состояния путем непосредственного измерения или имитационного модели-

рования. Важным обстоятельством является то, что поверхностный слой изделия формируется в результате динамического взаимодействия подсистем технологической системы в процессе резания. Следовательно, прогнозирование качества поверхностного слоя возможно на основе оценки динамики технологической системы с использованием разработанных методов механики, теории резания и управления, прикладной математики.

Силы и контактные напряжения на задней поверхности режущего инструмента исследовали А.Н.Еремин, Н.Н.Зорев, В.В.Мелихов, М.Ф.Полетика, А.М.Розенберг и др. Использовались различные методы: измерение общих сил резания и выделение сил на задней поверхности специальными методиками совместно с определенным размером фаски износа; использование специальных динамометрических разрезных резцов с косой щелью и т.п. Исходя из результатов этих исследований, поверхность упрощается до трех участков: радиусного OR , плоской фаски износа RK , притертой к поверхности резания без заднего угла, и плоского участка задней поверхности под заточенным задним углом на длине, определяемой высотой Δ (рис. 3.25). На фаске износа распределение контактных напряжений можно принять равномерным. Это подтверждается экспериментальными данными [83, 101]. Далее при моделировании контактного взаимодействия задней поверхности инструмента и обработанного изделия рассматривается только зона плоской фаски

износа RK . Это объясняется тем, что погрешность такого упрочнения не превышает трех процентов.

Рассмотрим задачу прогнозирования напряженно-деформированного состояния в металле поверхностного слоя изделия в результате лезвийной обработки на основе имитационного моделирования путем решения нелинейных задач термоупругопластичности методом конечных элементов [18, 20]. Рассмотрим общий подход к решению этой задачи на простом примере — решении плоской задачи упругопластичности в условиях динамического нагружения.

Невозможность аналитического описания пространственно-временной эволюции напряжений связана со сложным видом нагружения модели, с заданием граничных условий и существенной нестационарностью отклика материала на приложенную нагрузку. Такая задача может быть решена численными методами и поэтому воспользуемся программным комплексом COSMOS/M. Здесь целью является исследование динамики напряжений и, в частности, исследование остаточных напряжений при нестационарном нагружении исследуемой модели со стороны задней поверхности инструмента.

Задача формулируется следующим образом. Разделим физическую область прямоугольной формы на 15 элементов (рис. 3.26). К верхней части модели приложим переменную по времени силу P . Зависимость величины этой силы от времени приведена на

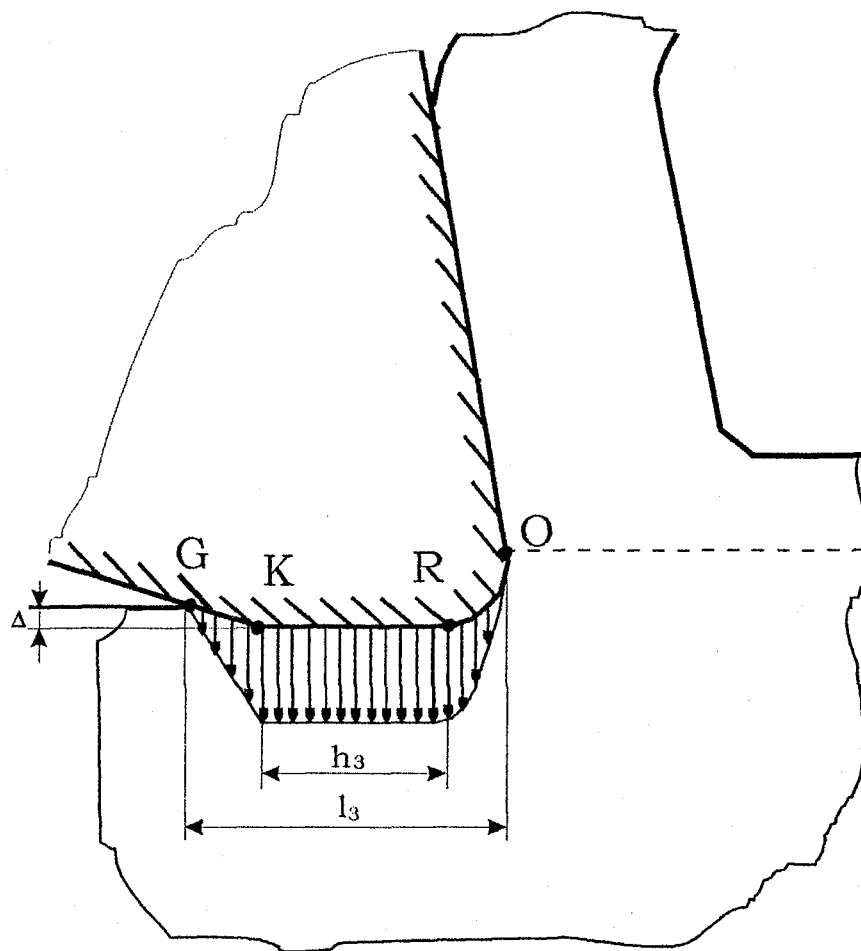


Рис. 3.25. Распределение контактных напряжений в зоне стружкообразования, где l_3 — длина контактной площадки; h_3 — ширина изношенной контактной площадки по задней поверхности; Δ — высота поверхностного слоя обработанной детали после упругого восстановления

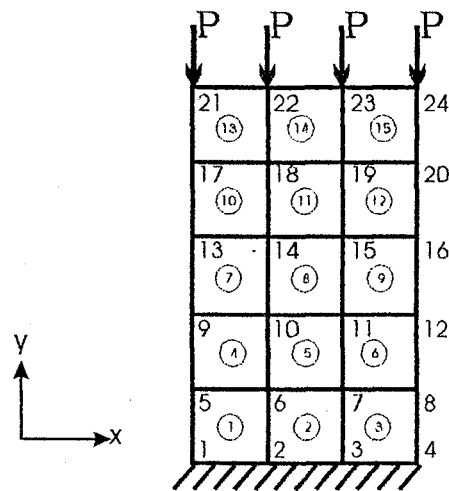


Рис. 3.26. Вид модели с указанием нумерации узлов, элементов (выделены кружками), граничных условий и точек приложения силы P

рис. 3.27. На узлы 1 - 4 наложены связи, полностью исключающие их перемещение во всех направлениях. В каждом из узлов 21, 22, 23, и 24 приложена сила P . На исследуемую модель действует периодическая нагрузка с достаточно большим пиковым значением, что обуславливает возникновение пластических деформаций. Через промежуток времени $t = 6 \cdot 10^{-3}$ с нагрузка снимается. Програмный комплекс позволяет находить все компоненты напряжений и деформаций во все моменты времени. Особый интерес представляет распределение напряжений в глубину модели сразу же после снятия нагрузки.

В процессе исследования были проведены следующие численные эксперименты.

- 1) Варьировалось пиковое значение прилагаемой силы P .

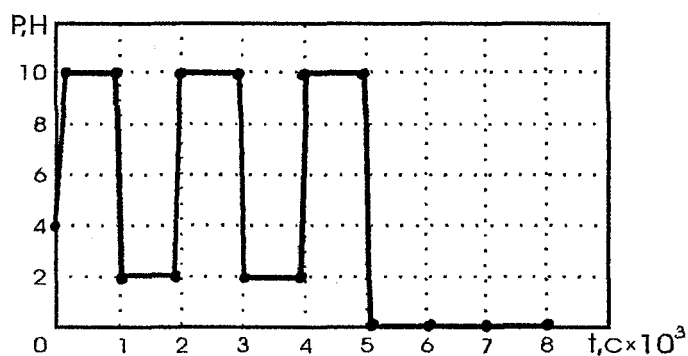


Рис. 3.27. Временная диаграмма нагружения модели

2) Поведение материала исследовалось при различных периодах осцилляции силы P .

По результатам расчетов были построены кривые, характеризующие распределение остаточных напряжений вглубь материала. Для наглядного представления результатов расчета по горизонтальной оси отложены не сами напряжения, а их натуральные логарифмы. Переход к этому масштабу представляется удобным, так как напряжения в крайних точках различаются почти на три порядка. На рис.3.28 и 3.29 приведены результаты обработки данных численного расчета с применением графического пакета PSIPLOT.

Оценивая влияние амплитуды на величину остаточных напряжений, приходим к выводу, что с ее увеличением растет и величина этих напряжений. Наибольшие напряжения возникают на поверхности материала, в месте непосредственного приложения силы. По мере удаления от поверхности, величины напряжений уменьшаются, в середине исследуемой модели знак напряжения меняется на противоположный и, по мере приближения к нижнему закре-

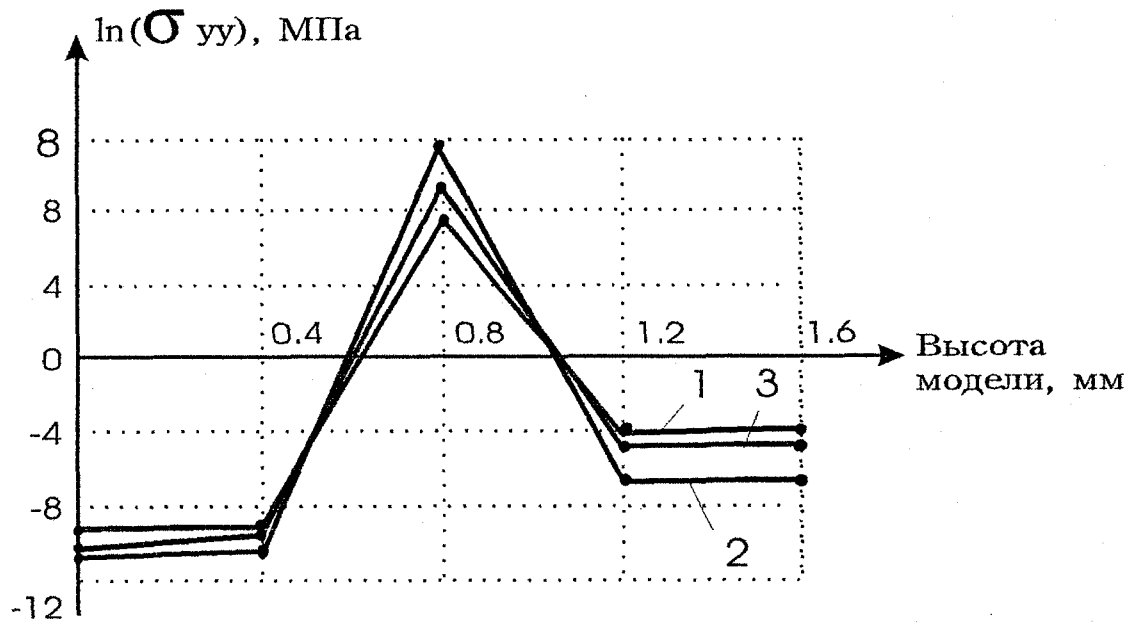


Рис. 3.28. Зависимость остаточных напряжений от амплитуды приложенной силы: 1 — величина амплитуды 10 Н, 2 — 12 Н, и 3 — 14 Н

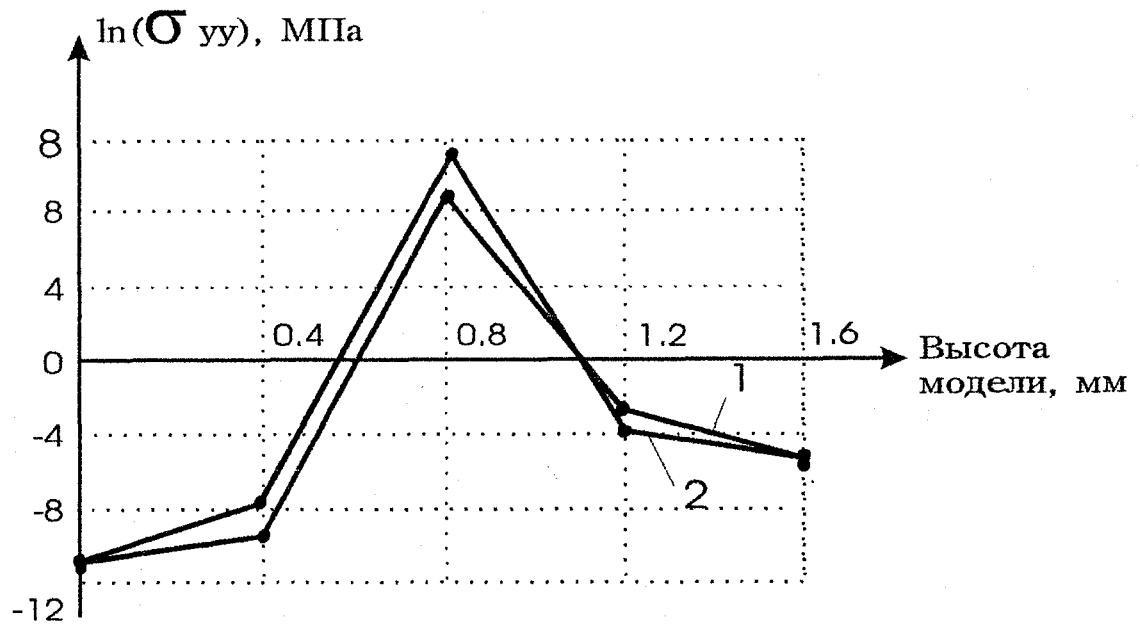


Рис. 3.29. Зависимость остаточных напряжений от величины периода осцилляции приложенной силы: 1 — период $T = 0.002$ с и 2 — $T = 0.004$ с

пленному торцу пластины, напряжения вновь меняют знак. Таким образом, вблизи точек закрепления материал испытывает сжатие, величины остаточных напряжений уменьшаются примерно на три порядка.

Увеличение периода осцилляции силы также оказывает влияние на качество напряженно-деформированного состояния материала. И хотя поведение кривой (как и в случае с изменением амплитуды) принципиально не изменяется, уровень остаточных напряжений растет с ростом периода.

Выше численно исследовано напряженно-деформированное состояние, в которое переходит материал после приложения к нему кратковременной переменной (периодической) нагрузки. Результаты расчета показывают, что остаточные напряжения относительно малы в нижних слоях исследуемой модели вблизи точек закрепления и быстро нарастают при переходе к верхним слоям, достигая максимума в точках приложения силы.

3.4.2 Моделирование контактного взаимодействия с обработанным изделием задней поверхности инструмента в случае подвижной нагрузки

Проведенные выше расчеты касались физико-механических процессов, происходящих в поверхностном слое изделия при стационарном нагружении. Ниже будет рассмотрена эволюция напря-

женно-деформированного состояния поверхностного слоя металла, находящегося под действием подвижной нагрузки. Численные расчеты проводятся для заготовок различной геометрической формы и сопровождаются их сравнительным анализом. Металл представляется в виде двумерного элемента сплошной среды, к верхней грани которого прикладывается переменная в пространстве и времени сила. Нагрузка моделирует режущий элемент и представляет собой нормальную составляющую силы резания, передаваемую через фаску износа. При таком подходе во всем объеме учитываются вязкие, упругие и пластические свойства металла. Оценка напряженно-деформированного состояния осуществляется после снятия нагрузки.

Оценка напряженно-деформированного состояния поверхности в процессе резания проводится для четырех базовых моделей изделия, схематически представленных на рис.3.30, а-г. Предполагается, что модели имеют форму пластин и нагрузка прикладывается по верхнему ребру равномерно по всей толщине. Таким образом, задача сводится к двумерной (плоской) модели. Исследуемые модели на рис. 3.30, б, в схожи по своей геометрической форме и различаются радиусами закругления верхнего ребра, что позволяет проследить динамику напряжений в зависимости от кривизны поверхности. Выбранные модели имеют достаточно общий характер в том смысле, что на их основе возможно прогнозировать эволю-

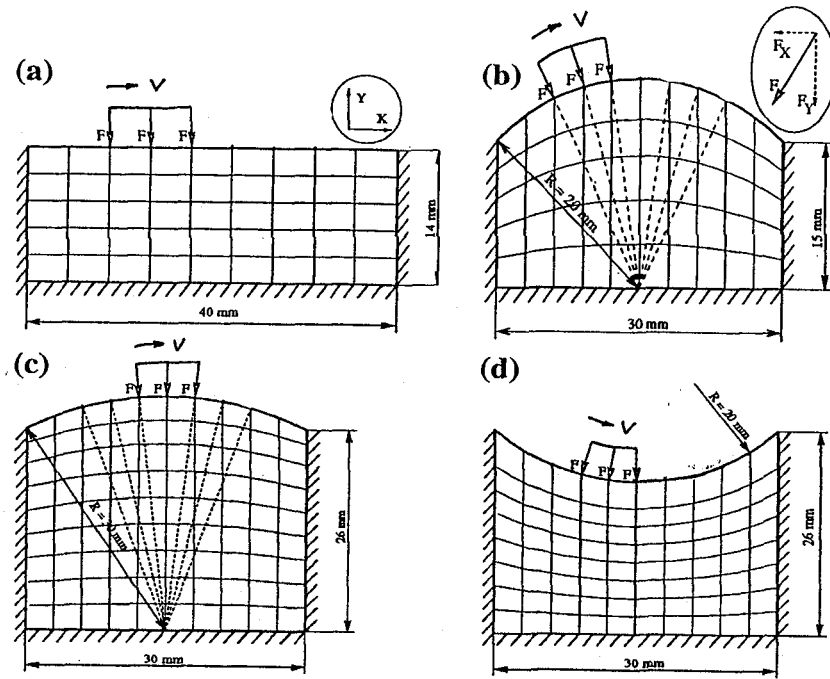


Рис. 3.30. Схематическое изображение исследуемых моделей. F — приложенная нагрузка

цию напряженно-деформированного состояния произвольной сложной поверхности, любой участок которой может быть представлен в виде последовательности впадин и выпуклостей определенного радиуса.

Основная идея метода конечных элементов состоит в разбиении исследуемого тела на элементарные ячейки, называемые элементами, например, элементами прямоугольной формы, как это показано на рис. 3.30. При выборе геометрической формы элементов и их количества обычно руководствуются симметричными свойствами системы и величиной допустимой погрешности. В решаемых задачах число элементов варьировалось от 507 до 957. С трех сторон образец жестко закреплен (показано штриховкой на рис. 3.30), что-

бы исключить перемещение граничных узлов во всех направлениях. Формально такое закрепление соответствует фиксации изделия в обрабатывающем станке в процессе механической обработки.

Все представленные модели имеют модуль упругости 2.1×10^5 МПа, предел текучести $\sigma_T = 314$ МПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. На верхнюю поверхность пластин действует изменяющаяся во времени сила F , имитирующая действие резца. Общее время процесса для всех расчетов выбиралось равным $t = 0.0422$ с так, что при скорости резания $v = 0.5$ м/с он проходил расстояние, равное $l = 21$ мм. Поясним динамику процесса на примере модели, представленной на рис. 3.30, а. Плоскость пластины разбивается на 13 элементов (14 узлов) по вертикали и на 39 элементов (соответственно, 40 узлов) по горизонтали. Узлы в самом верхнем слое (у поверхности) пронумерованы так, что первый узел совпадает с правым верхним углом пластины и, соответственно, 40-й узел — с левым верхним углом. В начальный момент времени "резец" взаимодействует с девятым узлом с силой F , перпендикулярной поверхности пластины, возникающей за время $\tau_0 = 0.0002$ с, величиной $F = 0 \dots 530$ Н. Затем в течение $\tau_1 = 0.0016$ с величина нагрузки остается постоянной и равной 530 Н, и в течение последующего интервала $\tau_2 = 0.0002$ с сила снова убывает $F = 530 \dots 0$ Н. Таким образом, график зависимости нагрузки от времени для девятого узла имеет вид трапеции, см. рис. 3.31. Аналогичное воздействие испытывает ка-

ждый последующий узел ("движение" происходит справа налево), но со сдвигом во времени, равным $\Delta\tau = 0.002$ с. Через $T = 0.0422$ с "резец" достигает 30-го узла и процесс завершается.

Расчет для остальных моделей на рис. 3.30,а-г проводится аналогичным образом с единственным отличием, что сила $\mathbf{F}$ теперь имеет как горизонтальную, F_x , так и вертикальную, F_y , составляющие. Значение каждой из них может быть легко рассчитано по формулам

$$F_x = F \sin(\alpha); \quad (3.7)$$

$$F_y = F \cos(\alpha), \quad (3.8)$$

где α — угол наклона поверхности к горизонту (то есть к оси OX) в точке приложения силы. Для всех задач модуль силы $\mathbf{F}$ остается неизменным.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 530 \text{ Н}. \quad (3.9)$$

Основной характеристикой напряженного состояния образца является его тензор напряжений, составляющие которого изменяются как в пространстве, так и во времени. И действительно, используемый программный комплекс позволяет получить полную пространственно-временную картину процесса, то есть найти значение любого элемента тензора напряжений в любой момент времени. Однако, руководствуясь тем, что в инженерной практике важно знать состояние поверхности после ее обработки, ограничимся анализом пространственного распределения нормальных и

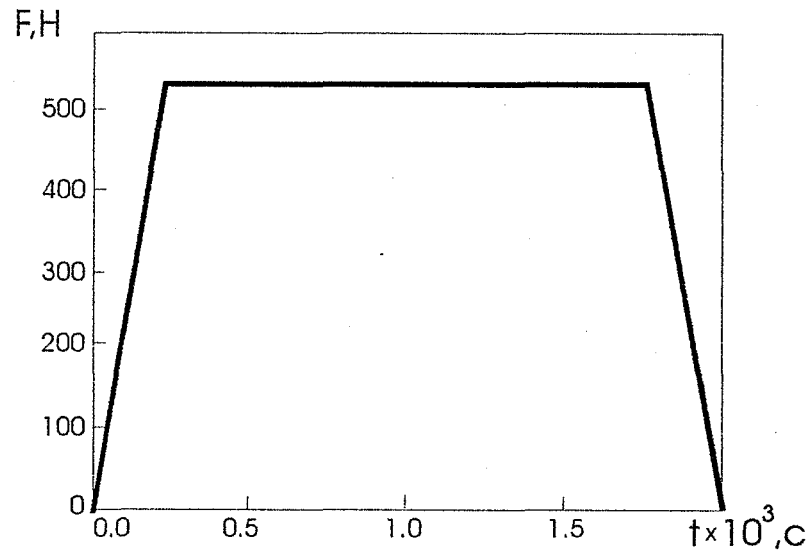


Рис. 3.31. Зависимость прилагаемой нагрузки от времени для модели на рис.3.30 (а)

касательных напряжений в приповерхностном слое пластин непосредственно после снятия нагрузки, то есть при $t = 0.0422$ с.

