

На правах рукописи

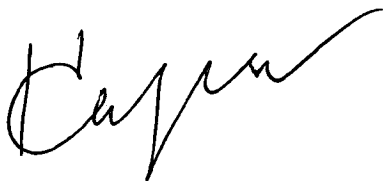
Карпачев Андрей Юрьевич

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКОВ РЕЖУЩИХ
ИНСТРУМЕНТОВ

05.02.07 – Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный консультант: академик РАН, доктор технических наук, профессор
Колесников Константин Сергеевич

Официальные оппоненты: **Гусев Владимир Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Никитин Илья Степанович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела информатизации, математического моделирования и управления, Институт автоматизации проектирования РАН

Маслов Андрей Руффович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, Московский государственный технологический университет «Станкин»

Ведущая организация: Тульский государственный университет

Защита состоится 10 февраля 2016 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7(499)2670963

Автореферат разослан « » ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

Актуальность работы. Процесс распиловки или разрезки является одним из распространенных технологических процессов в заготовительном производстве и обрабатывающих отраслях народного хозяйства, связанных с резанием материалов естественного (древесина, геологические породы) и искусственного (полимеры, композиты, металлические сплавы) происхождения. Как правило, он реализуется с помощью инструментов, относящихся к лезвийным и абразивным дисковым режущим инструментам, в виде круглых пил, алмазных отрезных кругов и дисковых фрез.

Распиловка сопровождается вынужденными изгибными колебаниями диска - корпуса инструмента, опасное нарастание амплитуды которых происходит при динамической потере его устойчивости, когда угловая скорость инструмента оказывается кратной собственной частоте колебаний вращающегося диска. На практике динамическая потеря устойчивости корпуса режущего инструмента ограничивает использование больших скоростей резания. К факторам, снижающим динамическую устойчивость, принадлежит неравномерный нагрев корпуса в радиальном направлении, который также может вызвать потерю устойчивости плоской формы равновесия инструмента. Появление необратимых искажений плоской формы инструмента приводит к полной утрате его работоспособности и возможности использования.

Для повышения динамической устойчивости применяют методы улучшения конструкции дисков. Это создание температурных компенсаторов в виде прорезей различных конфигураций, формирование предварительно напряженных зон в дисках и т.д. Однако данные мероприятия требуют высококвалифицированного технического персонала, выполняются на основе ранее полученного опыта и во многих случаях интуитивно, методами подгонки. Указанные обстоятельства требуют комплексного научного подхода к исследованию резервов увеличения производительности распиловки дисковыми инструментами.

В связи с массовым применением круглых пил во многих отраслях промышленности разработка научных основ и методов повышения их работоспособности является актуальной научной проблемой.

Цель работы: повышение эксплуатационных характеристик дискового режущего инструмента на основе разработки научных методов расчета и управления параметрами динамического поведения корпусов инструмента.

Для достижения цели в диссертации поставлены и решены задачи

- разработка математической модели динамического поведения круглых пил и фрез с учетом их конструктивных особенностей, силового нагружения и температурного воздействия,
- формулировка и решение задач устойчивости и собственных колебаний тонких дисков для определения критических режимов эксплуатации инструментов,
- теоретическое исследование процессов, связанных с подготовкой дискового инструмента к работе, для разработки методик ее вальцевания и термопластического способа создания остаточных напряжений,

- решения задачи динамики сферического движения отрезных кругов для определения запаса усталостной прочности диска инструмента,
- исследования устойчивости и свободных колебаний сегментного инструмента при действии сосредоточенной силы,
- экспериментального подтверждения разработанных теоретических методов расчета.

Научная новизна

1. На основе фундаментальных положений механики деформируемого твердого тела обоснована и разработана система уравнений определения в условиях неравномерного нагрева динамических характеристик предварительно напряженного, вращающегося дискового режущего инструмента, расчет которых позволяет назначать параметры корпусов режущих инструментов с заданной динамической устойчивостью при его эксплуатации.
2. На основе исследований устойчивости дисков режущих инструментов при температурном воздействии установлена взаимосвязь геометрических параметров радиальных температурных компенсаторов и устойчивости плоской формы корпуса инструмента при его неравномерном нагреве.
3. На базе основных положений деформационной теории пластичности разработан расчетный метод определения создаваемых вальцеванием остаточных напряжений в дисках режущих инструментов и установлены значения технологических параметров вальцевания, обеспечивающих заданный уровень остаточного напряженного состояния корпуса инструмента.
4. Разработан метод расчета температур неравномерного нагрева дискового режущего инструмента для создания максимально допустимых остаточных напряжений термопластическим способом на этапе его подготовки к эксплуатации, не вызывающих нарушения плоскостности диска инструмента.
5. Для пространственного движения вращающихся дисковых инструментов, вызывающего действие относительных, переносных и кориолисовых сил инерции, установлены ограничения на угловую скорость поворота оси инструмента из условия его прочности.