На рис. 3.32 изображено распределение нормальных напряжений в поверхностных слоях пластин в зависимости от расстояния от центра. Остановимся сначала на обсуждении общих черт, характерных для всех четырех рассмотренных моделей. В области приложения внешней нагрузки тело испытывает пластическую деформацию сжатия, причем, значения напряжений вдоль оси Y приблизительно на 10% превосходят предел текучести материала. Вне области действия нагрузки величина напряжений падает значительно ниже предела текучести. Иначе ведут себя напряжения вдоль оси X , значения которых велики как внутри области действия внешних сил, так и снаружи. Однако, эти напряжения не

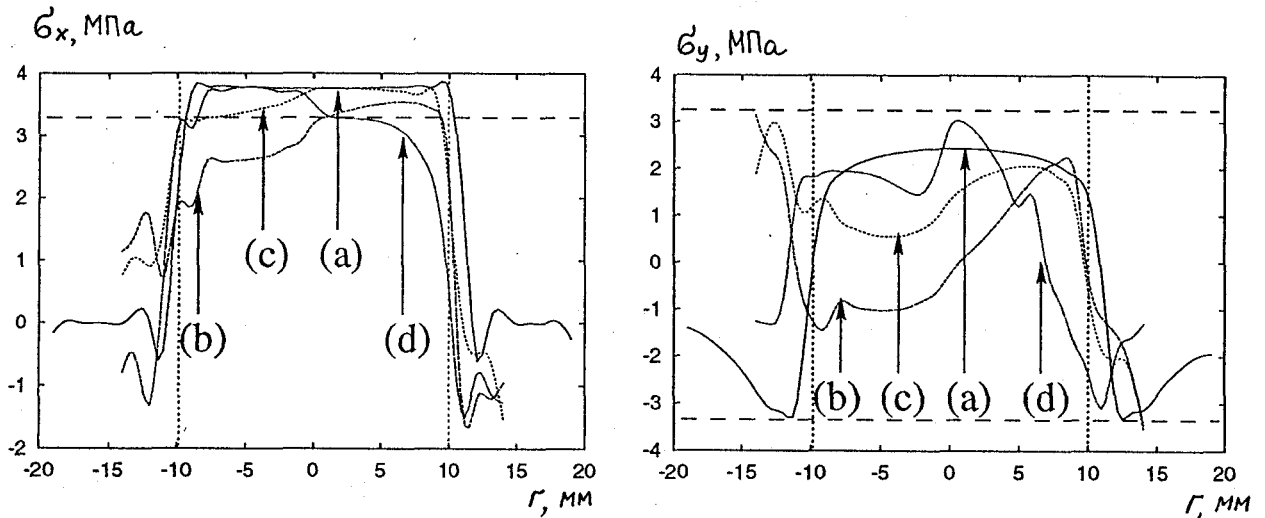


Рис. 3.32. Графики зависимости нормальных напряжений в поверхностном слое от расстояния r для моделей на рис.3.30: а) напряжение σ_x в зависимости от расстояния от центра пластины; б) напряжение σ_y в зависимости от расстояния от центра пластины

превосходят по величине предел текучести материала.

Графики напряжений для образца (рис. 3.30, а) обнаруживают достаточно точную *симметрию* относительно положения центра пластины, отражающие симметричные свойства, заложенные в самой постановке задачи. Напряжения вдоль оси Y принимают приблизительно одинаковые по величине значения внутри зоны приложения сил и практически отсутствуют вне этой зоны. Напряжения вдоль оси X сжатия в центральной области пластины резко сменяются еще большими напряжениями растяжения по ее краям.

Модели на рис. 3.30, б, в близки по своей геометрической форме и поэтому их напряженно-деформированные состояния также сходны по структуре. Как и следовало ожидать, пластина на рис.

3.30, в имеет бóльший радиус закругления верхнего ребра и кривые напряжения для нее и для прямоугольной пластины более близки друг к другу, чем для модели на рис. 3.30, б. Наиболее радикальное отличие от случая прямоугольной пластины состоит в том, что кривые напряжений *антисимметричны* относительно центра пластин, то есть увеличение напряжений сжатия с одной стороны пластины соответствует аналогичному их уменьшению с противоположной стороны от центра. Причем, области максимально быстрого изменения обеих компонент напряжений сосредоточены, в основном, в правых половинах пластин. Отличие от случая прямоугольной пластины находит свое объяснение в способе приложения нагрузки. Сила прикладывается нормально к поверхности так, что возникает горизонтальная составляющая, постоянно направленная к центру пластины, которая отсутствует в прямоугольной геометрии. Еще одна интересная особенность распределения напряжений по материалу пластины состоит в том, что зона наименьших напряжений вдоль оси X совпадает с областью приложения нагрузки слева от центра (для расстояний $L = [-10, 0]$ мм).

Модель с вогнутой верхней поверхностью откликается на приложенную нагрузку приблизительно так же, как и пластина прямоугольной формы, отличаясь небольшим пространственным сдвигом влево и более неоднородным распределением напряжений. Характерно, что наибольшие градиенты напряжений возникают в

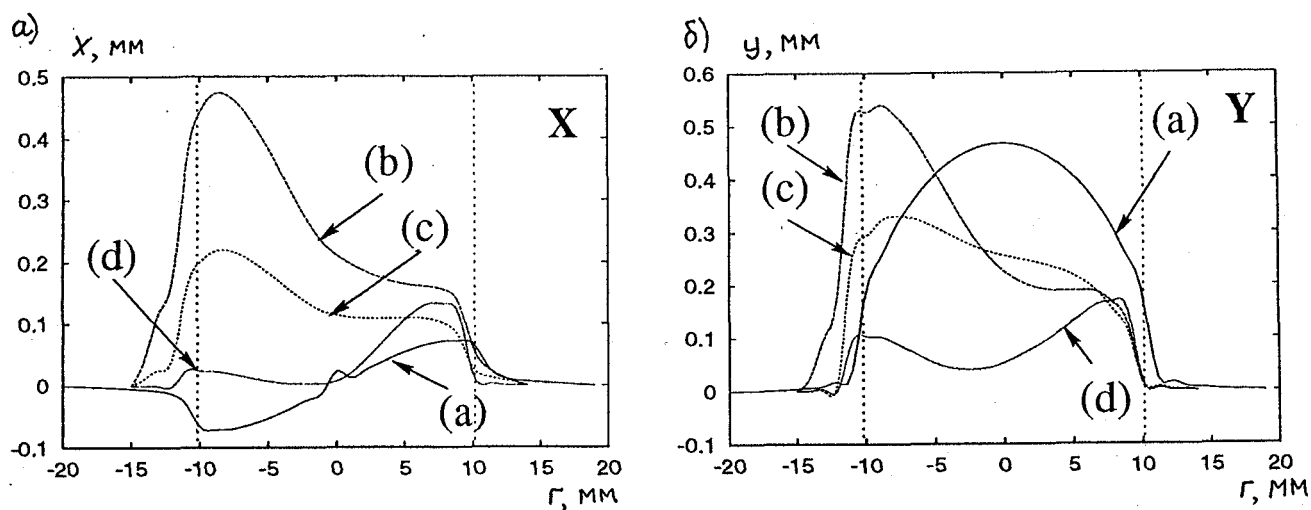


Рис. 3.33. Зависимость деформации в поверхностном слое от расстояния r для моделей на рис.3.30 (буквенное обозначение кривой соответствует обозначению модели): а) деформации вдоль оси X в зависимости от расстояния от центра пластины; б) деформация вдоль оси Y в зависимости от расстояния от центра пластины

правой половине пластины, обнаруживая этим некоторое сходство с моделями, имеющими выпуклую поверхность.

На рис.3.33 показаны графики деформации. Наименьшие деформации вдоль оси X испытывает пластина прямоугольной формы. Это объясняется тем, что деформации вдоль оси X не возникают непосредственно под действием нагрузки, которая направлена строго вниз вдоль оси Y , а появляются как результат пространственного перераспределения напряжений внутри пластины. Деформации распределяются антисимметрично относительно середины пластины и достигают минимальной величины в центре. Деформации вдоль оси X велики для моделей выпуклой формы, и величина деформации растет с уменьшением радиуса кривизны.

Характерно, что левые половины пластин деформируются значительно сильнее, чем правые. Для вогнутой поверхности — наоборот, деформации выражены слабо в левой половине пластины и достигают максимальных значений — в правой половине.

Сравнивая правый и левый графики на рис. 3.33, видно, что для поверхностей с ненулевым радиусом кривизны распределения деформаций вдоль осей X и Y близки как по своему характеру, так и по величине. Для пластины прямоугольной формы деформации вдоль оси Y симметричны относительно центра пластины, где они достигают максимальной величины и плавно уменьшаются при приближении к краям.

Рассмотренный выше подход позволяет поставить и решить задачу моделирования технологических остаточных напряжений в любой точке обрабатываемого изделия с получением зависимости

$$\sigma = \sigma(x, y, z, h), \quad (3.10)$$

где x, y, z — координаты точки на поверхности изделия; h — координата внутри изделия по нормали к рассматриваемой точке.

Выполненное компьютерное моделирование показало работоспособность рассмотренного подхода по определению технологических остаточных напряжений. Однако, доведение его до промышленной реализации требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

3.5 Результаты и выводы по главе

1. Для решения задач моделирования напряженно-деформированного состояния металла обрабатываемого изделия с учетом его упругих, вязких и пластических свойств в процессе стружкообразования предложены методы компьютерного моделирования с помощью конечноэлементного интегрированного комплекса COSMOS/M. Предложен ряд модельных подходов и продемонстрирована эффективность комплекса в применении к задачам резания металлов.
2. Осуществлено построение дискретной модели, имитирующей зону активной пластической деформации материала в процессе стружкообразования на основе обобщенной реологической модели.
3. Предложена и обоснована эквивалентная математическая модель, позволяющая описать процесс деформации стружки, сходящей с передней поверхности инструмента, в стадии адгезионного схватывания. Показаны области применения моделей Максвелла и Фойхта для материалов с различными пластическими свойствами.
4. Разработаны методики определения упруго-диссипативных коэффициентов реологической модели, основанные на статистической обработке данных компьютерных расчетов с помощью

программного комплекса COSMOS/M.

5. Осуществлено моделирование напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности в результате динамического нагружения, показавшее работоспособность предложенного подхода для определения технологических остаточных напряжений в металле поверхностного слоя обработанного изделия.

Глава 4

Экспериментальные исследования реологических процессов в зоне стружкообразования

4.1 Динамическое моделирование технологической системы механической обработки с учетом рео- логических процессов в зоне стружкообразова- ния

Построение динамической модели технологической системы механической обработки позволяет решать задачи, связанные с определением динамических характеристик данной системы. При этом, динамическая модель технологической системы должна удовлетворять следующим требованиям:

— с необходимой полнотой отображать существенные свойства системы;

— модель должна быть приведена к наиболее простому виду в выбранном классе (по числу обобщенных координат и структуре).

Динамическая модель технологической системы механической обработки в общем случае является *многомерной дискретно-непрерывной*, иерархически организованной и целенаправленно функционирующей совокупностью значительного числа информационно связанных и взаимодействующих элементов [54, 69, 109]. Объединенные в блоки элементы рассматриваются как подсистемы сложной системы. К числу таких подсистем относятся "станок", "приспособление", "инструмент", "заготовка". В зависимости от компоновочных особенностей станка, вида используемых приспособлений и инструмента, свойств заготовки, дискретно-непрерывное описание может относиться к любой из подсистем.

Технологическая система характеризуется сложной структурой связи и многообразием информации при взаимодействии подсистем, что не позволяет создать работоспособную глобальную модель технологической системы механической обработки. Особенности технологической системы механической обработки однолезвийным инструментом являются ее автономность, замкнутость и нелинейность. В результате взаимодействия инструмента с заготовкой происходит формообразование обрабатываемого изделия. В свою очередь, взаимодействие заготовки с несущей системой станка осуществляется через станочное приспособление и инстру-

мент. Динамическое замыкание технологической системы происходит посредством нелинейного оператора резания, реализуемого при взаимодействии подсистем "заготовка" и "инструмент". Что касается автономности технологической системы механической обработки даже при однолезвийной обработке, то она является условной — в ряде случаев необходимо учитывать взаимодействие внешних источников через фундамент с несущей системой станка.

Технологическая система является автоколебательной, а, следовательно, нелинейной. Однако, целый ряд практически важных задач динамики технологической системы допустимо решать в линейной (линеаризованной) постановке.

Как правило, автоколебательный режим является недопустимым, не входящим в число рабочих режимов, особенно при чистовой обработке, поскольку он сопровождается ухудшением качества обрабатываемой поверхности. Таким образом, становится очевидна актуальность проблемы, связанной с решением одной из основных задач динамического анализа — определением границы областей устойчивости системы в многомерном пространстве параметров [14, 17, 54, 109].

Необходимость перехода от модели высокого уровня технологической системы к гамме упрощенных моделей, построенных по иерархическому принципу, обусловлена следующими соображениями:

ями. С одной стороны, структурная сложность модели и большое число обобщенных координат при дискретизации системы на основе МКЭ при современных возможностях вычислительной техники не являются серьезным основанием для перехода к упрощенной модели. Тем не менее, данные методы нельзя использовать для многовариантных расчетов, связанных с обоснованием режимов, оптимальных относительно выбранных критериев, поскольку накопление погрешностей может привести к искажению картины самого процесса. С другой стороны, при условии идентичности амплитудно-фазово-частотной характеристики глобальная модель технологической системы механической обработки может быть отображена эквивалентной упрощенной динамической моделью в ограниченном частотном диапазоне.

В настоящее время наиболее обоснованными представлениями о механизме возбуждения колебаний являются предложения В.А.Кудинова [54] и М.Е.Эльясберга [109]. Модель, рассмотренная М.Е.Эльясбергом (рис.4.1), более полно отображает свойства процесса резания и трения и широко апробирована в практике динамических расчетов технологических систем механической обработки. Данная модель базируется на предположении о запаздывании силы резания P по отношению к перемещению x инструмента в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, и силы трения Q относительно силы резания. Динамические процессы,

происходящие в технологической системе механической обработки на основе рассмотрения двухконтурной модели, отображаются системой линеаризованных дифференциальных уравнений вида [12, 62, 109]:

$$\left. \begin{aligned} T_{x_2}^2 \ddot{x} + T_{x_1} \dot{x} + x &= Q; \\ T_{y_2}^2 \ddot{y} + T_{y_1} \dot{y} + y &= P; \\ T_P \dot{P} + P &= -k_x x - T_{ky_1} \dot{y}; \\ T_Q \dot{Q} + Q &= P - T_{kx} \dot{x} - T_{ky_2} \dot{y}, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где $T_{x_2} = 1/\omega_x$; $\omega_x = (c_x/m_x)^{1/2}$ — круговая парциальная частота контура x ; $T_{y_2} = 1/\omega_y$; $\omega_y = (c_y/m_y)^{1/2}$ — круговая парциальная частота контура y ; m_x, m_y — приведенные инерционные параметры контуров x и y ; c_x, c_y — коэффициенты жесткости в контурах x и y ; $T_{x_1} = b_x/c_x$; b_x, b_y — коэффициенты линеаризованной демпфирующей силы в контурах x и y ; T_P, T_Q — постоянные времени запаздывания для силы резания и силы трения соответственно; k_x — коэффициент передачи замкнутой системы; $T_{ky_1}, T_{ky_2}, T_{kx}$ — постоянные времени колебания скорости резания.

Приведенная система с двумя степенями свободы справедлива при точении резцом с углом в плане $\varphi = 0$ (работа отрезным резцом при обтачивании вала). Точение резцом с углом в плане $\varphi \neq 0$ при подаче s и глубине слоя t_c требует рассмотрения колебаний по направлениям x_1 и x_2 (см. рис.4.2).

Надо отметить, что упрощенная модель (4.1) — рис.4.1 по М.Е.Эль-

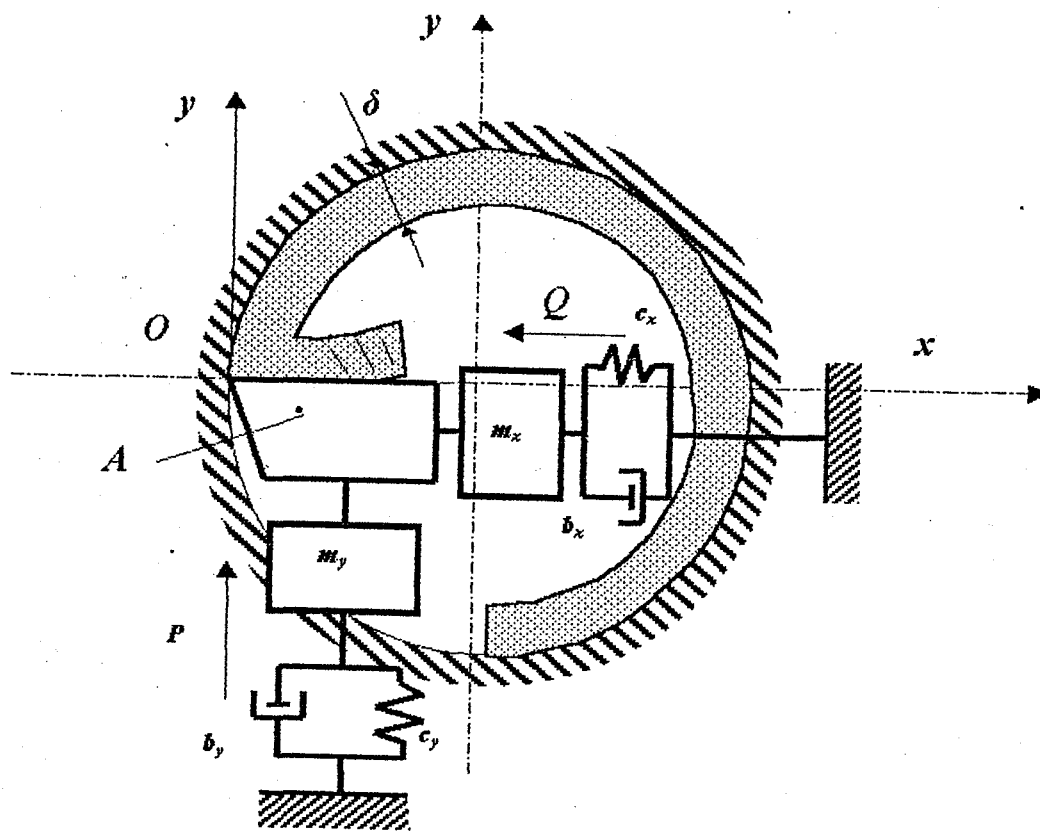


Рис. 4.1. Модель динамической системы механической обработки резанием [109]. δ — толщина срезаемого слоя; P — сила резания; Q — сила трения

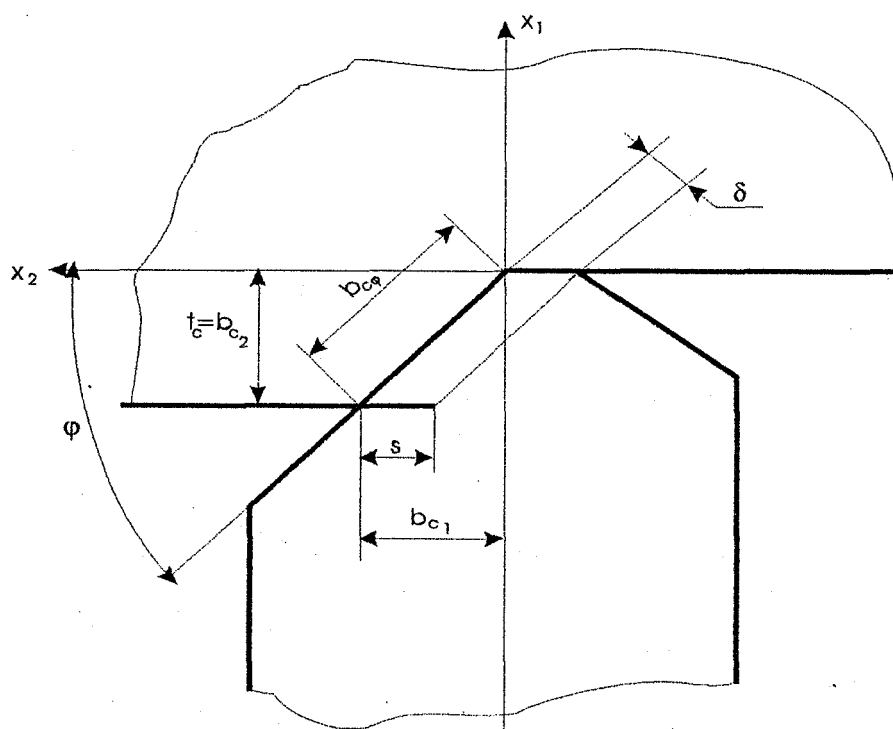


Рис. 4.2. Схема точения резцом с углом в плане $\varphi > 0^\circ$

ясбергу является базовой для построения обобщенной динамической модели технологической системы с учетом реологических процессов в зоне стружкообразования.