Достоверность результатов работы базируется на применении методов, построенных на основных положениях теории упругости и пластичности, использовании классических уравнений теории растяжения и изгиба тонких круглых пластин, проверке разработанных компьютерных программ на тестовых и модельных задачах, подтверждена сопоставлением и удовлетворительным совпадением с данными проведенных экспериментов и результатами опытов, полученными другими авторами.

Практическая значимость работы заключается в создании научно обоснованного комплекса методов, направленных на повышение работоспособности быстровращающихся режущих инструментов дискового типа, в том числе в условиях неравномерного температурного воздействия.

1. Для проектантов и конструкторов разработаны программные продукты для расчета:

- допустимых частот вращения корпусов инструментов с учетом их закрепления и температурных условий эксплуатации;

- рациональных толщин диска режущего инструмента на этапе его проектирования с учетом реальных условий его эксплуатации;

2. Для технологов разработаны программы расчета:

- режимов вальцевания, обеспечивающих максимально возможное повышение устойчивости инструмента в процессе резания;

- допустимого температурного перепада, создаваемого термопластическим методом в диске при подготовке его к эксплуатации (Свидетельства Гос. рег. программ для ЭВМ №2013617463, №2013617766).

Разработаны методики назначения технологических параметров на этапе подготовки дисков к эксплуатации вальцеванием и термопластическим способом.

Предложен метод расчета динамических характеристик дисков, определяющих максимально допустимую скорость их вращения при эксплуатации, который обеспечивает достижение наибольшей производительности как одно пильных станков, так и более прогрессивного многопильного станочного оборудования, в частности, при использовании в нем инструментальных блоков, состоящих из пил разных диаметров и толщин.

Разработаны методики, алгоритмы и программы их реализации для расчетов при конструировании и подготовке к эксплуатации тонких дисков для создания инструментов с заданными параметрами, а также проведения его модернизации с целью повышения эксплуатационных характеристик уже существующих конструкций дискового инструмента.

Использование разработанных методов позволяет выполнять анализ эксплуатационных характеристик инструмента иностранного производства, что дает возможность его эффективного применения на отечественном оборудовании, а также организовать производство высококачественного инструмента на основе импортного полуфабриката заготовок корпусов дисковых инструментов.

Практические рекомендации по результатам работы использованы и внедрены на ЗАО «ПК ПИЛАТЭКС», ООО «Тюменский станкостроительный завод», ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», ОАО ВНИИДМАШ «СТАНКОМЭЗ», в Институте машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, в ОАО «МПО по выпуску алмазного инструмента», а также внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- 1) методы исследования динамического поведения дисковых режущих инструментов, позволяющие осуществлять выбор рациональных и предельно допустимых параметров их эксплуатации;
- 2) влияние формы и размеров дискового инструмента на его устойчивость при неравномерном нагреве;
- 3) метод расчета требуемых растягивающих остаточных напряжений в корпусе инструмента при его подготовке к эксплуатации методом вальцевания;
- 4) метод определения остаточных напряжений при термопластическом способе подготовки инструмента к эксплуатации;

- 5) экспериментальные результаты работы по обоснованию и проверке полученных расчетных данных на основе разработанных методов;
- 6) научно обоснованные рекомендации по практическому использованию разработанных методов, алгоритмов и программ.