Необходимо отметить, что при учете фазовых переключений в зоне стружкообразования система дифференциальных уравнений является нелинейной кусочно-линейного типа. Эффективные методы анализа динамических процессов в таких системах неавтономного и автономного типов разработана профессором В.Л.Вейцем [23, 28, 32].

Применительно к автономным системам дифференциальных уравнений кусочно-линейного типа, численно-аналитические методы построения границы области устойчивости, периода и уровня ав-

токолебаний рассмотрены в работах [28, 32]. В Лаборатории "Автоматизации и моделирования технологических систем" ПИМаш разработано соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение, которое использовано при динамических расчетах.

При построении динамической модели технологической системы механической обработки с учетом реологических процессов в зоне стружкообразования необходимо учитывать процесс первичной пластической деформации в зоне срезаемого слоя и процесс вторичной деформации и трения при движении стружки по передней поверхности режущего инструмента. Связь между подсистемами осуществляется через процесс стружкообразования, представленный обобщенной реологической моделью. Здесь среда Ишлинского отображает процесс первичной деформации металла срезаемого слоя, а среда Фойхта отражает процесс деформации и трения сходящей стружки.

В общем виде система дифференциальных уравнений, отображающая реологические процессы, происходящие в технологической системе механической обработки, может быть записана следующим образом [31, 62]:

$$\left. \begin{aligned} m_x \ddot{x} + b_x \dot{x} + c_x x + \beta_{3\tau}(\dot{x} - \dot{u}) + c_{3\tau}(x - u) &= Q; \\ m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y + \beta_{3n}(\dot{y} - \dot{w}) + c_{3n}(y - w) &= P; \\ m_u \ddot{u} + b_u \dot{u} + c_u u + \beta_{3\tau}(\dot{u} - \dot{x}) + c_{3\tau}(u - x) &= -Q; \\ m_w \ddot{w} + b_w \dot{w} + c_w w + \beta_{3n}(\dot{w} - \dot{y}) + c_{3n}(w - y) &= -P; \\ (T_P + T_{P_1})\dot{P} + P &= -(k_x - k_{P_x})(x - u) \\ &- [T_{ky_1} - k_{P_y}(T_P + T_{P_2})](\dot{y} - \dot{w}) + k_{P_y}(y - w) \\ &- [k_x T_{P_1} - k_{P_x}(T_P + T_{P_2})](\dot{x} - \dot{u}); \\ T_Q \dot{Q} + Q &= P - T_{k_x}(\dot{x} - \dot{u}) - T_{ky_2}(\dot{y} - \dot{w}), \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где m_x, m_y, m_u, m_w — коэффициенты инерции; b_x, b_y, b_u, b_w — параметры рассеяния энергии; c_x, c_y, c_u, c_w — коэффициенты жесткости; $c_{3\tau}, c_{3n}, \beta_{3\tau}, \beta_{3n}$ — квазиупругие и диссипативные коэффициенты реологической модели зоны стружкообразования в касательном и нормальном направлениях; $k_{P_x}, k_{P_y}, T_{P_1}, T_{P_2}$ — коэффициенты передачи и постоянные времени, учитывающие реологические особенности процесса стружкообразования; $T_{k_x}, T_{ky_1}, T_{ky_2}$ — постоянные времени демпфирования; k_x — коэффициент усиления в контуре x системы.

Постоянные времени T_{P_1}, T_{P_2} являются функциями квазиупругих и диссипативных коэффициентов $c_2, c_3, \beta_2, \beta_3$ реологической модели. Они определяются на основе выражений (2.61), (2.62). Сами квазиупругие и диссипативные коэффициенты реологической модели определяются с помощью специально разработанных алго-

ритмов, которые представлены в п. 4.2. Эти коэффициенты являются аргументами для определения констант a_1 — a_6 в выражениях (2.23) — (2.28) обобщенной реологической модели (2.22).

Приведенная выше модель технологической системы механической обработки (4.2) достаточно универсальна, поскольку, принимая частные значения параметров, из нее может быть получена большая часть всех известных на данный момент моделей: Д.В.Василькова, В.А.Кудинова, М.Е.Эльясберга. Четырехконтурная динамическая модель ТСМОР (4.2), получаемая в ограниченном частотном диапазоне при исследовании технологической системы, представлена на рис.4.3.

По сравнению с традиционным рассмотрением условий равновесия при взаимодействии режущего клина с обрабатываемым материалом, реализован новый подход [12, 19, 22, 31]. Он состоит в следующем. Молекулярные процессы, происходящие в зоне стружкообразования, представлены в виде реологических моделей, связывающих подсистемы заготовки и режущего инструмента. В модельном представлении рассматриваемые процессы отображаются обобщенной упруго-вязкой средой в двух взаимоортогональных направлениях. В работах [12, 17] динамика контактного взаимодействия в процессе резания при динамическом моделировании рассмотрена на основе кусочно-линейной аппроксимации. При этом, как последовательность состояний, моделируется две фазы: сколь-

жения и схватывания. В каждой из указанных фаз моделируются условия упругого ($\sigma < \sigma_{пл}$) и пластического взаимодействий ($\sigma \geq \sigma_{пл}$). В результате формируется две фазы. Реология взаимодействия в каждой из указанной фаз описывается на основе обобщенного реологического уравнения (2.22) с введением элементов упрощения, рассмотренных в п. 2.2. — 2.3. На основании изложенного можно записать реологические уравнения для каждой из рассматриваемых фаз:

1. Уравнение 1 (фаза скольжения, $\sigma < \sigma_{пл}$)

$$c_1 \cdot \varepsilon = \sigma. \quad (4.3)$$

2. Уравнение 2 (фаза скольжения, $\sigma \geq \sigma_{пл}$)

$$\frac{c_1 \beta_2}{c_1 + c_2} \cdot \dot{\varepsilon} + \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \cdot \varepsilon = \frac{\beta_2}{c_1 + c_2} \cdot \dot{\sigma} + \sigma + \frac{c_1}{c_1 + c_2} \cdot \sigma_{пл}. \quad (4.4)$$

3. Уравнение 3 (фаза схватывания, $\sigma < \sigma_{пл}$)

$$\frac{c_1 \beta_3}{c_1 + c_3} \cdot \dot{\varepsilon} + \frac{c_1 c_3}{c_1 + c_3} \cdot \varepsilon = \frac{\beta_3}{c_1 + c_3} \cdot \dot{\sigma} + \sigma. \quad (4.5)$$

4. Уравнение 4 (фаза схватывания, $\sigma \geq \sigma_{пл}$)

$$\begin{aligned} & \frac{c_1 \beta_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \ddot{\varepsilon} + \frac{c_1 c_3 \beta_2 + c_1 c_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \dot{\varepsilon} + \\ & \frac{c_1 c_2 c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \varepsilon = \\ & \frac{\beta_2 \beta_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \ddot{\sigma} + \frac{c_1 \beta_2 + c_1 \beta_3 + c_2 \beta_3 + c_3 \beta_2}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \dot{\sigma} + \sigma - \\ & \frac{c_1 c_2 + c_1 c_3}{c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3} \cdot \sigma_{пл}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

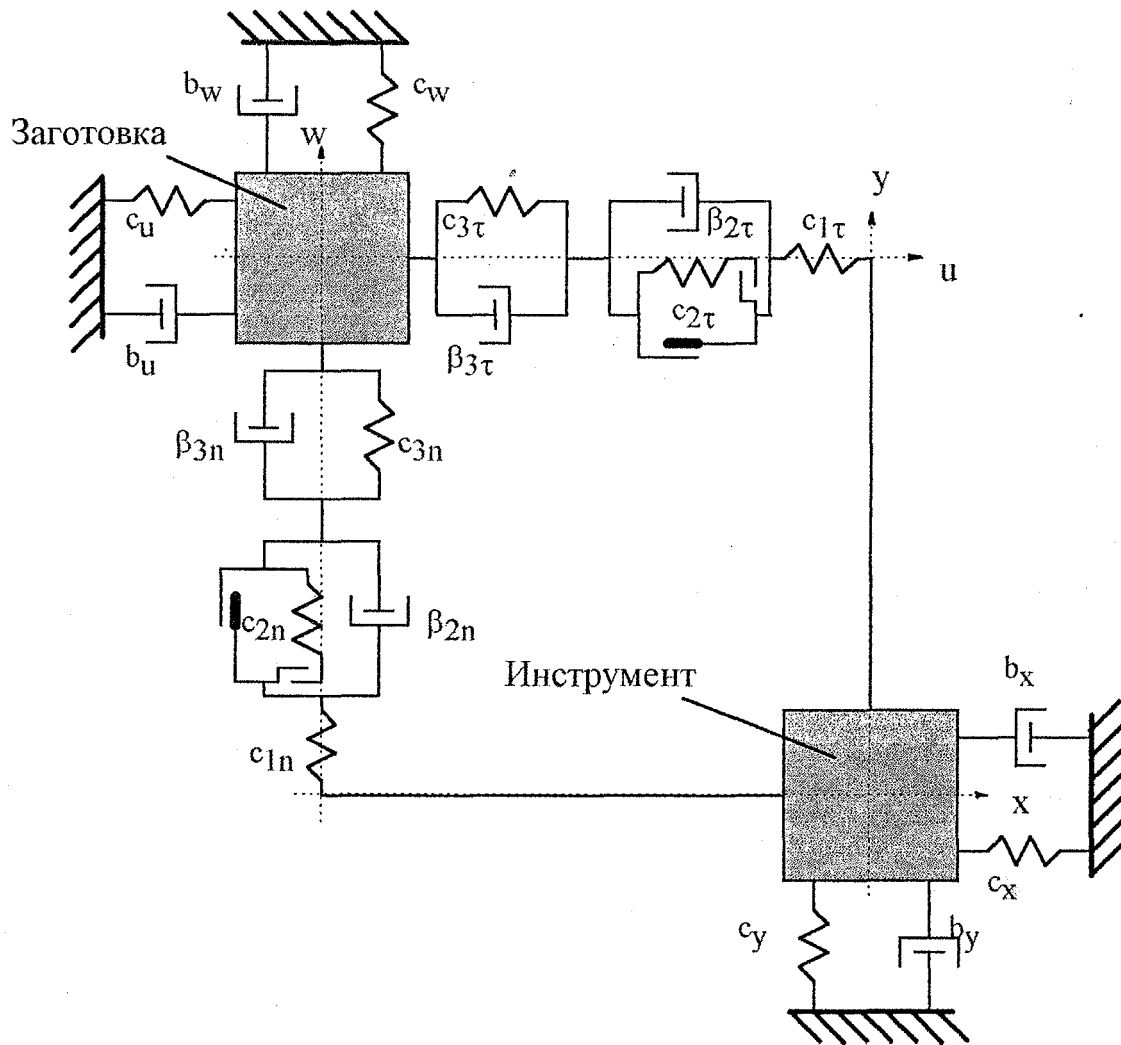


Рис. 4.3. Четырехконтурная динамическая модель ТЧМОР, где $c_\tau, c_n, \beta_\tau, \beta_n$ — квазиупругие и диссипативные коэффициенты в касательном и нормальном направлениях зоны стружкообразования.

Для удобства математических преобразований целесообразно систему дифференциальных уравнений (4.2) рассмотреть в векторно-матричном виде в пространстве переменных состояний.

Используя метод, разработанный В.Л.Вейцем, систему уравнений (4.2) можно привести к каноническому виду с кусочно-постоянными коэффициентами и (10×1) -вектором переменных состояния q со следующими компонентами:

$$\begin{aligned} q_1 &= x, & q_2 &= y, & q_3 &= u, & q_4 &= w, \\ q_5 &= \dot{x}, & q_6 &= \dot{y}, & q_7 &= \dot{u}, & q_8 &= \dot{w}, \\ q_9 &= P, & q_{10} &= Q. \end{aligned}$$

В векторно-матричной форме данную систему можно записать следующим образом:

$$T \cdot \dot{q} + N(q) \cdot q = 0, \quad (4.7)$$

где $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ — $(n \times 1)$ - вектор-функция переменных состояния; $T = \text{diag}[t_1, t_2, \dots, t_n]$ — диагональная матрица постоянных времени размера $(n \times n)$; $N(q)$ — матрица размера $(n \times n)$; n — размерность модели, в рассматриваемой модели $n = 10$.

Система уравнений (4.7) является системой дифференциальных уравнений кусочно-линейного вида. Переключение фаз осуществляется функциями переключения, учитывающими соотношения (1.3), (1.4) и синхронные изменения элементов матриц T , T' , N и N' .

1. Фаза скольжения ($\sigma < \sigma_{пл}$)

$$T' \cdot \dot{q} + N'(q) \cdot q = 0. \quad (4.8)$$

2. Фаза скольжения ($\sigma \geq \sigma_{пл}$)

$$T \cdot \dot{q} + N'(q) \cdot q = 0. \quad (4.9)$$

3. Фаза схватывания ($\sigma < \sigma_{пл}$)

$$T' \cdot \dot{q} + N(q) \cdot q = 0. \quad (4.10)$$

4. Фаза схватывания ($\sigma \geq \sigma_{пл}$)

$$T \cdot \dot{q} + N(q) \cdot q = 0. \quad (4.11)$$

На основе системы уравнений (4.2) возможно решение задачи устойчивости и динамического качества технологической системы механической обработки, что является основой для разработки направлений повышения эффективности лезвийной механической обработки. На основе системы уравнений (4.8) — (4.11) можно осуществить имитационное моделирование при широком варьировании параметров технологической системы и реологических характеристик в зоне стружкообразования.

4.2 Алгоритмы определения реологических характеристик при моделировании процесса резания

Алгоритм 1. Определение квазиупругих и диссипативных ха-

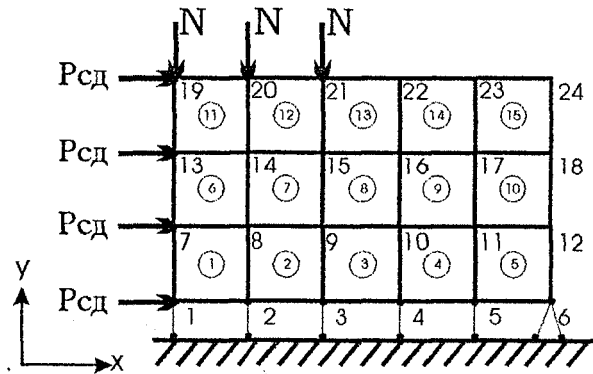


Рис. 4.4. Схематичное изображение фрагмента стружки с указанием нумерации узлов и элементов (обведено кружком) и областей приложения сил $P_{сд}$ и N

рактических характеристик деформируемого материала стружки.

1. Взаимодействие инструмента со стружкой схематично представляется следующим образом. Выделяется фрагмент стружки, например, прямоугольной формы (рис.4.4), осуществляющий контактное взаимодействие с передней поверхностью режущего инструмента. В одной из конкретных реализаций фрагмент разделяется на 15 конечных элементов прямоугольной формы.

2. К торцовой поверхности (левой) приложена переменная во времени сила $P_{сд}$, распределенная между узлами 1, 7, 13, 19. К узлам 19, 20, 21 прикладывается равномерно распределенная сила N . Временные диаграммы нагружения сил $P_{сд}$ и N приведены на рис.3.19.

3. На узлы 1 – 6 накладываются связи, которые исключают смещение в вертикальном направлении. На узел 6 накладывается также связь в горизонтальном направлении.

4. Динамику упругопластических деформаций стружки рас-

смаатриваем численно с применением пакета COSMOS/M, в основе которого лежит использование метода конечных элементов [20]. Как следует из контекста сформулированной задачи, на фрагмент действуют значительные по величине нагрузки, при которых возникают деформации, значительно искажающие геометрию конструкции. В этой ситуации линейная теория перестает быть справедливой, и следует применить нелинейный анализ, при котором на каждом последующем шаге решения задачи расчет напряжений и деформаций производится уже для деформированной конструкции, вид которой определен на предыдущем шаге.

5. По полученным данным строятся следующие диаграммы:

— диаграмма зависимости деформаций первого-пятого элементов как функция времени для двух пар значений модуля упругости E и предела текучести σ_T (рис.3.20, а, б);

— диаграмма зависимости сдвигающей силы, действующей на четвертый и пятый элементы, от времени (рис.3.21, а, б);

— диаграмма зависимости сдвигающей силы, действующей на четвертый и пятый элементы, от перемещения (рис.3.22, а, б).

6. Диаграмма напряжений (рис.3.22) может быть разделена на три зоны. Зона ОА представляет собой зону упругости Точка В на диаграмме соответствует наибольшей нагрузке, которая обычно предшествует разрушению. Дальнейшая эволюция исследуемого фрагмента стружки представляет собой "обтекание" деформиро-

ванной зоной участка закрепления (шестого узла). Участок ВС качественно схож по поведению с аналогичным участком диаграммы для статических испытаний.

7. Общий вид диаграммы (рис.3.22) подтверждает, что при быстром нагружении имеет место интенсивное развитие трещин и пластические деформации не успевают образоваться полностью. На это указывает малая длина участка АВ и высокая концентрация напряжений в пятом элементе.

8. Аппроксимация сил $P_{сд}$ и N выражениями, моделирующими принятую реологическую модель

$$\begin{aligned} P_{сд} &= c_{\tau}x_7 + b_{\tau}\dot{x}_7; \\ N &= c_n y_7 + b_n \dot{y}_7, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где x_7, y_7 — деформации в узле 7 фрагмента стружки.

9. Проведение имитационного моделирования при широком варьировании модуля упругости и предела текучести с целью получения упруго-диссипативных характеристик исследуемого фрагмента

$$\begin{aligned} c_{\tau} &= f_1(E, \sigma_T); & b_{\tau} &= f_2(E, \sigma_T); \\ c_n &= f_3(E, \sigma_T); & b_n &= f_4(E, \sigma_T). \end{aligned} \quad (4.13)$$

На рис.4.5 представлены графические отображения зависимостей (4.13).

Алгоритм 2. Определение квазиупругих и диссипативных характеристик в зоне пластической деформации в процессе стружкообразования.

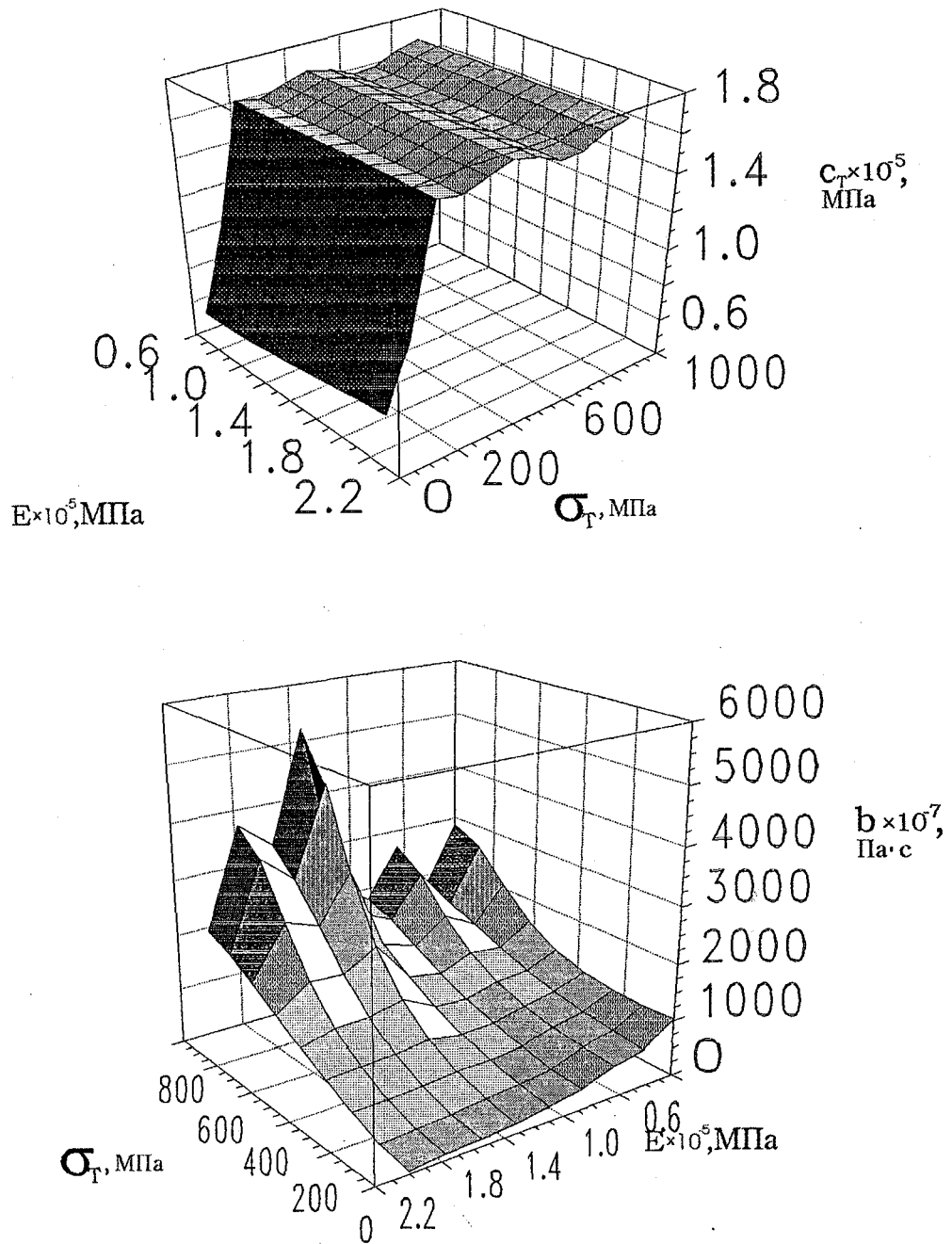


Рис. 4.5. Зависимость упруго-диссипативных характеристик от модуля упругости и предела текучести: а) c_T, c_n ; б) b_T, b_n

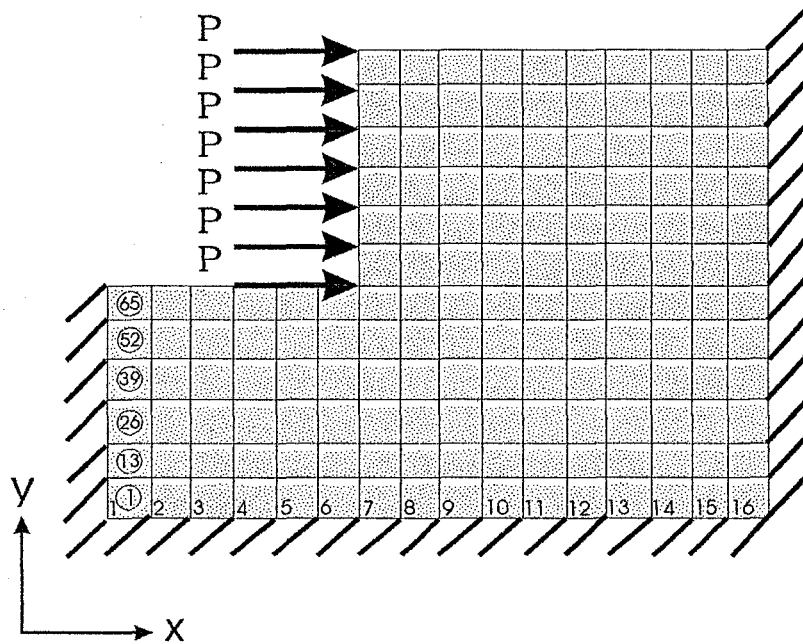


Рис. 4.6. Вид модели с указанием нумерации узлов и элементов (обведено кружком), граничных условий, и мест приложения силы P

1. Взаимодействие передней поверхности инструмента с материалом изделия в процессе стружкообразования схематично представляется следующим образом. Выделяется физическая область задачи, имитирующая зону пластического деформирования срезаемого слоя. Она разбивается на конечное число подобластей (элементов) (рис.4.6).