Апробация работы. Основные положения диссертации и полученные результаты докладывались на:

- Вторая международная научная конференция. «РКТ: фундаментальные и прикладные проблемы», (Москва, 2003г.);

- Первая международная научно-техническая конференция, посвященная 90-летию В.Н. Челомея, (Москва, 2004г.);

- Международная научная конференция, посвященная 90-летию В.И. Феодосьева. «Фундаментальные и прикладные проблемы механики». (Москва, 2006г.);

- Вторая международная научно-техническая конференция, посвященная 95-летию В.Н. Челомея, (Москва, 2009г.);

- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета по итогам научно-исследовательских работ за 2009 г., посвященная 90-летию Московского государственного университета леса, (Москва, 2010г.);

- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета по итогам научно-исследовательских работ за 2010 г., посвященная Международному году лесов, (Москва, 2011г.);

- Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета по итогам научно-исследовательских работ за 2011 г. (МГУЛ), (Москва, 2012г.);

- Шестая всероссийской конференция «Необратимые процессы в природе и технике», (Москва, 2011г.);

- Седьмая всероссийской конференция «Необратимые процессы в природе и технике». (Москва, 2013г.);

- Третья международная научно-технической конференции, посвященная 100-летию В.Н. Челомея, (Москва, 2014);

- Abstracts of International Scientific Conference Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development, (Москва, 2014 г.)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в виде грантов Президента РФ для ведущих научных школ № НШ-6108.2006.8, № НШ-1311.2008.8, № НШ-5271.2010.8, № НШ-4748.2012.8, грантов РФФИ № 10-01-00712, 10-01-07045, 13-01-00853 (руководитель акад. РАН К.С. Колесников).

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 35 работ, из них 18, входящих в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ общим объемом 11,12 п.л./9,81 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложения. Материалы исследований изложены в работе на 277 страницах с ил. , 25 табл. и прил. В список литературы включен 191 источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, определена степень научной новизны, практической значимости и достоверности полученных результатов.

Первая глава диссертации посвящена описанию задач, решение которых позволяет улучшить динамические характеристики конструкций дискового инструмента и совершенствовать технологии его подготовки к эксплуатации. Представлена классификация дисковых режущих инструментов, выбранных в качестве объекта диссертационного исследования.

В главе приведен обзор и вид конструкций дисковых инструментов в зависимости от материала подвергаемого распиловке. В деревообработке из отечественного дискового режущего инструмента используют «пилы дисковые для бревнопильных станков и автоматических линий». В камнеобработке применяют алмазные отрезные круги, которые подразделяются на «Алмазные отрезные сегментные круги» и «Алмазные отрезные круги» со сплошной кромкой. Для разрезания полимерных и композитных на их основе материалов применяют дисковый инструмент в виде фрез. Из приводимых в работе чертежей видно, что корпус фрез, применяемый для распиловки, имеет переменный осевой профиль, то есть переменную толщину в радиальном направлении. Это же характерно строгальным пилам для деревообработки с двухконусным или одноконусным поднутрением корпуса, а также дисковым ножам, которые, как правило, имеют коническую форму профиля вдоль радиуса и предназначены для резки бумаги, стекловаты, тканых материалов. Конструкция и эксплуатация указанных инструментов соответствуют ГОСТ 20317-74 - 20329-74, ГОСТ 980-80, ГОСТ 16230-81, ГОСТ 2679-93, ГОСТ Р 54489-2011 (ЕН847 -1:2005).

К началу 90-х годов прошлого века был накоплен значительный экспериментальный материал, подтверждающий сформировавшийся к тому времени научный потенциал, связанный с основными закономерностями поведения плоских круглых пил на этапах подготовки к работе и последующей эксплуатации. Наиболее существенное значение в исследованиях работоспособности этих инструментов принадлежала А.Э. Грубе, Н.К. Якунину, С.М. Хасдану, Ю.М. Стахиеву, В.В. Амалицкому, А.А. Настенко, R. Szymani, G.S. Schajer и другим ученым.

Главной задачей при конструировании дисковых инструментов является создание рациональных конструкций, обеспечивающих максимально возможную эффективность их работы. В ряду технологических требований, определяющих эффективность и предъявляемых к таким инструментам, основное место отводится высокой производительности. В свою очередь скорость резания, как характеристика производительности процесса распиловки, пропорциональна частоте вращения инструмента.

Исследуя аксиальные колебания диска, Кэмпбелл установил его критическое число оборотов (в секунду), связанное с резонансными явлениями при вынужденных колебаниях

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{\Omega_n}{n}, \quad (1)$$

где Ω_n - частота собственных колебаний, а n – число узловых диаметров.