2. Приложенная нагрузка P , распределенная между узлами 61, 69, 77, 85, 93, 101, имитирует действие силы резания. Временная диаграмма нагружения силы P приведена на рис.3.11.

3. На боковые узлы накладываются связи, которые исключают смещение в вертикальном направлении. На узлы 1 – 13 накладываются связи и в вертикальном, и в горизонтальном направлениях (см. рис.4.6).

4. Динамика упруго-пластических деформаций рассматриваемой области реализуется численно с применением пакета COSMOS/M, в основе которого лежит использование метода конечных элементов [20]. Здесь также реализуется нелинейный анализ, поскольку на фрагмент действуют большие нагрузки, значительно искажающие его форму.

5. По полученным данным строятся следующие диаграммы:

— диаграмма зависимости напряжения σ_x от времени в момент времени $t = 0.1$ с (рис.3.14);

— диаграмма зависимости деформации от времени в момент времени $t = 0.1$ с (рис.3.15);

— диаграмма зависимости напряжений от деформаций в момент времени $t = 0.1$ с (рис.3.16).

6. Выбирается характерный узел. В данной модели это узел 77.

7. Рассчитываются упруго-диссипативные характеристики рассматриваемой области. Алгоритм расчета указанных характеристик выполнен по аналогии с алгоритмом 1 (п.п. 6-9).

8. Проведение имитационного моделирования при варьировании модуля упругости от $E = 1.2 \times 10^5$ МПа до $E = 2.1 \times 10^5$ МПа и предела текучести от $\sigma_T = 15$ МПа до $\sigma_T = 314$ МПа для получения упруго-диссипативных характеристик исследуемой области. На рис.3.17 представлено отношение указанных характеристик в зависимости от модуля упругости и предела текучести.

4.3 Результаты динамического моделирования технологической системы с учетом реологических процессов в зоне стружкообразования

4.3.1 Стенд для динамического моделирования

С целью натурной имитации взаимодействия упруго-диссипативных и инерционных характеристик технологической системы с вязкоупругопластическими характеристиками в зоне стружкообразования был реализован динамический стенд, структурная схема которого представлена на рис.4.7. Важной особенностью этого стенда является наличие ярко выраженного доминирующего элемента. Таким элементом может быть или подсистема заготовки, или подсистема инструмента. Это необходимо для отображения влияния молекулярных процессов в зоне стружкообразования на динамическое поведение технологической системы. В стенде таким элементом является упругий элемент, имеющий пониженную по отношению к другим элементам жесткость. Этот элемент включен в подсистему инструмента. Особенности конструкции упругого элемента (рис.4.8) — два параллельно расположенных стержня прямоугольного поперечного сечения — позволяют выделить в качестве доминирующего изгибный контур. Об этом свидетельствуют расчетные зависимости для коэффициентов жесткости (рис.4.9) и собственных частот колебаний (рис.4.10) при различных вылетах

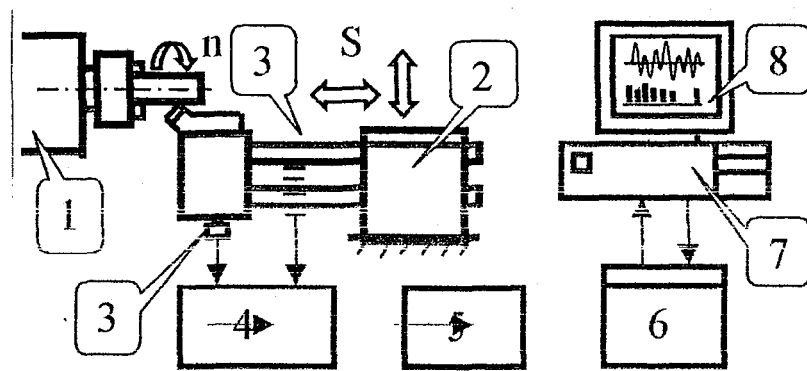


Рис. 4.7. Функциональная схема измерительно-вычислительного стенда для динамических исследований: 1 — металлорежущий станок; 2 — стенд для натурного динамического моделирования; 3 — первичные преобразователи; 4 — усилители; 5 — устройства согласования; 6 — плата ЦАП-АЦП; 7 — персональный компьютер IBM; 8 — пакет прикладных программ

упругого элемента.

В качестве металлорежущего станка был использован токарно-винторезный станок 16K20, рис.4.11.

В измерительном комплексе в качестве первичных преобразователей применены пьезоакселерометры — датчики ускорений модели 1ПА-10В, установленные с помощью резьбовых шпилек (либо с помощью магнитов) в направлении доминирующих деформаций и проволочные тензорезисторы модели 2ПКБ-10-200Б сопротивлением 200 ± 0.05 Ом, включенные в полумостовую схему (рис.4.8). Первичные преобразователи подключены к усилителям: пьезоакселерометры к усилителю ПИ-19, а тензорезисторы — к тензостанции ТА-5. Выходные сопротивления и уровни сигналов усилителей со-

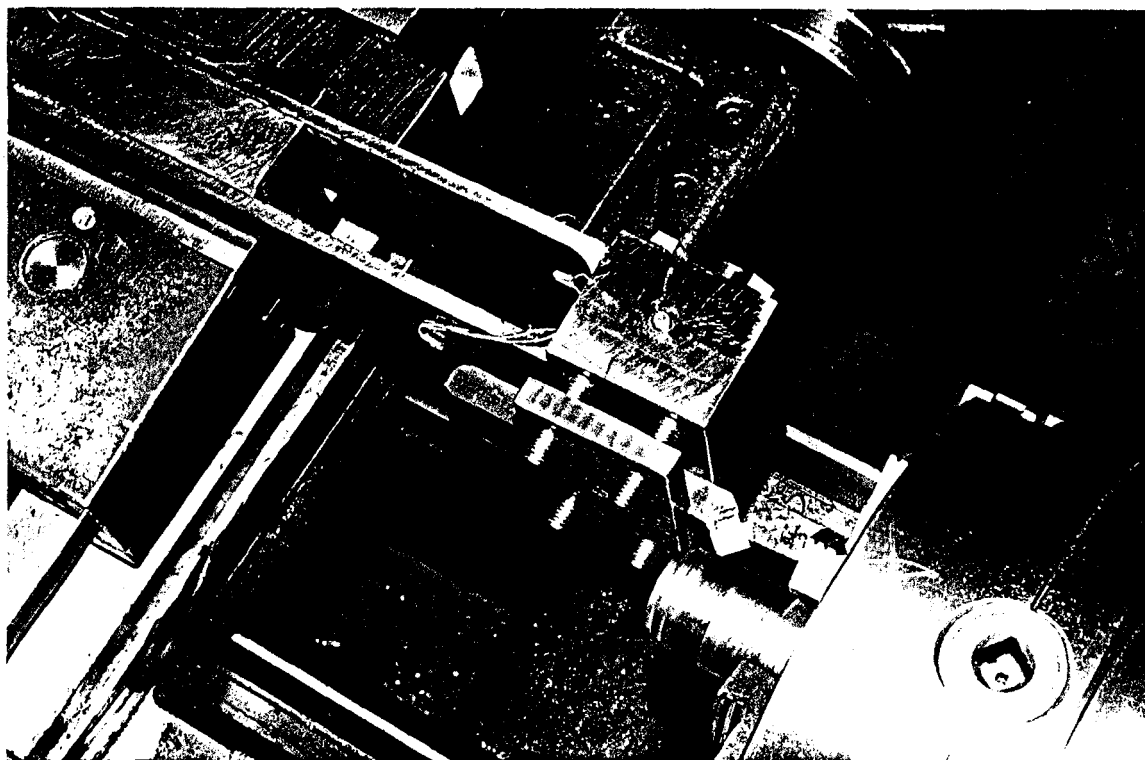
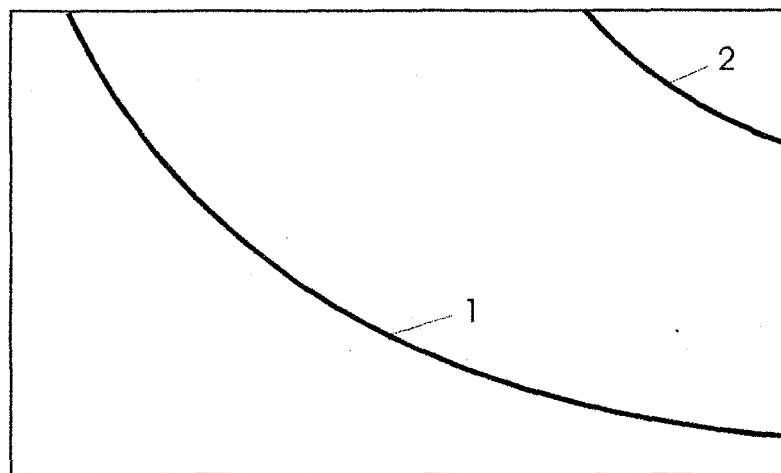


Рис. 4.8. Внешний вид динамического стенда: 1 — упругий элемент; 2 — инерционный элемент; 3 — обрабатываемое изделие; 4 — резец; 5 — пьезоакселерометр; 6 — тензорезисторы

$c, \text{H/мм}$



$L, \text{мм}$

Рис. 4.9. Изменение коэффициентов жесткости при различных вылетах упругого элемента: 1 — изгибной контур; 2 — крутильный контур

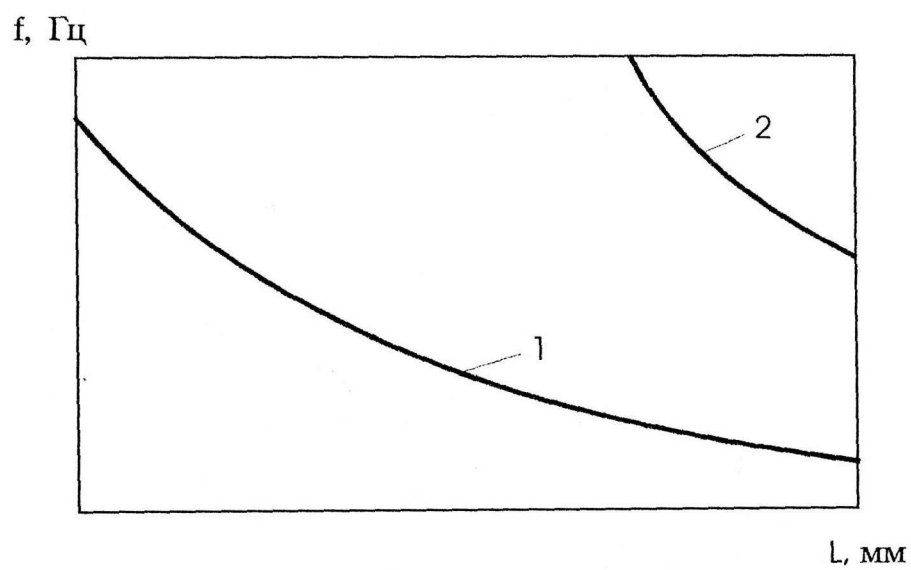


Рис. 4.10. Изменение собственных частот упругого элемента при различных вылетах упругого элемента: 1 — изгибной контур; 2 — крутильный контур

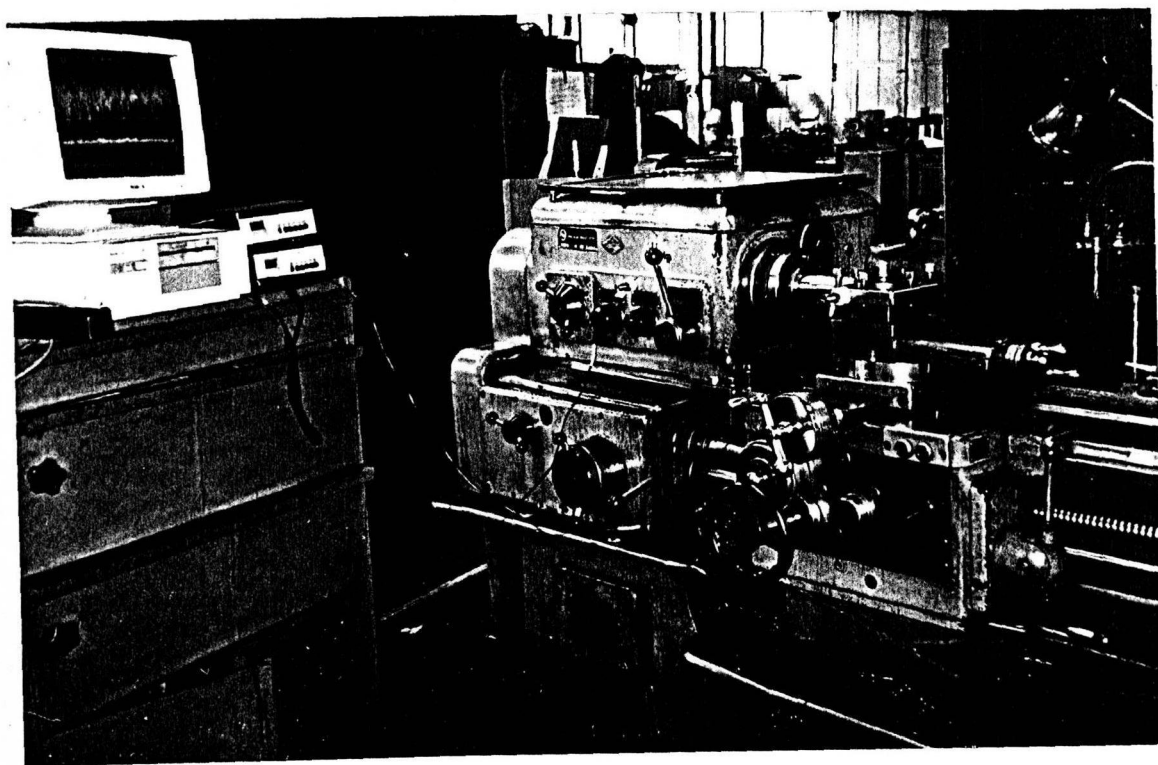


Рис. 4.11. Внешний вид измерительного комплекса

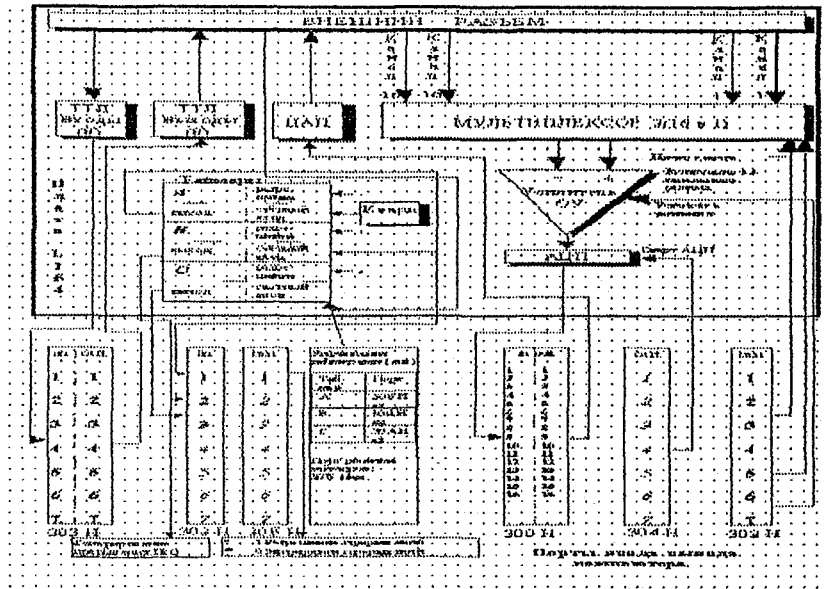


Рис. 4.12. Структурная схема платы L-154

гласованы со стандартной многоканальной двенадцатиразрядной платой ЦАП-АЦП L-154 (рис.4.12), установленной в качестве прямого канала ввода-вывода ПК IBM. Многоканальная измерительная система включает два пьезометрических канала.

Плата L-154 предназначена для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму для персонального компьютера, а также для ввода/вывода цифровых ТТЛ линий и управлением одним выходным аналоговым каналом (цифро-аналоговый преобразователь).

Стандартный комплект поставки позволяет:

— осуществлять многоканальный ввод с аналоговых каналов с частотой до 70 кГц на канал;

— осуществлять асинхронный ввод с различных аналоговых каналов;

— управлять цифро-аналоговым преобразователем;

— осуществлять работу в двух режимах: в программном режиме и в режиме генерации прерываний IRQ;

— управлять цифровыми линиями в асинхронном режиме.

На плате имеется один АЦП, на вход которого при помощи коммутатора может быть подан один из 16(32) аналоговых каналов с внешнего разъема платы. В табл. 4.1 приведены основные характеристики АЦП.

Пакет прикладных программ обеспечивает следующие основные функции: проведение измерений в реальном режиме времени; фильтрация; спектральный анализ и статистическая обработка результатов измерений.

Пьезоэлектрические вибродатчики типа 1ПА-10В являются однокомпонентными пьезоэлектрическими амперметрами, преобразующими механические колебания исследуемого объекта в электрический сигнал, пропорциональный ускорению. Технические характеристики: рабочая чувствительность > 120 мВ/мкм; частота собственных колебаний закрепленного датчика > 5 кГц; предельное вибрационное ускорение $g = 2000$; способ крепления — винт М8 или магнитная платформа; размеры датчика $\phi 32 \times 18$; масса датчика 32 г.

Таблица 4.1

Основные характеристики АЦП

Параметры	Характеристики
1	2
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1.7 мкс
Входное сопротивление	2 МОм
Диапазон входного сигнала	$\pm 5.12\text{В}$, $\pm 2.56\text{В}$, 1.024В
Максимальная частота преобразования	70 кГц
Интегральная нелинейность преобразования	± 0.8 МЗР, макс. ± 1.2 МЗР
Защита входов	при включенном питании компьютера входы защищены на ± 20 В; при выключенном питании входы защищены на ± 10 В
Дифференциальная нелинейность преобразования	± 0.5 МЗР, макс. ± 0.75 МЗР
Отсутствие пропуска кодов	гарантировано 12 бит
Время установления аналогового тракта при максимальном перепаде напряжения (временные параметры приведены для точности установления аналогового тракта до 1 МЗР)	4 мкс
Межканальное прохождение	на полосе 10 кГц меньше 0.5 МЗР; на полосе 50 кГц — 1 МЗР
Смещение нуля	± 0.5 МЗР, макс. 1 МЗР
Полоса пропускания сигнала	не более 250 кГц

Тензорезисторы изготовлены на бумажной основе с базой 10 мм и сопротивлением 200 ± 0.05 Ом.

Для экспериментальных исследований были выбраны следующие параметры станда: упругий элемент (толщина, ширина, длина) — $a = 10$ мм, $b = 70$ мм, $l_0 = 50...110$ мм; образцы двух видов — $a_1 = 40$ мм, $b_1 = 90$ мм, $l_1 = 90$ мм; материал упругого элемента и образца — Сталь 40Х; параметры режущего инструмента — поперечные размеры 25×30 , главный угол в плане 60° , материал режущей части — твердый сплав Т15К6; номинальные значения параметров обработки — глубина резания $t = 2$ мм, рабочая подача $s = 0.08$ мм/об, скорость резания $v_s = 50$ м/мин, диаметр образца 60 мм; варьируемые в ходе эксперимента параметры — $v_s = 10...100$ мм/мин, $s = 0.05...0.35$ мм/об, $t = 0.5...5$ мм, $\varphi = 45...90^\circ$, $l_0 = 50...110$ мм.

4.3.2 Расчетные и экспериментальные динамические исследования по проявлению реологических свойств при обработке точением изделий из различных материалов

При широком варьировании условий и параметров обработки был проведен комплекс сопоставительных расчетных и экспериментальных исследований. Расчеты проводились на основе выражений (4.8) — (4.11). Экспериментальные исследования проводились на разработанном динамическом стенде путем соответствующей на-

стройки его параметров и варьирования режимов резания в процессе лезвийной обработки. Математическая обработка результатов осуществлялась по методу малой выборки [98] с вычислением необходимых характеристик.

Динамическое моделирование реологических характеристик при обработке точением различных материалов. Для оценки влияния реологических характеристик в зоне стружкообразования на характер виброперемещений в технологической системе был проведен комплекс экспериментальных исследований при обработке точением изделий из различных материалов: Сталь 45, 20X13, 08X18H9T. Ниже представлены отдельные результаты расчетных и экспериментальных исследований при следующих исходных данных:

— режущий инструмент: T15K6; $\gamma = 5^0$; $\alpha = 7^0$; $\varphi = 60^0$; $r = 0.2$ мм;

— упруго-диссипативные и инерционные характеристики: $c_x = 2.5 \times 10^6$ Н/м; $b_x = 3600$ Н · с/м; $k = 1700$ Н/мм²; $\delta = 0.2$ мм; $\omega_x = 250$ с⁻¹;

— обрабатываемое изделие: $D = 60$ мм; $t = 2$ мм; $n = 630$ об/мин; $s = 0.24$ мм/об;

— параметры процесса резания:

Сталь 45 — $l_p = 0.3$ мм; $l_Q = 0.3$ мм; $\xi = 1.8$; $c_1 = 2 \times 10^{11}$ Н/м²; $c_2 = c_3 = 2.5 \times 10^9$ Н/м²; $\beta_2 = \beta_3 = 2 \times 10^7$ Н · с/м²;

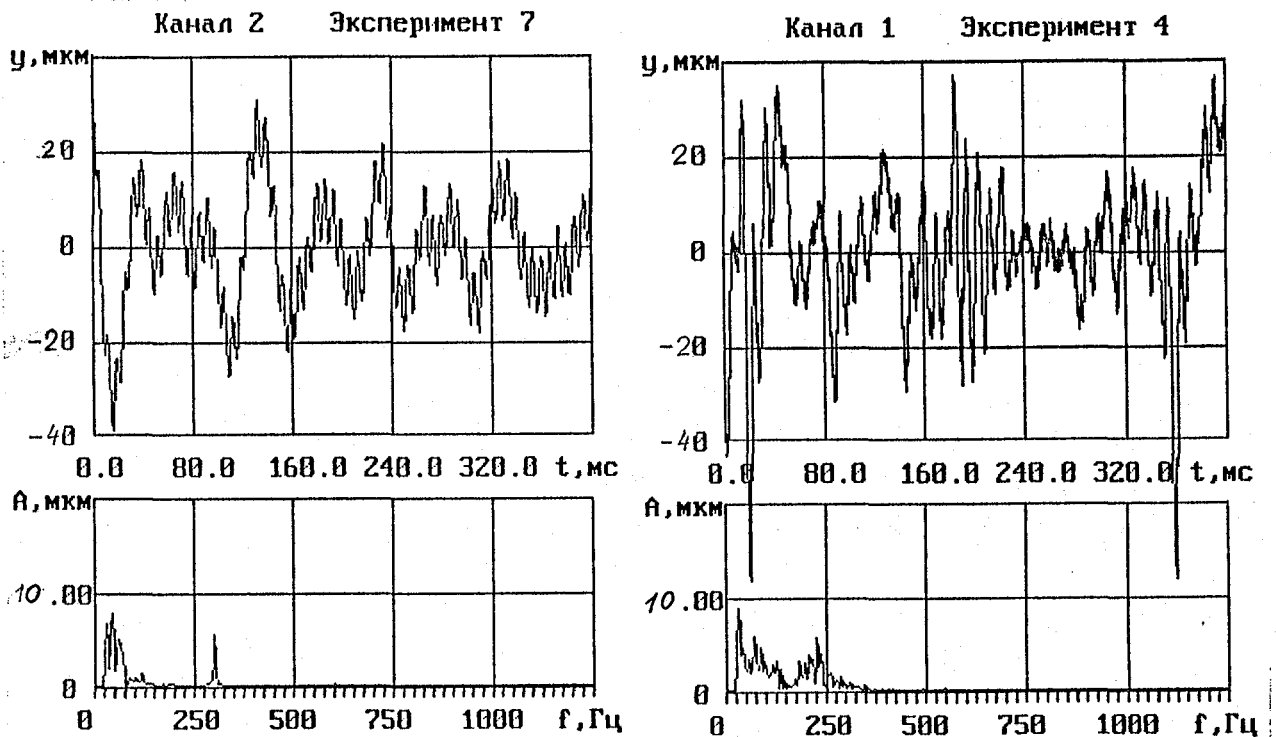


Рис. 4.13. Временная диаграмма виброперемещений при обработке изделия из материала Сталь 45: а) расчет ; б) эксперимент

20X13 — $l_p = 0.35$ мм; $l_Q = 0.35$ мм; $\xi = 2.0$; $c_1 = 1.8 \times 10^{11}$ Н/м²;
 $c_2 = c_3 = 1.9 \times 10^9$ Н/м²; $\beta_2 = \beta_3 = 2.7 \times 10^7$ Н · с/м²;

08X18H9T — $l_p = 0.51$ мм; $l_Q = 0.51$ мм; $\xi = 2.5$; $c_1 = 1.35 \times 10^{11}$ Н/м²;
 $c_2 = c_3 = 1.32 \times 10^9$ Н/м²; $\beta_2 = \beta_3 = 3.5 \times 10^7$ Н · с/м²;

На рис.4.13 — 4.15 представлены временные диаграммы виброперемещений по нормали к формообразующей точке заготовки. На рис.4.13, а ... 4.15, а даны результаты расчета по (4.8) — (4.11), а на рис.4.13, б ... 4.15, б — результаты экспериментальных исследований на динамическом стенде (рис.4.8).

Расчетные и экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 13 ... 15, выполнены на одних и тех

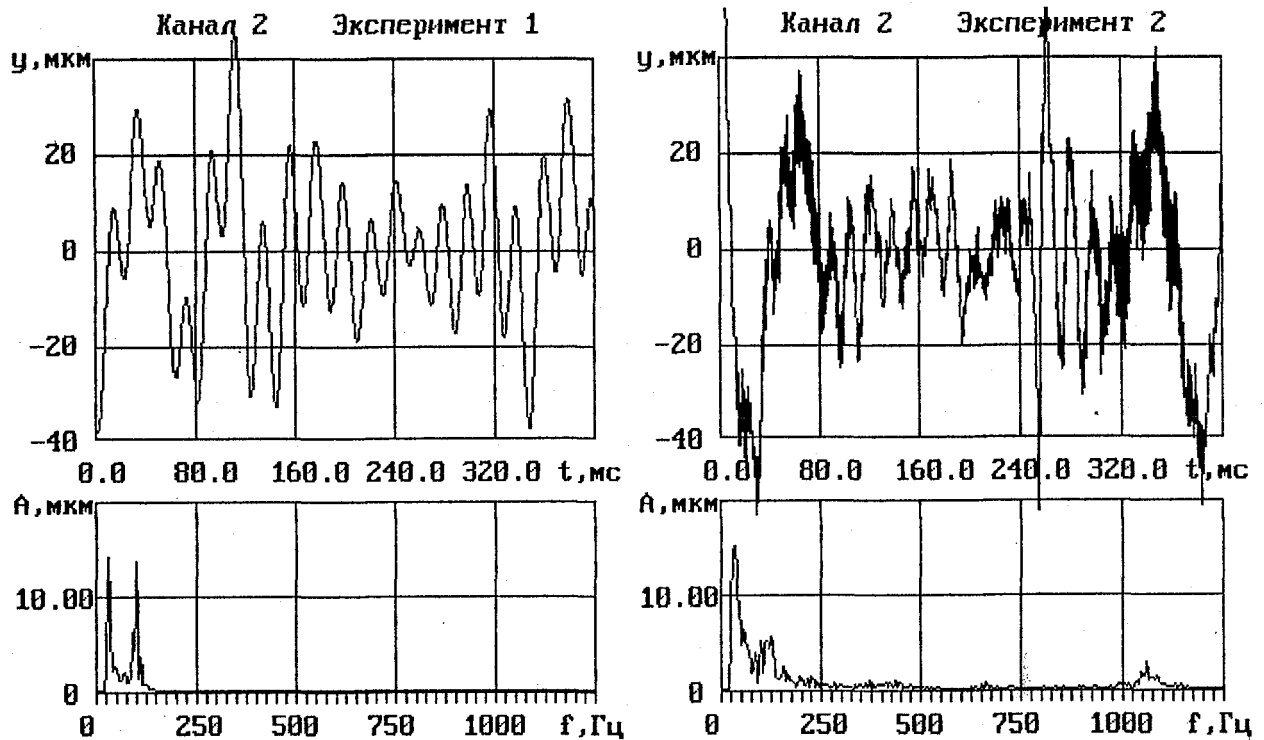


Рис. 4.14. Временная диаграмма виброперемещений при обработке изделия из материала 20X13: а) расчет ; б) эксперимент

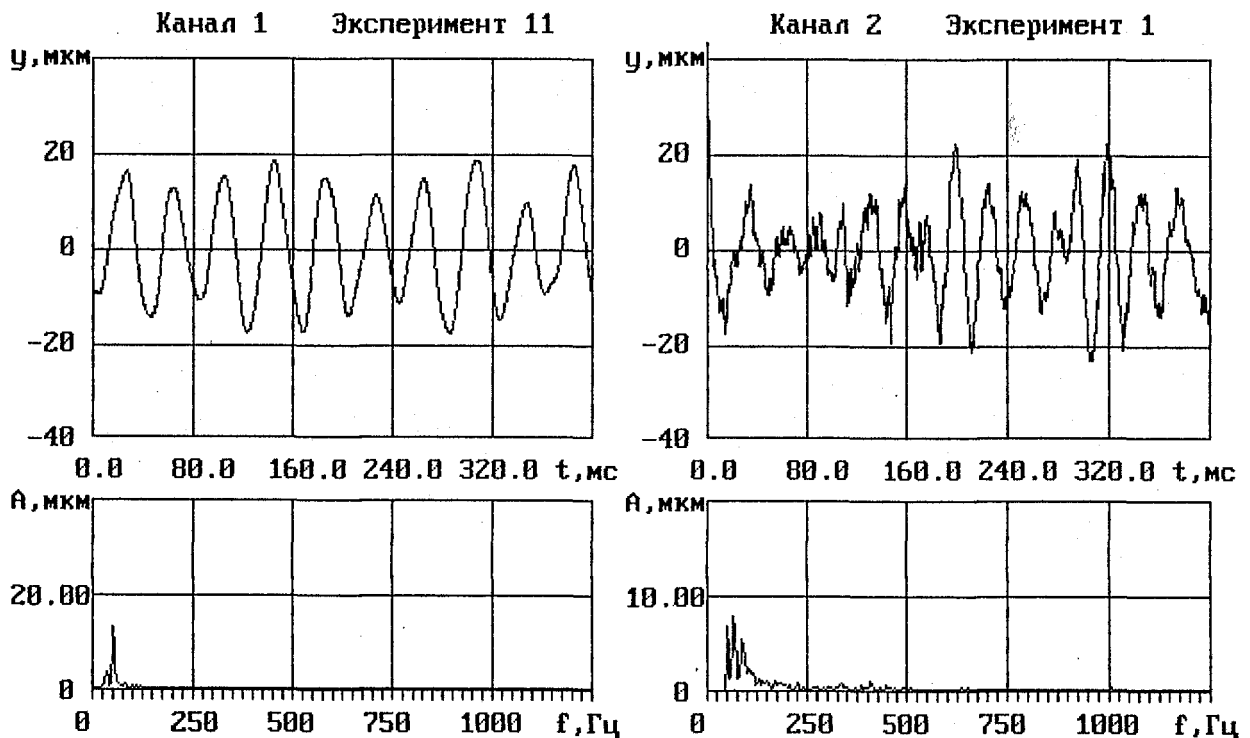


Рис. 4.15. Временная диаграмма виброперемещений при обработке изделия из материала 08X18H9T: а) расчет ; б) эксперимент

же режимах. Упруго-диссипативные и инерционные параметры системы также идентичны. Однако, характер виброперемещений для каждого из трех рассматриваемых материалов существенно отличается. Судя по рис.4.13, при обработке стали 45 наблюдается жесткий режим виброперемещений. При обработке стали 20X13 (рис.4.14) уровень амплитуд колебаний сохраняется примерно таким же, однако, характер виброперемещений стал более мягким. При обработке стали 08X18H9T (рис.4.15) существенным образом проявились реологические характеристики в зоне резания, что привело к дополнительной диссипации энергии и, соответственно, к уменьшению уровня амплитуд колебаний.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о качественном соответствии характера колебаний. Это, в свою очередь, дает основание утверждать о работоспособности разработанных реологических моделей. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает: по амплитуде 16%, по частоте — 10%.

Динамическое моделирование реологических характеристик при различных условиях обработки. Решение системы дифференциальных уравнений (4.2), описывающих динамические процессы в технологической системе механической обработки, и одновременный учет условий деформаций (1.3), (1.4) и фазовых переходов (1.10), (1.11), позволяет построить границу области устой-

чивости в пространстве параметров обработки. Практическое значение имеют пересечения этого пространства плоскостями.

В ходе эксперимента были рассмотрены следующие совместно попарно варьируемые параметры: скорость резания, глубина резания, главный угол в плане, подача.

Для условий, представленных выше, был проведен комплекс расчетных исследований по оценке устойчивости процесса резания.

На рис.4.16 в плоскости параметров "глубина резания — скорость резания" представлена расчетная граница областей устойчивости (сплошная линия) при вылете упругого элемента 80 мм (обрабатываемый материал 20Х13). Точками отмечены экспериментальные реализации трех режимов: 1 — $n = 120$ об/мин; 2 — $n = 250$ об/мин; 3 — $n = 400$ об/мин; глубина резания 2 мм. Ниже представлены результаты расчета по разработанным моделям и эксперимента на динамическом стенде (рис.4.17 ... 4.19 соответственно).

Расчетные и экспериментально найденные границы области устойчивости проходят достаточно близко (частота вращения и рабочая подача на станках устанавливается дискретно), причем максимальные отклонения между ними не превышают 17%.

Результаты расчетных экспериментальных исследований показали, что при построении границы области устойчивости форми-

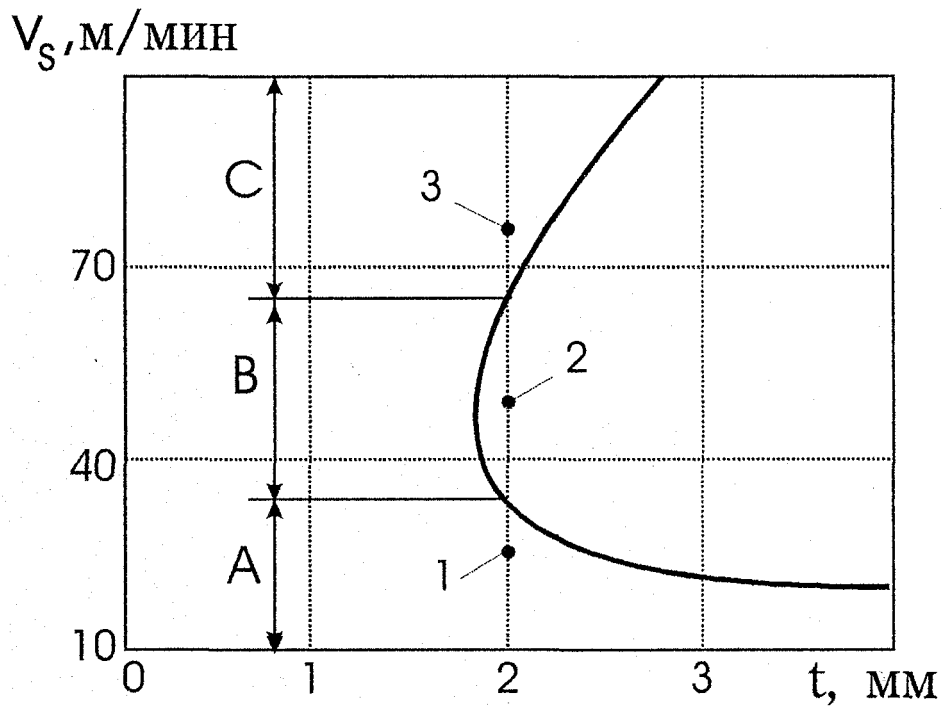


Рис. 4.16. Расчетные границы области устойчивости: вылет упругого элемента $l_s = 80$ мм; 1 — $n = 120$ об/мин; 2 — $n = 250$ об/мин; 3 — $n = 400$ об/мин