Для дисковых режущих инструментов источником и причинами возбуждения колебаний являются сила резания, создающая переменное воздействие за счет вращения диска, и несовпадение оси вращения инструмента с его главной центральной осью инерции. В связи с этим, угловая частота вращения диска при распиловке задается не превосходящей наименьших из критических значений, определяемых по формуле (1), что является ограничением для обеспечения высоких скоростей резания.

Параметр собственной частоты Ω_n , входящий в формулу (1) зависит от геометрических размеров корпуса инструмента, условий его закрепления, а также внутреннего напряженного состояния, которое предварительно создается в нем на этапе подготовки к работе и изменяется в процессе эксплуатации.

Для оценки работоспособности дискового инструмента необходимо определение предельных значений характеристик конструкции, на основе которых возможен обоснованный выбор допустимых параметров подготовки инструмента к эксплуатации и его последующей работы. На стадии создания в диске предварительного остаточного напряженного состояния для компенсации температурных напряжений, используя его вальцевание или термопластический метод, ограничивающим фактором является потеря устойчивости плоской формы равновесия инструмента. При эксплуатации в качестве ограничения выступает динамическая устойчивость диска, связанная с его критической частотой вращения, определяемая с учетом неравномерных температурных воздействий. Идея такого подхода получила развитие в монографиях Ю.М. Стахиева в приложении к конструкциям пил для деревообработки.

Первоначально в качестве эффективной меры повышающей сопротивление потере устойчивости дискового инструмента от неравномерного радиального нагрева использовалась проковка – обработка средней зоны диска с двух сторон проковочными молотками на пилоправной наковальне, для создания в нем остаточных напряжений растяжения, компенсирующих температурные напряжения сжатия, обусловленных неравномерным нагревом в процессе эксплуатации.

В работе Г.С. Гуркина впервые предложен расчет напряжений в диске, возникающих при этой технологической операции, а также допускаемые осевые остаточные деформации диска, при которых он сохраняет устойчивое состояние плоской формы равновесия. Однако многие физические аспекты в постановке этой задачи автором не были учтены. В задаче определения напряженного состояния конструкции, в которой при нагружении возникают

упруго пластические деформации, принцип независимости действия сил неприменим. При этом создаваемые остаточные напряжения в диске зависят от схем последовательности проковки, которая нигде не оговаривается. Неверно утверждение о том, что при локальной проковке молотком с круглым бойком пластическая деформация во всех направлениях плоскости пилы одинакова и относительные остаточные деформации в окружном - ε_θ и радиальном - ε_r , направлении равны. Следуя этому допущению, необходимо утверждать, что после проковки в каждой точке диска независимо от значения его радиуса остаточные окружные и радиальные деформации одинаковы, а это, как известно, не соответствует действительности.

Создание осевых деформаций пилы в зоне проковки предполагало уменьшение ее толщины, которое оказалось значительно меньше допускаемых значений неравномерности толщин самого полотна пилы (ГОСТ 980-80 С.20). На практике это означало невозможность организации контроля уменьшения толщины диска в процессе его проковки, то есть контроля качества подготовки пилы к эксплуатации. Это обстоятельство в сочетании с необходимостью подготовки к работе пил больших диаметров послужило поводом к разработке и созданию соответствующего оборудования. Проковка диска была заменена на его вальцевание по окружности – прокатке между двумя вальцовочными роликами на специальных станках (ПВ-20, ПВ-35). Тогда же на основе экспериментальных исследований, полученных при вальцевании круглых пил как по одной, так и нескольким окружностям, была обоснована и признана наиболее эффективной подготовка к эксплуатации инструмента вальцеванием его корпуса по одной окружности.

Однако теоретические разработки по расчету режимов обработки этим способом велись с позиций расчетных зависимостей для проковки диска и отношение деформаций $\varepsilon_\theta / \varepsilon_r$ в них, определялось лишь формой инструмента – вальцовочных роликов. Выводы по исследованию результатов вальцевания прямоугольных пластинок при этом применялись непосредственно к вальцеванию дисков, что вносило существенные погрешности в определение создаваемого напряженного состояния.

Поэтому задачей работы являлась разработка метода расчета создаваемых максимальных значений остаточных напряжений, не допускающих потерю устойчивости диска, в зависимости от технологических параметров вальцевания.

Создание поля остаточных напряжений при подготовке диска к эксплуатации может быть осуществлено также термопластическим методом, который заключается в неравномерном нагреве диска по его радиусу, когда температура периферийной зоны диска значительно выше его центральной с последующим равномерным охлаждением. Некоторые фирмы усовершенствовали этот метод и называют его точечным термопластическим, используя нагревание периферии диска в отдельных точках лучом лазера.