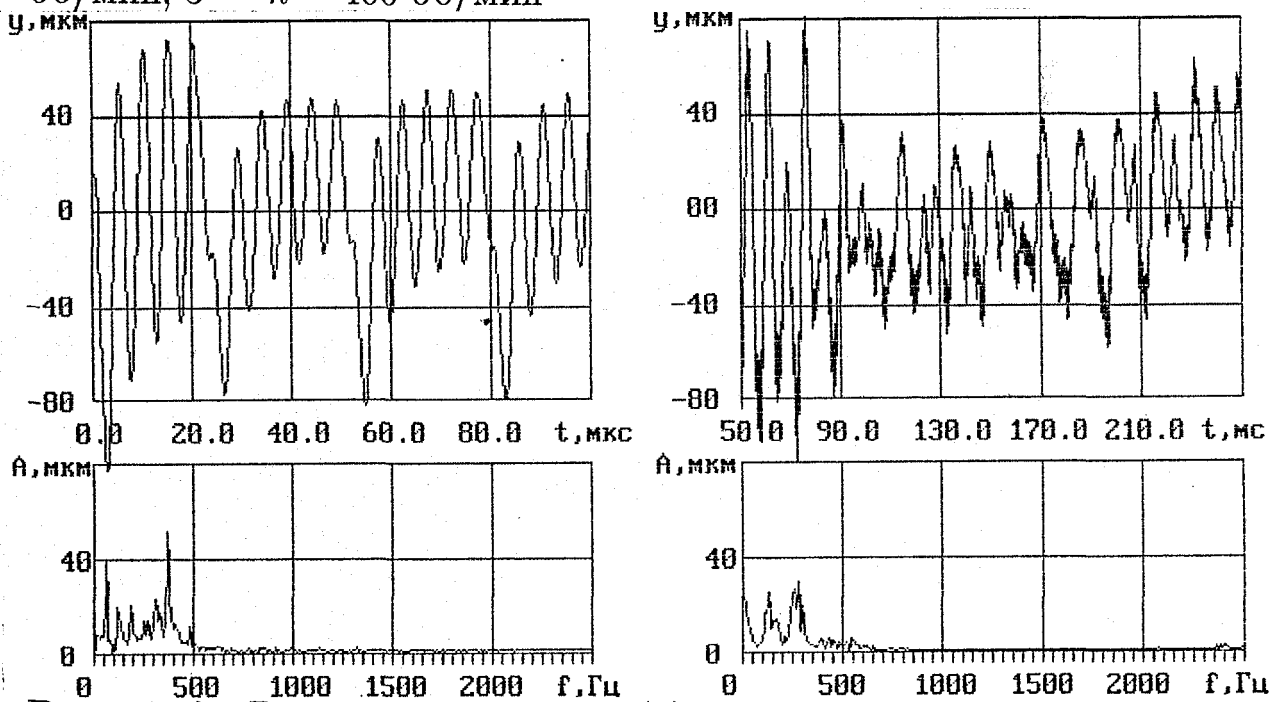


Рис. 4.17. Результаты расчета (а) и эксперимента (б) для режима 1

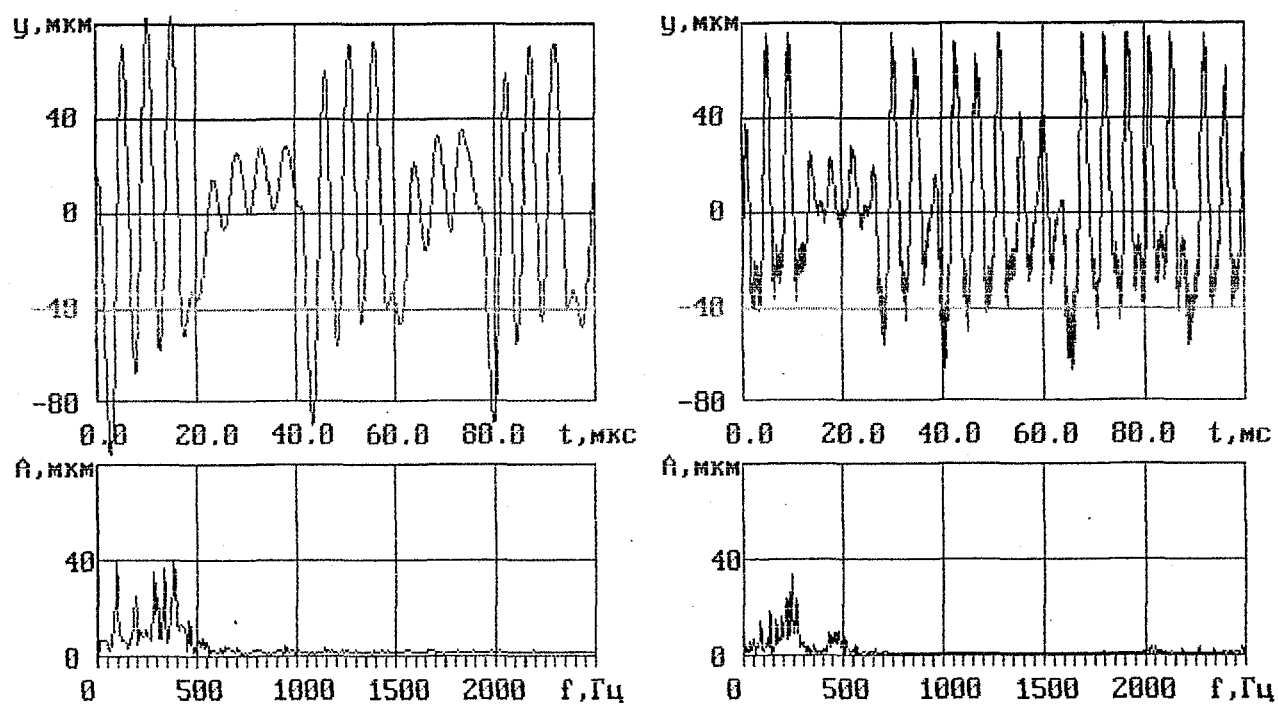


Рис. 4.18. Результаты расчета (а) и эксперимента (б) для режима 2

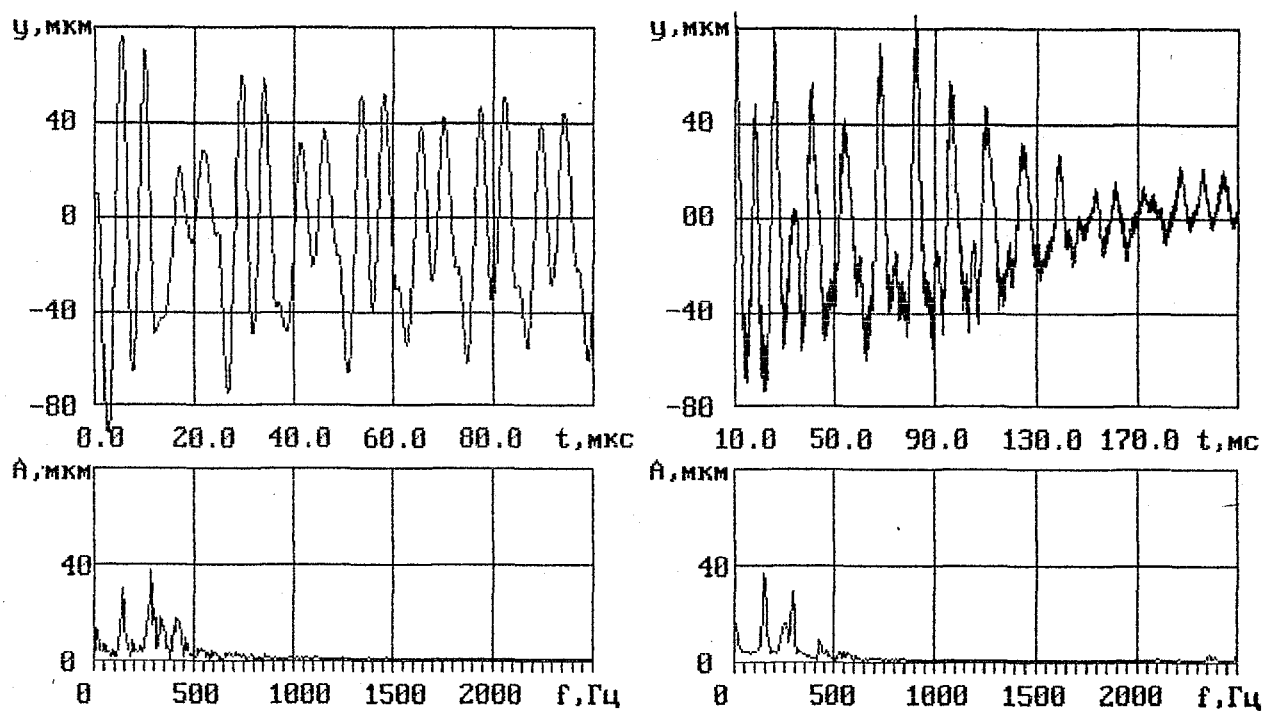


Рис. 4.19. Результаты расчета (а) и эксперимента (б) для режима 3

руются при характерных области (рис.4.16): A — область устойчивости при малых скоростях резания; B — область неустойчивости; C — область устойчивости при больших скоростях резания. В каждой из указанных областей имеет место свой характер проявления реологических характеристик. Об этом свидетельствуют диаграммы на рис.4.17, а ... 4.19, а. Сопоставление характера расчетных и экспериментальных диаграмм виброперемещений свидетельствует о качественном соответствии между ними. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что разработанные реологические модели адекватно описывают процесс резания в ТСМОР.

4.4 Повышение эффективности лезвийной обработки на основе моделирования реологических процессов в зоне стружкообразования

Эксплуатация дорогостоящего металлорежущего оборудования, особенно работающего в составе гибких производственных систем, без оптимизации режимов металлообработки приводит к большим экономическим потерям. Главной (глобальной) целью решения задачи оптимизации процесса лезвийной обработки (как и большинства остальных) является получение наилучших экономических показателей. На практике наибольшее распространение получили

два критерия: критерий себестоимости и критерий производительности, которые включают в себя зависимость стойкости инструмента от параметров резания [88]. Далее будет отдано предпочтение критерию производительности. Это связано с тем, что, хотя критерий минимальной себестоимости и сохраняет значимость, оценку эффективности затрат проводить весьма затруднительно в связи с переходом промышленности к рыночной экономике. Кроме этих критериев иногда применяется оценка максимального использования станка и инструмента (отношением максимального съема металла к единице затраченной мощности станка), критерий максимального съема металла за период стойкости, критерий максимальной стоимости инструмента и т.д.

При измерении стойкости числом деталей T_D , обработанных за цикл использования инструмента, производительность (шт./мин) определяется по формуле [88]:

$$П_{ш} = \frac{T_D}{T_D \tau_m + \tau_{см}}, \quad (4.14)$$

где τ_m — машинное время; $\tau_{см} = \tau'_{см} + \tau_B$; $\tau'_{см}$ — время смены инструмента; τ_B — вспомогательное время работы станка в течение смены (или в течение времени обработки партии деталей), отнесенного к периоду стойкости данного инструмента, мин.

В ряде случаев, особенно при быстродействующей автоматической смене инструмента и малом вспомогательном времени, отнесенном к циклу работы инструмента (что характерно для гибких

производственных систем), $\tau_{см}$ может оказаться значительно меньше экономической стойкости инструмента. Тогда критерий штучной производительности вырождается в критерий

$$П_{ш} = \frac{T_{Д}}{T_{Д}\tau_{м} + \tau_{см}} \approx \frac{1}{\tau_{м}}. \quad (4.15)$$

Следующим этапом решения задачи оптимизации является установление факторов, действующих в процессе обработки заготовки и накладывающих ограничения на параметры управления [65]. Необходимо иметь минимум ограничений, учитывающих только доминирующие факторы, влияющие на процесс. Влияние этих факторов на параметры управления выражают в виде уравнений технических ограничений. Наиболее важными техническими ограничениями, обеспечивающими заданные качественные показатели в процессе лезвийной обработки, являются размерная точность обрабатываемого изделия, жесткость и температурные деформации технологической системы, наибольшее и наименьшее значения частот вращения и подачи, заданная шероховатость. Далее приведены уравнения и неравенства перечисленных технических ограничений, используемых при определении оптимальных параметров управления: скорости резания v_0 и подачи p_0 .

1⁰. Связь между стойкостью инструмента T и параметрами резания в общем случае лезвийной обработки устанавливается с по-

мощью эмпирической зависимости

$$ns^{y_v} = \frac{318C_v K_v d^{z_v-1}}{T^m g^{x_v} z^{u_v} b^{r_v}}, \quad (4.16)$$

где C_v — коэффициент скорости резания, характеризующий нормативные условия работы; K_v — суммарный поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий отличие от нормативных условий обработки; d — диаметр заготовки, мм; n — частота вращения, об/мин; s — подача, мм/мин; z — число режущих кромок; g и b — глубина и ширина резания соответственно, мм; x_v , y_v , r_v , z_v , u_v , m — показатели степеней, зависящие от свойств инструмента и условий резания (значения этих показателей, а также коэффициентов C_v и K_v содержатся в соответствующих нормативных материалах и справочниках).

Формула (4.16) изменяется в зависимости от вида обработки. Для разных видов обработки значения коэффициентов C_v и K_v и показателей степеней у переменных различны. Кроме того, для определения стойкости инструмента при обработке однолезвийным инструментом, коэффициенты r_v , z_v и u_v обычно принимаются равными нулю. Существуют и другие зависимости износа или стойкости инструмента от параметров резания, однако, расчеты оптимальных режимов резания удобнее всего выполнять по формуле (4.16), лежащей в основе нормативов, по которым определяются режимы металлообработки почти во всех отраслях машиностроения.

2⁰. Связь между мощностью резания (N_e , кВт) и мощностью

главного привода станка (N_z , кВт) выражается зависимостями

$$N_e = \frac{C_z g^{x_z} n^{n_z} s^{y_z} \pi^{n_z} b^{r_z} z^{u_z} b_K^{q_z} K_z}{K_{c_z}}, \quad (4.17)$$

где C_z — коэффициент тангенциальной силы резания; b_K — ширина шлифовального круга, мм; K_z — суммарный поправочный коэффициент мощности резания, учитывающий отличие от нормативных условий обработки; K_{c_z} — коэффициент, входящий в зависимость в общей форме; $x_z, y_z, r_z, z_z, u_z, q_z$ — показатели степени соответственно глубины резания, подачи, диаметра изделия, частоты вращения, числа режущих кромок, ширины резания;

$$N_e = \eta N_z, \quad (4.18)$$

где η — КПД главного привода станка, находим

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{\eta K_{c_z}}{C_z g^{x_z} d^{z_z} \pi^{n_z} b^{r_z} z^{u_z} b_K^{q_z} K_z}, \quad (4.19)$$

При конкретных условиях обработки показатели степени, не относящиеся к данному виду обработки, приравниваются нулю. Также корректируются значения коэффициентов K_z, K_{C_z} и C_z .

3⁰. Учет связи между расчетной скоростью резания, подачей и заданной производительностью станка (условное ограничение).

4⁰. Установление связи между расчетной частотой вращения при резании и наименьшей частотой вращения, исходя из кинематики станка.

5⁰. Установление связи между расчетной скоростью резания и

максимально допустимой скоростью резания (условное ограничение с технологической точки зрения).

6⁰. Установление связи между расчетной скоростью вращения при резании и максимальной частотой вращения, исходя из кинематики станка.

7⁰. Установление связи между расчетными скоростью резания v и подачей s , допускаемыми по условиям прочности инструмента.

8⁰. Установление связи между расчетными величинами v и s , допускаемыми по условиям жесткости инструмента [5, 48, 76, 103].

9⁰. Установление связи между расчетными параметрами v , s и точностью обработки, допускаемой жесткостью заготовки и способом ее крепления [15, 25, 57, 84].

10⁰. Установление связи между расчетными значениями v и s , допускаемыми по условиям прочности механизмов станка.

11⁰. Установление связи между расчетной подачей и наименьшей подачей, допускаемой кинематикой станка.

12⁰. Установление связи между расчетной подачей и максимальной подачей, допускаемой кинематикой станка.

13⁰. Установление связи между расчетной подачей и допускаемой подачей из условия получения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Здесь приведен не полный перечень ограничений, их число может варьироваться (увеличиваться или уменьшаться) в зависимо-

сти от конкретно поставленной задачи.

Отыскание оптимальных значений n и s известными приемами может быть сведено к решению стандартной задачи линейного программирования [10, 37, 110]. Для того, чтобы поставить задачу оптимизации режимов механической обработки как задачу линейного программирования, требуется провести преобразование исходных уравнений и ограничений, используя процедуру логарифмирования. Введем переменные

$$\begin{aligned} x_1 &= \ln n, \\ x_2 &= (100s). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Тогда соответствующие ограничения можно представить в виде линейных неравенств

$$\left. \begin{aligned} x_1 + y_r x_2 &\leq b_1; \\ n_2 x_1 + y_z x_2 &\leq b_2; \\ \dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

где b_j $j = 1, 2, \dots$ — устанавливаются в соответствии с условиями $1^0, 2^0, \dots$

Область реализуемых режимов обработки может быть ограничена совокупностью неравенств:

$$\begin{aligned} x_1 + y_v x_2 &\leq b_1; & n_z x_1 + y_z x_2 &\leq b_2; & x_1 + x_2 &\geq b_3; \\ x_1 &\geq b_4; & x_1 &\leq \{b_5, b_6\}; \\ n_p x_1 + y_p x_2 &\leq b_7; & n_r x_1 + y_r x_2 &\leq b_8; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_y x_1 + y_y x_2 &\leq b_9 && \text{или } y_x x_2 \leq b_9; \\ n_s x_1 + y_s x_2 &\leq b_{10}; && x_2 \geq b_{11}; && x_2 \leq \{b_{12}, b_{13}\}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

где b_1 — ограничение по стойкости инструмента; b_2 — ограничение по мощности резания; b_3 — ограничение на скорость резания и подачу, учитывая производительность станка; b_4 — ограничение на частоту вращения при резании; b_5 — ограничение на скорость резания; b_6 — ограничение на скорость вращения, исходя из кинематики станка; b_7 — ограничение на скорость резания и подачу по условию прочности инструмента; b_8 — ограничение на скорость резания и подачу по условию жесткости инструмента; b_9 — ограничение на скорость резания и подачу по условию точности обработки, допускаемой жесткостью заготовки и способом ее крепления; b_{10} — ограничение на скорость резания и подачу по условию прочности механизмов станка; b_{11} — ограничение на подачу, исходя из минимальной подачи; b_{12} — ограничение на подачу, исходя из максимальной подачи; b_{13} — ограничение на подачу по условию получения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Оптимальные значения n_0 и s_0 рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} n_0 &= \exp x_1; \\ s_0 &= \exp x_2 / 100. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Определение оптимального режима, обеспечивающего максимальную производительность, сводится к нахождению положительных значений x_1 и x_2 , при которых линейная форма оценочной

функции $Z = x_1 + x_2$ приняла бы наибольшее значение:

$$Z = x_1 + x_2 = \max \quad (4.24)$$

Параметры обработки считаются оптимальными, когда время обработки окажется минимальным. Так как время обработки (точнее, машинное время) обратно пропорционально произведению частоты вращения n и подачи s , то время обработки минимально, когда произведение ns максимально, что учтено в зависимости (4.24). Решение системы линейных неравенств (4.22) может быть выполнено в наглядной форме графическим способом, рис.4.20. Заштрихованное поле определяет множество параметров обработки, допускаемых ограничениями, принятыми в модели. В этом поле наиболее удаленная от начала системы точка соответствует максимальной величине зависимости $x_1 x_2 = \max$.

Как уже было отмечено в главе 1, в большинстве известных работ при решении задач оптимизации процесса механической обработки лезвийным инструментом используются эмпирические зависимости стойкости инструмента, силы и мощности резания, шероховатости обработанной поверхности и т.д. от оптимизируемых параметров обработки. Основным недостатком модели на основе эмпирических зависимостей является то, что они не учитывают взаимосвязанности влияния различных исследуемых факторов процесса резания. Факторы процесса резания рассматриваются отдельно друг от друга, хотя их влияние проявляется не только

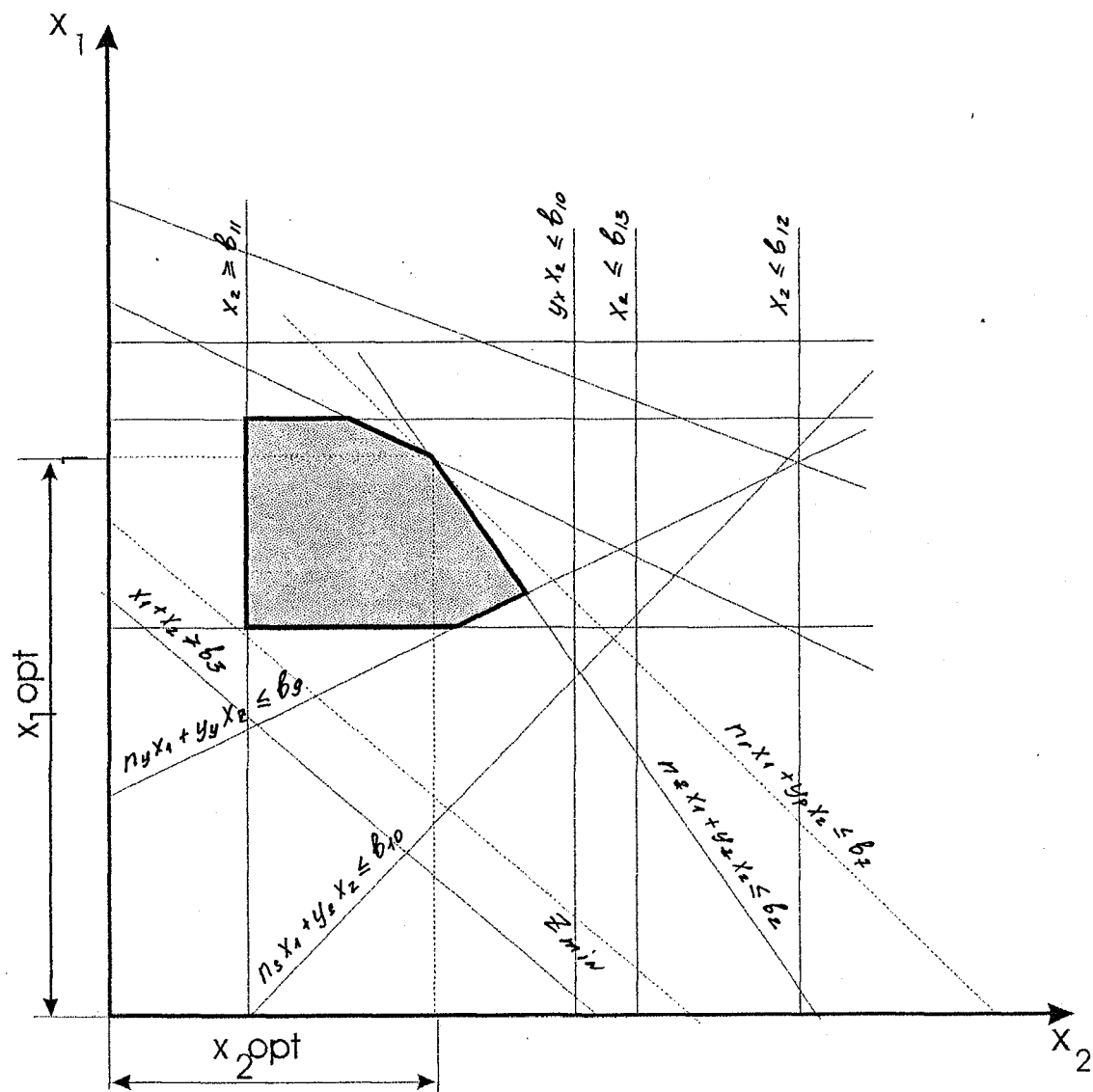


Рис. 4.20. Геометрическая интерпретация математической модели обработки при использовании линейного программирования

каждого в отдельности, а прежде всего совместно, в определенных сочетаниях и комбинациях. Эффективность оптимизации параметров процесса резания будет выше при комплексном и системном подходе к решению задачи.

Необходимо отметить в качестве существенного недостатка также неадекватность условий механической обработки на станке-стенде, на котором получены конкретные значения параметров эмпирических зависимостей типа (4.16), (4.17), и реального станка. Это, прежде всего, относится к параметрам технологической системы в целом. В некоторой степени это обстоятельство можно было бы учесть, используя методы подобия при резании металлов. Наиболее полно такие методы разработаны проф. С.С.Силиным и созданной им Школой в Рыбинском авиационном технологическом институте [94]. Однако, применение этого метода связано с определенными сложностями и не получило еще необходимого распространения.

Естественно, наиболее полная постановка задачи оптимизации процесса механической обработки должна основываться на использовании динамических критериев, в частности, основного из них — критерия устойчивости технологической системы механической обработки (см. п. 1.4). Для достижения этой цели, прежде всего, необходимо создание глобальной динамической модели системы, на основе которой можно было бы осуществить оптими-

зацию режимов механической обработки методами направленного поиска (см., например, [68]).

Отсутствие такой модели на современном уровне знаний и технической возможности не позволяет в полной мере решить задачу оптимизации на основе совокупности динамических критериев. Это заставляет в качестве паллиативного решения принять следующее. Процесс оптимизации режимов механической обработки условно разделяется на два этапа:

— так называемая "статическая" оптимизация, осуществляемая на основе эмпирических зависимостей типа (4.16), (4.17) с использованием современного программно-алгоритмического обеспечения (в частности, линейного программирования на основе симплекс-метода; см., например, [47, 60]);

— ограниченная динамическая оптимизация, сводящаяся либо к проверке выполнения динамических критериев, либо поиску компромиссного решения с минимальной потерей относительно критерия производительности.

Получаемые при этом решения, строго говоря, не являются оптимальными. Однако, такой подход позволяет все же решить задачу оптимизации режимов механической обработки на достаточно высоком уровне и трактовать получаемые решения как квазиоптимальные (рациональные). По мере накопления опыта в решении подобных задач, можно перейти в дальнейшем к уточнению по-

становки и разработке эффективных методов решения задач оптимизации режимов механической обработки.

Далее будет рассмотрено решение на втором этапе задачи оптимизации режимов механической обработки по критерию устойчивости технологической системы, поскольку он обеспечивает такие важные показатели, как стабильность режимов резания, необходимую производительность, точность и качество обработки.

После расчета оптимальных значений n и s на первом этапе, необходимо провести проверку технологической системы механической обработки по критерию устойчивости, используя найденные параметры режимов резания. Хотя технологическая система является нелинейной, целый ряд важных задач динамики ТСМОР можно решать в первом приближении в линеаризованной постановке [12, 54, 109].

Система уравнений (4.2), приведенная к каноническому виду и записанная в векторно-матричной форме

$$T \cdot \dot{q} + N(q) \cdot q = 0, \quad (4.25)$$

может быть представлена в форме системы Ляпунова [66]

$$\dot{q} = A \cdot q, \quad (4.26)$$

где $A \equiv -(T^{-1} \cdot N)$, T^{-1} — матрица, обратная матрице T , допускает непосредственное применение критерия устойчивости Ляпунова.

Характеристический определитель линейной системы однород-

ных уравнений (4.26) вида

$$\text{Det}(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

имеет n корней

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n. \quad (4.28)$$

Если все корни простые (то есть, нет кратных корней), то существует неособенное линейное преобразование

$$p_k = \sum_{j=1}^n \beta_{kj} q_j \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (4.29)$$

где β_{kj} — некоторые постоянные числа, которое приводит систему уравнений (4.26) к виду

$$\dot{p} = \Lambda \cdot p. \quad (4.30)$$

Здесь $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)^{-1}$ — вектор-столбец переменных p_k , называемых каноническими переменными, и Λ — диагональная матрица вида

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

составленная из корней (4.28) определителя (4.27). Случай кратных корней не представляет практического интереса и поэтому здесь не рассматривается.

Если вещественные части всех корней характеристического уравнения $\operatorname{Re} \lambda_k = \nu_k$ отрицательны, то невозмущенное движение асимптотически устойчиво (все $p_k \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$).

Если среди корней характеристического уравнения имеется хотя бы один, вещественная часть которого положительна, то возмущенное движение неустойчиво (хотя бы одно $p_k \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow \infty$).

Если вещественные части некоторых корней характеристического уравнения равны нулю, а вещественные части остальных корней отрицательны, то невозмущенное движение устойчиво, но не асимптотически (все p_k ограничены, но лишь часть их стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$).

В соответствии с теоремой Ляпунова об устойчивости движения по первому приближению, невозмущенное движение асимптотически устойчиво независимо от членов выше первого порядка малости, если вещественные части всех корней характеристического уравнения первого приближения отрицательны. Что касается неустойчивости по первому приближению, то невозмущенное движение неустойчиво независимо от членов выше первого порядка малости, если среди корней характеристического уравнения найдется хотя бы один с положительной вещественной частью. В особых случаях (если наряду с корнями, имеющими отрицательные вещественные части, существуют корни с нулевыми вещественными частями) для определения характера устойчивости движения

одних уравнений первого приближения не достаточно.

Таким образом, в рамках рассматриваемой линеаризованной модели возможно поставить и решить ограниченную задачу параметрического синтеза по критерию устойчивости. При решении данной задачи возможны два исхода:

1). Система устойчива при найденных значениях параметров резания n и s . Решение задачи на этом заканчивается. Здесь можно сделать примечание о том, что возможно дальнейшее уточнение характеристик ТСМОР на основе динамической модели: определение динамической погрешности при обработке, шероховатости с учетом динамических явлений, качества поверхностного слоя и пр. Однако это представляет собой совокупность специальных задач, имеющих самостоятельное значение [67, 80, 87].

2. Система неустойчива. При таком исходе возникает необходимость постановки задачи выведения рабочей точки в пространстве параметров в область устойчивости при наименьших потерях производительности. На основе оценки чувствительности модели к изменению варьируемых параметров, выявляются доминирующие (ДП) и малозначимые (МП) варьируемые параметры [12]. Если рабочая точка попадает в область неустойчивости, то в первую очередь, необходимо варьирование МП, в результате которого смещается граница области устойчивости и изменяется режим механической обработки, рис. 21. Если после этого рабочая точка

продолжает находиться в неустойчивой области, осуществляется пошаговое варьирование ДП, например, на основе градиентного поиска или метода Ньютона [58]. При попадании в область устойчивости задача оптимизации проектирования по критерию устойчивости считается решенной.

Рассмотрим в качестве примера реализацию предложенных выше методов при оптимизационном проектировании обработки точением ротора ЦВД паровой турбины К-500-166-1 на станке модели ДН 255/100 NC. Материал изделия 25Х1М1Ф, материал инструмента Т14К8, диаметр изделия 525 мм, длина цилиндрического участка 524 мм. Наиболее представительными параметрами обработки являются рабочая подача и скорость резания. В плоскости данных параметров на основе зависимостей (4.21), (4.22), (4.29) было осуществлено построение области реализуемых режимов, обеспечивающих требования по точности, качеству поверхностного слоя (шероховатости и остаточным напряжениям) и устойчивости технологической системы. На рис.4.22 эта область ограничена совокупностью линий 1...4, определяющих ограничения, соответственно, по устойчивости, остаточным напряжениям, шероховатости и размерной точности. Функции, описывающие их, сведены к упрощенной зависимости вида

$$a_1 \geq a_2 s + a_3 v, \quad (4.32)$$

где $a_{1...3}$ — коэффициенты регрессии, значения которых для указан-

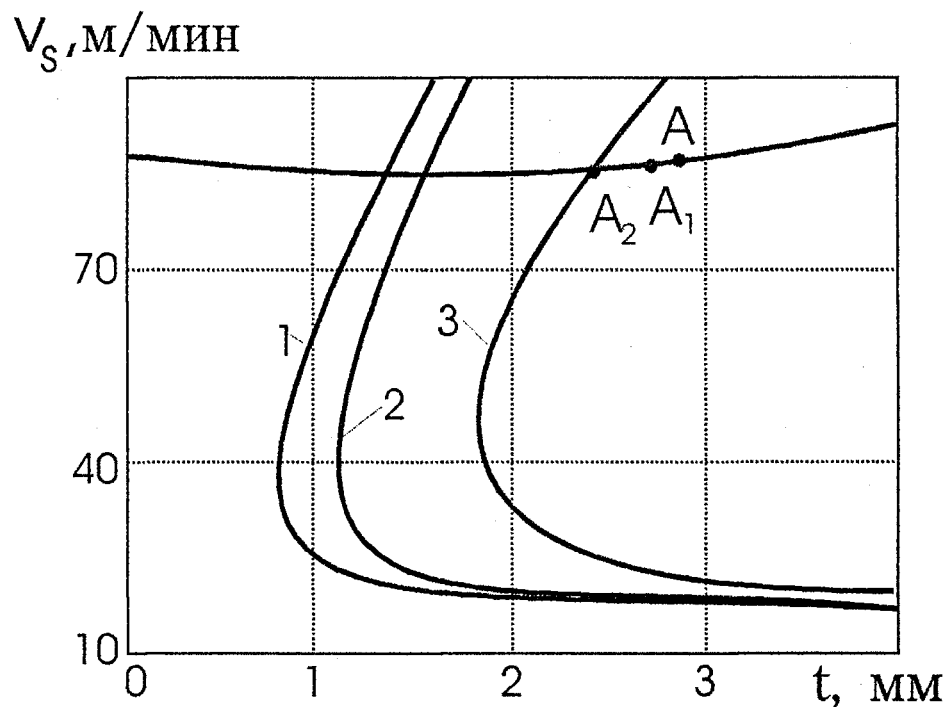


Рис. 4.21. Результат варьирования малозначимых и доминирующих параметров при оптимизации операции лезвийной обработки: 1 — граница области устойчивости до варьирования; 2 — граница области устойчивости после варьирования МП; 3 — граница области устойчивости после варьирования ДП; А — точка, соответствующая оптимальному режиму; А₁ — точка, соответствующая режиму после варьирования МП; А₂ — точка, соответствующая режиму после варьирования ДП

Таблица 4.2

Значения коэффициентов регрессии

Номер функции	Коэффициенты регрессии		
	a_1	a_2	a_3
1	152	167	1
2	119	192	1
3	790	1950	1
4	-0.28	-1	0

ных функций сведены в таблицу 4.2.

Результаты расчетов показали, что для рассматриваемой операции определяющими являются шероховатость поверхности и устойчивость технологической системы. Были получены следующие рациональные режимы резания: подача $s = 0.22$ мм/об, скорость резания $v = 120$ мм/мин.

Был проведен расчет рациональных режимов резания для токарной обработки ротора на предварительных и окончательных переходах точения, растачивания и подрезания торцов. По результатам расчетов были получены режимы резания, отличающиеся от контрольных на 18–21%. Это дало возможность повысить производительность обработки при обеспечении требований по качеству поверхностного слоя.

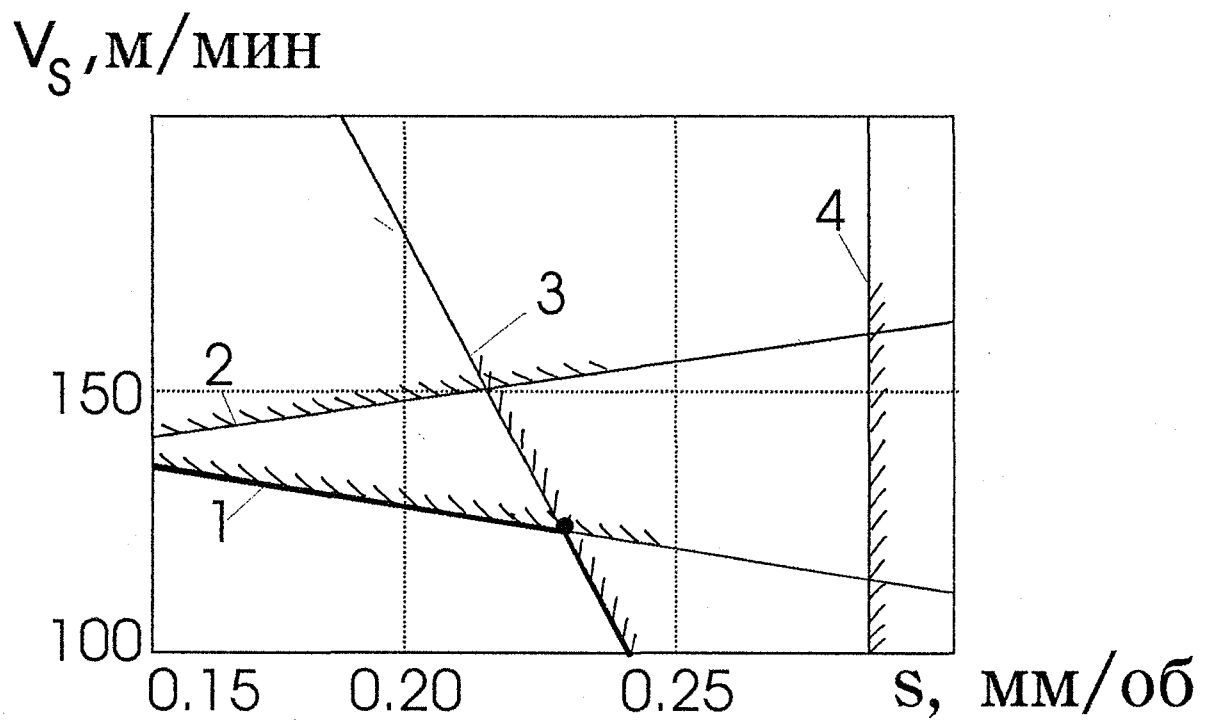


Рис. 4.22. Область допустимых режимов по результатам оптимизационного проектирования: 1 — устойчивость; 2 — остаточные напряжения; 3 — шероховатость; 4 — размерная точность

4.5 Результаты и выводы по главе

- 1 . На основе разработанных реологических моделей реализована задача динамического моделирования в пространстве переменных состояний, отображающая взаимодействие молекулярных процессов в зоне стружкообразования и упруго-диссипативных характеристик технологической системы механической обработки.
- 2 . Предложены алгоритмы решения нелинейных задач термоупругопластичности в конечно-элементной постановке, позволяющие определять упруго-диссипативные характеристики реологической модели в зоне стружкообразования для решения задач динамики технологической системы механической обработки.
- 3 . При широком варьировании модуля упругости и предела текучести определены упруго-диссипативные характеристики для различных обрабатываемых материалов, что позволило сформировать необходимую информационную поддержку моделирующей системы.
- 4 . Проведен комплекс сопоставительных расчетных и экспериментальных исследований по обработке точением изделий из различных материалов при широком варьировании параметров обработки.

- 5 . Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превысило: по амплитуде — 16%, по частоте — 10%. Это свидетельствует о качественном соответствии характера колебаний, что дает основания утверждать о работоспособности разработанных реологических моделей.
- 6 . Рассмотрена задача оптимизации режимов механической обработки резанием на основе двухэтапного подхода с использованием критериев производительности и устойчивости технологической системы.
- 7 . С целью повышения эффективности вычислительных процедур, задача оптимизационного проектирования была сведена к построению области реализуемых режимов к задаче линейного программирования.
- 8 . На основе разработанных оптимизационных процедур, позволяющих наилучшим образом учитывать реологию контактного взаимодействия при лезвийной обработке, решена задача оптимизационного проектирования обработки точением и растачиванием изделий энергетических машин: роторов, корпусов узлов регулирования и др., что позволило повысить производительность обработки на 20 — 25 %.

Заключение и общие выводы

- 1 . В диссертационной работе в качестве основного объекта выделена актуальная проблема: исследование процессов лезвийной обработки заготовок для повышения эффективности на основе обеспечения динамической стабильности процесса стружкообразования.
- 2 . Процессы пластической деформации и разрушения при стружкообразовании рассмотрены с точки зрения теории дислокаций как результат движения и размножения дефектов кристаллической решетки деформируемого материала. Выявлены важнейшие условия возникновения пространственной неоднородности и локализации пластической деформации, что может явиться причиной неустойчивости процесса резания.
- 3 . Предложена и обоснована динамическая модель процесса стружкообразования. Зона первичной пластической деформации металла и сходящая с передней поверхности инструмента стружка предствлены как элементы сплошной среды, на ка-

ждый из которых действует динамическая нагрузка, имитирующая лезвийный инструмент. Модель достаточно универсальна и соответствует современным представлениям о механике процесса стружкообразования. Она отображает упругий отклик, процесс пластического течения и эффекты запаздывания в обрабатываемом металле в их взаимосвязи.

- 4 . Реализована обобщенная математическая модель, отображающая процесс резания с учетом упругопластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей процесса стружкообразования в зоне активного пластического деформирования. Предложена реологическая модель в виде последовательного соединения упруговязкопластической релаксирующей среды Ишлинского (отражающей процесс первичной деформации металла срезаемого слоя) и среды Фойхта с двумя упруго-диссипативными элементами (отражающей процесс деформации и трения сходящей стружки).
- 5 . На основе разработанных реологических моделей реализована задача динамического моделирования в пространстве переменных состояний, отображающая взаимодействие молекулярных процессов в зоне стружкообразования и упруго-диссипативных характеристик технологической системы механической обработки.

- 6 . Исследования реологических процессов при стружкообразовании осуществлены путем компьютерного моделирования с помощью программного комплекса COSMOS/M. Предложен ряд модельных подходов, учитывающих специфику резания металлов и обеспечивающих эффективность комплекса в описании различных режимов процесса стружкообразования. Выполненные разработки образуют основу для реализации методов и алгоритмов компьютерного моделирования при решении задач динамики процесса резания и оптимизации режимов обработки.
- 7 . Разработаны методики определения упруго-диссипативных коэффициентов реологической модели, основанные на статистической обработке данных компьютерного моделирования с помощью программного комплекса COSMOS/M.
- 8 . Осуществлено моделирование напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности в результате динамического нагружения, показавшее работоспособность предложенного подхода для определения технологических остаточных напряжений в металле поверхностного слоя обработанного изделия.
- 9 . В результате анализа основных причин, вызывающих возникновение автоколебаний, стало возможным обосновать ранее

предложенную гипотезу запаздывания силы резания, связав ее с нелинейностью процесса стружкообразования, порождаемого инерционностью пластической деформации материала в зоне резания. Получены постоянные времени запаздывания как функции характеристик обобщенной реологической модели.

- 10 . Проведен комплекс сопоставительных расчетных и экспериментальных исследований по обработке точением изделий из различных материалов при широком варьировании параметров обработки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превысило: по амплитуде — 16%, по частоте — 10%. Это свидетельствует о качественном соответствии характера колебаний, что дает основания утверждать о работоспособности разработанных реологических моделей.
- 11 . Результаты исследований, выполненных в виде технологических рекомендаций и программно-аппаратных комплексов, приняты к внедрению на АО "Ленинградский Металлический завод", АО "Электросила", НПО "Прометей", СПбГТУ и др. Учитывая актуальность и высокую эффективность выполненных разработок, АЦИА приняла решение о распространении их через "Инжиниринг-сеть России", включающую 88 промыш-

шленных центров северо-западного региона Российской Федерации.

Список Литературы

- [1] Агаркова Н.Н., Васильков Д.В., Вейц В.Л., Хитрик В.Э. *Задачи динамики ГАП механообработки // Вибротехника*. Межвуз. тематич. сб. научн. тр. — Вильнюс. 1987. 2(55). — С. 73-83.
- [2] Айзерман М.А. *Теория автоматического регулирования*. — М.: Наука, 1966. - 452 с.
- [3] Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. *Теория пластичности*. / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1987. — 352 с.
- [4] Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. *Обработка металлов резанием*. /Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1977. - 325 с.
- [5] Бетанели А.И. *Хрупкая прочность режущей части инструмента*. — Тбилиси: ГПИ, 1969. — 319 с.
- [6] Бленд Д. *Теория линейной вязкоупругости* / Пер. с англ. — М.: Мир, 1965. — 199 с.
- [7] Борисов В.И. *Проблемы векторной оптимизации*. / Исследование операций: Методические аспекты. — М.: Наука, 1977. — 91 с.

- [8] Брахман Т.Р. *Многокритериальность и выбор альтернатив в технике.* — М.: Радио и связь, 1984. — 288 с.
- [9] Бриджмен П. *Исследование больших пластических деформаций и разрыва /* Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1955. — 238 с.
- [10] Бункин В.А., Курицкий Б.Я., Сокуренок Ю.А. *Решение задач оптимизации в управлении машиностроительным производством.* — Л.: Машиностроение, 1976. — 232 с.
- [11] Валетов В.А., Васильков Д.В., Воронин А.В., Могендович М.Р. *Автоматизированная система непараметрической оценки микрогеометрии поверхности/* Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. научн. тр. Вып.2. — СПб.: СЗПИ, 1995. — С. 54-67.
- [12] Васильков Д.В. *Теория и практика оптимизационного проектирования механической обработки мало жестких заготовок /* Дисс. д-ра техн. наук. — СПб.: ГТУ, 1997. — 426 с.
- [13] Васильков Д.В. *Формирование реологических свойств поверхностного слоя материалов /* Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.3. — СПб.: СЗПИ, 1996. — С.94-99.
- [14] Васильков Д.В., Вейц В.Л., Лончих П.А. *Динамика технологической системы при обработке мало жестких заготовок —* Иркутск: Изд-во иркут. ун-та, 1994. — 98 с.

- [15] Васильков Д.В., Вейц В.Л., Лончих П.А. *Колебания в приводах металлорежущих станков* – Иркутск: Изд-во иркут. ун-та, 1997. — 200 с.
- [16] Васильков Д.В., Вейц В.Л., Максаров В.В. *Моделирование процесса стружкообразования на основе кусочно-линейной аппроксимации* / Академический вестник. Информатизация. Вып.1. — СПб.: ИМаш., 1998. — С.16-21.
- [17] Васильков Д.В., Вейц В.Л., Шевченко В.С. *Динамика технологической системы механической обработки*. - СПб.: ТОО "Инвентекс", 1997. - 230 с.
- [18] Васильков Д.В., Козлова Е.Б. *Конечно-элементная формулировка задачи контактного взаимодействия в процессе стружкообразования* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.6. — СПб.: СЗПИ, 1997. — С.64-75.
- [19] Васильков Д.В., Козлова Е.Б. *Обоснование выбора реологической модели при решении нелинейных задач вязкоупругопластичности* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.9. — СПб.: СЗПИ, 1998. — С. 36-44.
- [20] Васильков Д.В., Козлова Е.Б. *Применение интегрированного конечно-элементного комплекса COSMOS/M к решению задач*

- термоупругопластичности* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.4. — СПб.: СЗПИ, 1996. — С.122-130.
- [21] Васильков Д.В., Козлова Е.Б. *Прогнозирование остаточных напряжений в поверхностном слое материала при динамическом нагружении* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.9. — СПб.: СЗПИ, 1998. — С.45-50.
- [22] Васильков Д.В., Козлова Е.Б., Максаров В.В. *Анализ реологических уравнений для моделирования процесса резания* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.13. — СПб.: СЗПИ, 1999. — С. 47-51.
- [23] Вейц В.Л. *Динамика машинных агрегатов*. — Л.: Машиностроение, 1969. — 370 с.
- [24] Вейц В.Л. *Исследование трения покоя в направляющих скольжения при низкочастотных направленных микроколебаниях* // *Новое в теории трения*. — М.: Наука, 1966. — С.60-82.
- [25] Вейц В.Л., Дондошанский В.К., Чиряев В.И. *Вынужденные колебания в металлорежущих станках*. — М.: Машгиз, 1959. — 288 с.
- [26] Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. *Динамика управляемых машинных агрегатов*. — М.: Наука, 1984. — 352 с.