В предлагаемой диссертации развитие термопластического метода базируется на решение проблемы теоретического определения остаточных напряжений и температурного перепада, способного вызвать остаточные напряжения, приводящие к искажению центральной зоны диска. Известно, что для дисков равных диаметров, но разной толщины h , одинаковый уровень значений остаточных напряжений в разной степени влияет на устойчивость их плоской формы равновесия. Поэтому необходимо установление связи между соотношениями геометрических параметров диска и максимальным значением избыточной температуры $\Delta T_{кр}$ термопластического метода, при которой плоская форма равновесия после его применения становится неустойчивой. Очевидно, для дисков, у которых $\Delta T_{кр}$ выше температуры отпуска материала, подвергать их такой термопластической обработке нерационально.

К числу важных вопросов принадлежит определение доли напряжений от сил резания в балансе напряженного состояния при распиловке. Как было установлено предшествующими исследователями, напряжения в дисках рассматриваемого круга инструментов от сил резания пренебрежимо малы по сравнению с напряжениями, возникающими от неравномерного нагрева и вальцевания. Для более углубленного изучения этого вопроса были привлечены и проанализированы исследования непосредственно по устойчивости круглых пластин под действием сосредоточенной силы, представленных в работах профессоров Л.И. Балабуха, Н.А. Алфутова, В.Л. Бидермана. На их основе был сделан вывод о том, что радиальная сила при потере устойчивости значительно больше сил резания, возникающих при распиловках рассматриваемым дисковым инструментом.

Выбор режимов эксплуатации дисков тесно связан с исследованием кинематических характеристик роботизированных пильных узлов, так как сложное движение быстровращающегося диска может приводить к возникновению деформаций его изгиба, что сопровождается действием переменных напряжений, способствующих усталостным разрушениям. Поэтому исследования зависимости деформаций от кинематических характеристик сферического движения диска в пространстве имеют большое значение.

В заключительной части первой главы приведено рассмотрение специальных конструкций инструментов, в которых для снижения негативных влияний неравномерного нагрева корпуса инструмента, присутствуют температурные компенсаторы, выполняемые в виде прорезей. Проведенными к настоящему времени исследованиями (диссертация М.А. Пустоваловой «Обоснование рациональных параметров компенсационных прорезей в круглых дереворежущих пилах для улучшения их эксплуатационных свойств») установлено, что радиальные прорези от периферии диска к его центру более эффективны по сравнению, как с окружными прорезями, так и прорезями от центра к внешнему контуру. Кроме того дисковый инструмент с такими компенсаторами более технологичен и допускает повторное использование корпуса после соответствующей подготовки. Вместе с тем зада-

ча определения влияния количества и размеров прорезей на устойчивость и динамику инструмента не решалась. А это существенно ограничивает возможности достоверного выбора допустимых скоростей резания при распиловке выбранным инструментом. Однако присутствие системы компенсаторов в корпусе инструмента ведет к значительному снижению его динамической устойчивости. Определение допустимых частот вращения для такого типа дисков на основе использования экспериментального оборудования, как и современных пакетов численных методов ANSYS, Abaqus и т.п., оправдано лишь для уточнения и подтверждения данных, полученных более эффективными приближенными методами расчета для проектирования дисковых инструментов.

По существу целью работы является решение проблемы повышения эксплуатационных характеристик широкого круга дисковых инструментов, производительность которых определяется частотой вращения, ограниченной динамической устойчивостью корпуса инструмента в условиях неравномерного радиального нагрева. В основу ее решения положена разработка теоретических методов повышения динамической устойчивости режущих инструментов в виде металлических дисков без учета применяемых на них режущих элементов (зубьев или сегментов), а также действия сил резания и внешнего охлаждения.

Во второй главе диссертации приведена разработка математической модели динамики режущих инструментов фрезерно-круглопильных станков. Ее последующее применение основано как на сочетании двумерной модели корпуса диска с одномерной моделью режущего сегмента, так и их самостоятельное использование при описании отдельных конструкций, поведения дисков и физических процессов, протекающих в них при подготовке к эксплуатации.

Двумерная модель построена на общей теории изгиба тонких круглых пластин, в которой учитывается влияние на прогиб напряжений, действующих в срединной поверхности пластины, в рамках классических гипотез Кирхгофа и уточнений Т. Кармана. Для таких пластин отношение наружного радиуса c к толщине h лежит в интервале $30 < c/h < 100$.

Описание двумерной модели включает деформационные соотношения, связывающие перемещения точек пластины с ее деформацией, уравнения равновесия и физические зависимости напряжений от деформаций. Приводимые общие уравнения в дальнейшем в целях наиболее эффективного применения при формулировке задач преобразованы и уточнены в зависимости от конкретных расчетных случаев поведения дисков.

Одномерная модель представлена в работе в виде тонкой упругой криволинейной полосы с большой жесткостью в плоскости ее оси и малой – во второй главной плоскости. В соответствии с этим выбиралась схема деформирования, физические соотношения и получены линеаризованные уравнения равновесия.

Представленные модели позволяют рассматривать широкий класс цельно-корпусных (неразборных) металлических дисковых инструментов, и необходимы для формулировки и решения задач, связанных с повышением их работоспособности.

Третья глава диссертации включает постановку и формулировку задач, связанных с исследованиями устойчивости и собственных колебаний инструментов, а также описание метода их решения.

Первая задача посвящена определению температурных напряжений и критических температур в диске при его потере устойчивости плоской формы равновесия от неравномерного нагрева.

Определение критических температур, при которых происходит потеря устойчивости плоской формы равновесия диска, относится к задачам об исследовании предельных состояний применения дисковых инструментов. С одной стороны решение этой задачи позволяет определить температурное состояние, при котором возможна его эксплуатация, а с другой - найденное решение дает полное представление о напряженном состоянии диска непосредственно перед потерей устойчивости. Это важно для его подготовки к эксплуатации при создании предварительного напряженного состояния, повышающего сопротивление потере устойчивости от неравномерного температурного воздействия.

При постановке задачи выбран заземленный фланцами диск переменной толщины, как показано на Рис. 1. В качестве функции температурного перепада вдоль радиуса диска использованы три возможные зависимости, аппроксимирующие температурный перепад (неравномерный нагрев) в виде

$$\tilde{T}_i = \tilde{\lambda} \cdot f_i(\tilde{r}), i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где

$$f_1(\tilde{r}) = \left(\frac{1 - \tilde{r}}{1 - \tilde{k}_a} \right)^{n_1}, f_2(\tilde{r}) = 0,5(1 - \cos(\tilde{p})), f_3(\tilde{r}) = \left(\frac{\tilde{r} - \tilde{k}_a}{1 - \tilde{k}_a} \right)^{n_1},$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{\alpha \cdot c^2 \eta}{h_0^2} \lambda, \quad \tilde{k}_a = a/c \leq \tilde{r} = r/c \leq 1, \tilde{p} = 2\pi \cdot (1 - \tilde{r}) / (1 - \tilde{k}_a), \eta = 12(1 - \mu^2),$$

(безразмерные функции $f_1(\tilde{r})$, $f_2(\tilde{r})$, $f_3(\tilde{r})$ распределения температуры с максимальным значением соответственно на внутреннем контуре, в середине и на внешнем контуре диска)

λ - максимальная температура неравномерного нагрева,

α - температурный коэффициент расширения, μ - коэффициент Пуассона,

h_0 - характерная толщина диска, а параметр n_1 может быть принят равным 1, 2 ... 4.

Постановка задачи предполагает также определение влияния температурных компенсаторов в виде радиальных прорезей на значение критической температуры диска при неравномерном нагреве. Такой диск, изображенный на Рис. 2, рассмотрен в виде системы, которая состоит из круглой пластины и присоединенных к ее внешнему краю тонких криволинейных полос.

Вторая задача заключается в исследовании собственных динамических характеристик инструмента (с компенсаторами и без них) с учетом его вращения, неравномерного нагрева и конструктивных особенностей закрепления.

Внутреннее напряженное состояние оказывает существенное влияние на собственные динамические характеристики конструкций, достоверное определение которых необходимо для выбора и обоснования допустимых эксплуатационных режимов (частот вращения).