- [27] Вейц В.Л., Кочура А.Е.. *Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания.* — Л.: Машиностроение, 1976. — 384 с.
- [28] Вейц В.Л., Кочура А.Е., Мартыненко А.М. *Динамические расчеты приводов машин.* — Л.: Машиностроение, 1971. — 352 с.
- [29] Вейц В.Л., Максаров В.В. *Динамическое моделирование стружкообразования в процессе резания / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.14.* — СПб.: СЗПИ, 1999. — С.15-20.
- [30] Вейц В.Л., Максаров В.В. *Физические основы моделирования стружкообразования в процессе резания / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.13.* — СПб.: СЗПИ, 1999. — С.44-46.
- [31] Вейц В.Л., Максаров В.В., Козлова Е.Б., *Математическое моделирование процесса стружкообразования при лезвийной обработке/ Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 14.* — СПб.: СЗПИ, 1999. — С. 139-145.
- [32] Вейц В.Л., Мартыненко А.М. *Автоколебания в механических кусочно-линейных системах / Нелинейные колебания и переходные процессы в машинах.* — М.: Наука, 1972. — С. 283 - 294.

- [33] Вейц В.Л., Царев Г.В. *Динамика и моделирование электро-механических приводов.* / Саранск: Изд-во Мордовск. ун-та, 1992. - 228 с.
- [34] *Вибрации в технике: Справочник: В 6 т.* — М.: Машиностроение, 1978. — Т.1 — 352 с.
- [35] *Вибрации в технике. — Т.3: Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М.Диментбега и К.С. Колесникова.* — М.: Машиностроение, 1980. — 544 с.
- [36] Владимирова В.И. *Физическая природа разрушения металлов* — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
- [37] Габасов Р., Кириллова Ф.М. *Методы линейного программирования. Ч.1: Общие задачи.* — Минск: Изд-во БГУ, 1977. — 170 с.
- [38] Гольденблат И.И., Кошнов В.А. *Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов.* — М.: Машиностроение, 1968. — 192 с.
- [39] Давиденков Н.Н. *Динамические испытания металлов.* — М.: ОНТИ, 1936. — 395 с.
- [40] Дерягин Б.В. *Что такое трение?* — М.: Изд. АН СССР, 1963. — 230 с.

- [41] Джонсон У., Меллор П.Б. *Теория пластичности для инженеров* / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
- [42] Жарков И.Г. *Вибрации при обработке лезвийным инструментом*. — Л.: Машиностроение, 1987. — 184 с.
- [43] Зарс В.В. *Вопросы самовозбуждения вибраций металлорежущих станков* / Дисс. д-ра техн. наук. — Л.: ЛПИ, 1972. — 238 с.
- [44] Зорев Н.Н. *Вопросы механики процесса резания металлов*. — М.: Машгиз, 1956. — 368 с.
- [45] Зорев Н.Н. *Главная сила резания и новая методика ее расчета* / Новые исследования в области резания металлов. — М.: Машгиз, 1948. — С. 147 — 175.
- [46] Калитин Н.Н. *Численные методы*. — М.: Наука, 1978. — 512 с.
- [47] Карминов В.Г. *Математическое программирование*. — М.: Наука, 1975. — 272 с.
- [48] Кацев П.Г. *Статистические методы исследования режущего инструмента*. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
- [49] Каширин А.И. *Исследование вибраций при резании металлов*. — М - Л.: АН СССР, 1944. — 232 с.
- [50] Каширин А.В. *Вопросы устойчивости рабочего движения при обработке металлов резанием* / Исследование колебаний ме-

таллорезающих станков при резании металлов. — М.: Машгиз, 1958. — С.15-18.

- [51] Козлова Е.Б. *Методы численного моделирования инженерных задач с помощью программного пакета COSMOS/M* / Изд-во "Инструмент", 1998. — N 1. — С. 38-39.
- [52] Козлова Е.Б., Васильков Д.В., *Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя материала при обработке резанием* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 13. — СПб.: СЗПИ, 1999. — С. 77-85.
- [53] Козлова Е.Б., *Описание процесса резания на основе различных реологических моделей* / Современное машиностроение: Сборник трудов молодых ученых. — СПб: Изд. СПб инст. машиностроения, 1999. — Вып.1. — С.75-78.
- [54] Кудинов В.А. *Динамика станков.* — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.
- [55] Кудинов В.А. *Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания)* // Станки и инструмент, 1992, N 10. - С. 14-17, N 11. - С. 26-29.
- [56] Кучеряев Б.В. *Механика сплошных сред.* — М.: МИСИС, 1999. — 320 с.

- [57] Левина З.М., Решетов Д.Н. *Контактная жесткость машин*. — М.: Машиностроение, 1971. — 264 с.
- [58] Лесин В.В., Лисовец Ю.П. *Основы методов оптимизации*. — М.: Изд-во МАИ, 1995. — 344 с.
- [59] Лоладзе Т.Н. *Износ режущего инструмента*. - М.: Машгиз, 1958. — 356 с.
- [60] Лэсдон Л.С. *Оптимизация больших систем* / Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 432 с.
- [61] Максаров В.В. *Реологическое представление при моделировании стружкообразования в процессе резания* / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. Вып.14. — СПб.: СЗПИ, 1999. — С.21-24.
- [62] Максаров В.В. *Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке* / Дисс. д-ра техн. наук. — СПб.: ГТУ, 1999. — 340 с.
- [63] Мартынюк А.А. *Техническая устойчивость в динамике*. — Киев: Техніка, 1973. — 188 с. Машиностроение, 1985. — 496 с.
- [64] Маталин А.А. *Технология машиностроения*. — Л.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

- [65] Медведев Д.Д. *Автоматизированное управление процессом обработки резанием.* — М.: Машиностроение, 1980. — 143 с.
- [66] Меркин Д.Р. *Введение в теорию устойчивости.* — М.: Наука, 1987. — 304 с.
- [67] Могендович М.Р. *Прогнозирование качества обработки изделий точением на основе имитационного моделирования технологической системы с мало жесткими элементами /* Дисс. канд. техн. наук. — СПб.: СПбИМаш, 1999. — 207 с.
- [68] Моисеев Н.Н. *Элементы теории оптимальных систем.* — М.: Наука, 1974. — 528 с.
- [69] Мурашкин Л.С. *Исследование динамики процесса резания /* Дисс. д-ра техн. наук. — Л.: ЛПИ, 1958. — 348 с.
- [70] Мурашкин С.Л. *Вынужденные колебания самовозбуждающихся систем при вибрационной обработке материалов. /* Автоматизация и технология машиностроения. Труды ЛПИ, 1969. — N 309. — С.234-239.
- [71] Мурашкин Л.С., Мурашкин С.Л. *Прикладная нелинейная механика станков.* — Л.: Машиностроение, 1977. — 192 с.
- [72] Мурашкин С.Л. *Колебания и устойчивость движения систем станков с нелинейными характеристиками процесса резания /* Дисс. д-ра техн. наук. — Л.: ЛПИ, 1980. — 548 с.

- [73] *Оптимальный динамический синтез электромеханических приводов* / Вейц В.Л., Вербовой П.Ф., Кочура А.Е. и др. — Препринт-395. ИЭД АН УССР. — Киев, 1985. — 44 с.
- [74] *Основы динамики и прочности машин* / Под ред. В.Л.Вейца. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. — 232 с.
- [75] *Основы трибологии (трение, износ, смазка)* / Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А. и др. Под ред. А.В.Чичинадзе. - М.: Центр "Наука и техника", 1995. - 778 с.
- [76] Остафьев В.А. *Расчет динамической прочности режущего инструмента.* — М.: Машиностроение, 1979. — 160 с.
- [77] Павлов А.Г. *Экономическая эффективность снижения вибраций станков* // Машиностроитель, 1980. — N 10. — С.27.
- [78] Павлов А.Г. *Эффективность снижения колебаний в станках* // Вестник машиностроения, 1981. — N 7. — С.16-18.
- [79] Панин В.Е. *Структурные уровни пластической деформации и разрушения* — Новосибирск: Наука, 1990. — 251 с.
- [80] Петров В.М. / Дисс. канд. техн. наук. — СПб.: СПбИМаш, 1998. — 151 с.
- [81] Подураев В.Н. *Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания.* — М.: Машиностроение, 1977. - 304 с.

- [82] Полетика М.Ф. *Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов.* — М.: Машгиз, 1963. — 106 с.
- [83] Полетика М.Ф., Мелихов В.В. *Контактные нагрузки на задней поверхности инструмента* // Вестник машиностроения, 1967, N 9. — С.78-81.
- [84] *Расчет машиностроительных конструкций на прочность и жесткость.* / Н.Н.Шапошников, Н.Д.Тарабасов, В.Б.Петров, В.И.Мяченков. — М.: Машиностроение, 1981. — 333 с.
- [85] *Резание металлов и инструмент/ Под ред. А.М.Розенберга.* — М.: Машиностроение, 1964. — 227 с.
- [86] Розенберг А.М., Еремин А.Н. *Элементы теории процесса резания металлов.* — М.: Машгиз, 1956. — 319 с.
- [87] Роменская Т.В. *Повышение производительности и точности при обработке резанием крупногабаритных мало жестких заготовок* / Дисс. канд. техн. наук. — СПб.: СПбИМаш, 1998. — 151 с.
- [88] Рубашкин И.Б., Алешин А.А. *Микропроцессорное управление режимом металлообработки.* — Л.: Машиностроение, 1989. — 160 с.
- [89] Рыбин В.В. *Большие пластические деформации и разрушение металлов* — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.

- [90] Савин Г.Н., Рушницкий Я.Я. *Элементы механики наследственных сред* — К.: Вища школа, 1976. — 252 с.
- [91] Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов*. / Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
- [92] Седоков Л.М. *Уравнение для расчета силы резания*. — Томск: Томский дом ученых, 1956.
- [93] Сикора Е. *Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин* / Пер. с польск. — М.: Машиностроение, 1983. — 226 с.
- [94] Силин С.С. *Методы подобия при резании материалов*. — М.: Машиностроение, 1979. — 152 с.
- [95] Соколовский А.П. *Вибрации при работе на металлорежущих станках* / В кн.: Исследование колебаний при резании металлов. — М.: Машгиз, 1958. — С.3-23.
- [96] Старков В.К. *Дислокационные представления о резании металлов*. — М.: Машиностроение, 1979. — 160 с.
- [97] Старков В.К. *Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве*. — М.: Машиностроение, 1989. — 296 с.

- [98] Степанов М.Н. *Статистические методы обработки результатов механических испытаний*: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
- [99] Талантов Н.В. *Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента* — М.: Машиностроение, 1992. — 240 с.
- [100] Тлустый И. *Автоколебания в металлорежущих станках* / Пер. с чешск. — М.: Мир, 1965. — 395 с.
- [101] Утешев М.Х., Сенюков В.А. *Напряженное состояние режущей части инструмента с округленной режущей кромкой* // Вестник машиностроения, 1972, N 2. — С.70-73.
- [102] *Физика резания металлов*. Вып.1. Отв. ред. М.В.Касьян. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1971. — 90 с.
- [103] Хает Г.Л. *Прочность режущего инструмента*. — М.: Машиностроение, 1975. — 168 с.
- [104] Хилл Р. *Математическая теория пластичности*. / Пер. с англ. — М.: ГИТТЛ, 1956. — 407 с.
- [105] Хитрик В.Э., Шмаков В.А. *Исследование закономерностей трения скольжения в нестационарных режимах движения* // Вибротехника. Межвуз. тематич. сб. научн. тр. — Вильнюс. 1981. 2(32). — С. 97-106.

- [106] Хитрик В.Э., Шмаков В.А. *Исследование трибологических характеристик материалов в нестационарных режимах движения / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. Вып. 2. - СПб.: СЗПИ, 1996. — С. 104-119.*
- [107] Хитрик В.Э., Шмаков В.А. *Нестационарная характеристика трения скольжения в задачах динамики машин / Нелинейные задачи динамики и прочности машин. Под ред. В.Л.Вейца. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. — С. 152-175.*
- [108] Цыпкин Я.З. *Основы теории автоматических систем. — М.: Наука, 1977. — 559 с.*
- [109] Эльясберг М.Е. *Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. — СПб.: Изд-во ОКБС, 1993. — 180 с.*
- [110] Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. *Задачи и методы линейного программирования. — М.: Сов, радио, 1964. — 736 с.*
- [111] Black J.T. *On the fundamental mechanism of large strain plastic deformation. Electron microscopy of metal cutting chips. Paper. ASME, 1970. N WA/Prod - II, 22 p.*
- [112] *Fraisage: comment 'eviter le broutage // Mach. prod., 1980. — N 269. — P.45-46.*
- [113] *Introduction to COSMOS/M. — Fifth Edition, 1992.*

- [114] Mises R., *Mechanik der plastischen Formänderungen von Kristallen*.
Zeitschrift für angew, Mat. und Mech., B. 8, 1928, H. 3. S. 161-185.
- [115] Reclies S. *Ursachen zur Tntstehung Selbsttrregter Schwingungen bei
der Spanenger Bearbeitung // maschinenbant*. — 1977. — 26. — N
9. — S.403-407.
- [116] Tobias S.A. *Swingungen an Werkzeugmaschinen*. — München:
Hanser. — 1961. — 322 S.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

"СОГЛАСОВАНО"

Проректор ПИМаш



Державец Ю.А.

1995 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер АО ЛМЗ



Балашов А.П.

"18" 12 1995 г.

АКТ

внедрения результатов НИР

В соответствии с единым планом развития науки и техники предприятия коллективом научных сотрудников СПБИМаш (научный руководитель проф., д.т.н. Вейц В.Л., ответственный исполнитель доц., к.т.н. Васильков Д.В.) был проведен комплекс исследований по повышению производительности и качества при обработке фрезерованием на станках с ЧПУ маложестких сложнопрофильных заготовок ответственных изделий энергетических машин: крупногабаритные рабочие лопатки ЦНД паровых турбин и лопасти поворотно-лопастных гидротурбин. Результаты исследований в виде подсистемы модификации управляющих программ включены в соответствующие системы автоматизированного проектирования. Опытно-промышленная эксплуатация показала, что модификация управляющих программ обработки криволинейных поверхностей, в частности лопаток 28 ступени ЦНД и лопастей Волжской ГЭС, позволяет снизить трудоемкость обработки на 15-25 % при обеспечении требуемого качества. Экономический эффект при пересчете на один станок с ЧПУ составляет 9 млн. руб в год.

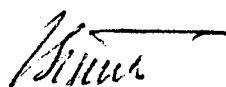
От ПИМаш:

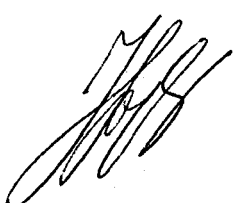
От АО ЛМЗ:

Зав.кафедрой

Главный технолог

"Теоретическая механика"

 Вейц В.Л.

 Воробьев В.Н.

Руководитель лаборатории

ЦПДС АМТС

 Васильков Д.В.

Ректору
Санкт-Петербургского
института машиностроения
М.А.Мартынову

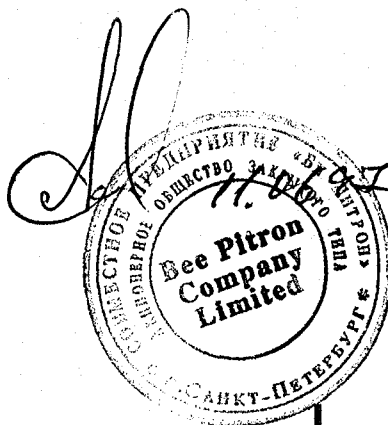
Научно-технический совет нашего предприятия рассмотрел техническое предложение "Подсистема программной модификации управляющих программ для станков с ЧПУ при механической обработке маложестких заготовок", руководитель разработки к.т.н., доц. Васильков Д.В., научный консультант д.т.н., проф. Вейц В.Л.

Экспертиза данного проекта показала следующие результаты:

- Предлагаемая разработка имеет высокую степень готовности, прошла промышленные испытания на предприятиях энергомашиностроения, внедрена в виде подсистемы расчета режимов резания для САП "Техпрол" и "Аспол".
- Информационное и программное обеспечение подсистемы реализовано с возможностью встраивания в интегрированные комплексы CAD/CAM.
- Предусмотренная возможность направленного формирования свойств поверхностного слоя обрабатываемых заготовок значительно расширяют потребительские свойства подсистемы по сравнению с другими аналогичными разработками.
- Финансовая проработка проекта показала, что включение подсистемы в состав модулей интегрированного комплекса "Cimatron it" позволит обоснованно увеличить его стоимость на 10% при сохранении спроса на рынке программных продуктов мирового класса (стоимость комплекса составляет 65000 USA\$).
- Подсистема рекомендуется для включения в виде модуля в комплекс "Cimatron it".
- Разработчику предлагается подготовить технический проект указанной подсистемы для открытия финансирования в 1998 г.
- Окончательное решение по финансированию проекта принимается головной фирмой Cimatron Ltd.

Генеральный директор
фирмы "БИ ПИТРОН",
к.т.н.

Е.И.Яблочников




BEE PITRON

**Инженерная академия
отделение
Машиностроение и
инженерная механика**

Проректору по научной
работе СПбИМаш
академическому советнику РИА
Ю.А. Державцу

N

Об использовании результатов научных исследований

На Ваш запрос относительно эффективности использования результатов научно-исследовательских работ, проводимых по планам отделения "Машиностроение и инженерная механика" СПб ИА под научным руководством академического советника СПб ИА доц., к.т.н. Василькова Д.В. при научной консультации академика МИА, РИА проф. д.т.н. В.Л. Вейца сообщаем следующее.

В соответствии с планом работы секции "Технология прецизионных поверхностей и кромок" выполнены следующие разработки:

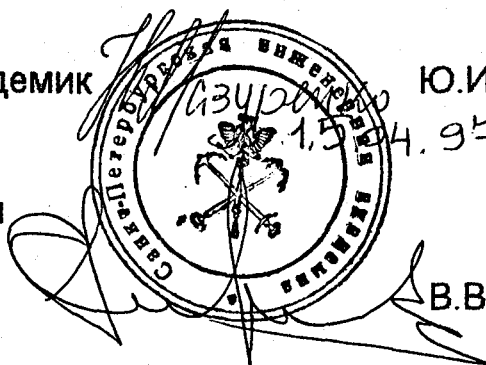
- прогнозирование свойств поверхностного слоя изделий при различных видах механической обработки;
- мониторинг состояния поверхностного слоя изделий по результатам измерений;
- программная модификация механической обработки мало жестких заготовок на станках с ЧПУ;
- стационарный измерительно-вычислительный комплекс определения вязко-упруго-пластических характеристик поверхностного слоя конструкционных материалов;
- стационарный измерительно-вычислительный комплекс определения трибологических характеристик поверхностного слоя изделий.

Перечисленные разработки включены в перечень передовых НИОКР для внедрения на предприятиях Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона РФ под эгидой отделения "Машиностроение и инженерная механика".

Главный ученый секретарь, академик

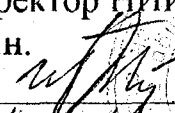
Ю.И. Мазуренко

**Академик-секретарь отделения
"Машиностроение и инженерная
механика" Санкт-Петербургской
Инженерной академии**



В.В.Смирнов

УТВЕРЖДАЮ
Директор НИИ «Энергосталь»
д.т.н.


И. А. Повышев
«14» 11 1999 г.



ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

Настоящий акт составлен в том, что по кооперации между НИИ «Энергосталь», АО «НИТИ Энергомаш», АО ЛМЗ, АО «Электросила» и СпбИМаш был выполнен комплекс работ по модификации управляющих программ для станков с ЧПУ при токарной обработке крупногабаритных заготовок ответственных изделий энергетических машин с направленным формированием свойств их поверхностного слоя. На основе разработанной автоматизированной системы была осуществлена программная модификация обработки точением крупногабаритных ступенчатых валов, роторов турбин, корпусов узлов регулирования гидротурбин. Работы выполнены коллективом сотрудников в составе: д.т.н., проф. Д.В.Васильков (научный руководитель), д.т.н., проф. В.Л.Вейц (научный консультант), асп. С.Д.Данчишен, асп. Е.Б.Козлова.

Промышленные испытания показали, что модифицированные управляющие программы дают снижение машинного времени при обработке на 25-30 процентов при одновременном повышении качества. Эффективность внедрения на один станок с ЧПУ составляет в среднем 10 тыс. рублей в год в ценах 1999 г.

Старший научный сотрудник,
к.т.н.



В.В.Цуканов