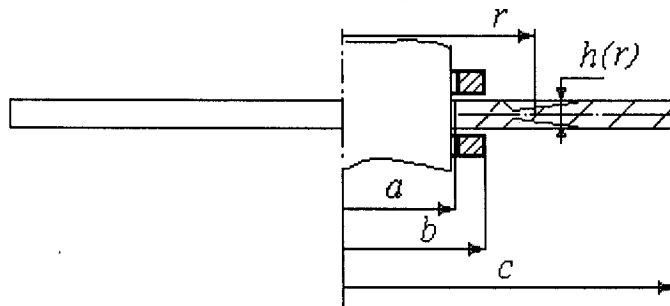


Рис.1. Конструктивная схема закрепления диска

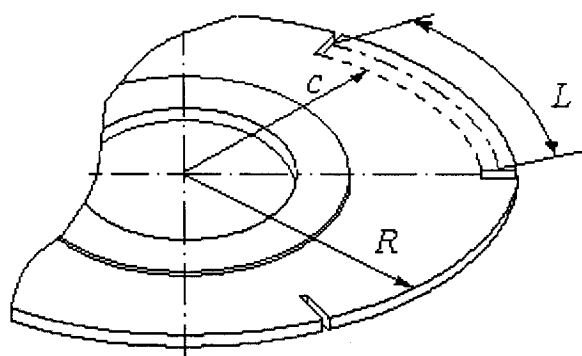


Рис. 2. Радиальные температурные компенсаторы

Из числа факторов, влияющих на образование напряжений в диске, рассмотрен неравномерный нагрев и силы инерции.

Чтобы учесть их взаимное влияние на динамические характеристики, постановка задачи на собственные значения построена на использовании результатов предварительного исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) двумерной модели, обусловленного указанными факторами. При этом задача на собственные значения состоит в определении собственных частот и форм колебаний вращающихся кольцевых пластин для известного температурного поля неравномерного нагрева и заданных граничных условий. В ее основу положена соответствующим образом сформулированная краевая задача с привлечением линеаризованных уравнений, описывающих осевые колебания круглых пластин.

При линеаризации системы дифференциальных уравнений за основное состояние принято НДС, обусловленное действием центробежных сил и температуры.

Задача предполагает рассмотрение учета влияния температурных компенсаторов в виде радиальных прорезей на динамические характеристики диска. Для этого применен известный прием разделения системы на более простые подсистемы. В задачах о свободных колебаниях систем с распределенными параметрами его называют методом гармонических коэффициентов влияния. В рассматриваемом случае система разделяется на две подсистемы: пластина и набор криволинейных полос на ее контуре, влияние которого при гармонических свободных колебаниях учитывалось действием распределенной силы инерции, обусловленной свободными колебаниями криволинейных полос.

Третья задача посвящена определению напряженного состояния диска после его вальцевания.

Неравномерный нагрев пил и фрез, возникающий при распиловке, в зависимости от характера распределения температуры может приводить к потере устойчивости плоской формы равновесия диска без узловых окружностей и n числом узловых диаметров. Это явление обусловлено возникновением в пластине сжимающих напряжений. Создание в диске определенного предварительного поля растягивающих напряжений позволяет в значительной степени уменьшить опасность потери устойчивости. В инженерной практике это достигается вальцеванием диска по одной окружности. Его сущность заключается в создании внутренних (остаточных) напряжений. В связи с этим встает задача определения места, степени и целесообразности вальцевания, предполагающая учет ограничений при создании остаточных напряжений. Дело в том, что, с одной стороны, существует опасность разрушения диска при вальцевании, а с другой, - наведенные остаточные напряжения сами в свою очередь могут приводить к потере устойчивости плоской формы равновесия.

Еще одно проявление действия остаточных напряжений заключается в повышении собственных частот, соответствующих формам колебаний диска с числом узловых диаметров $n \geq 2$. Это создает возможность увеличивать допускаемую рабочую частоту вращения дискового режущего инструмента. Процесс вальцевания представлен как симметричное сдавливание диска (Рис. 3 а) абсолютно жесткими кольцами радиуса r_p , толщины δ_p с силой $\bar{P}$.

Расчетная схема изображена на Рис.3 б). Напряжение σ_z , вызванное вальцеванием, принято постоянным в пределах кольцевого элемента $r_p - \delta_p/2 \leq r \leq r_p + \delta_p/2$. Также принято, что напряженное состояние в указанных пределах этой зоны трехосное, в остальной области диска – двухосное. По толщине диска напряжения имеют постоянное значение.

Технологический процесс вальцевания представлен с позиций деформационной теории пластичности, разработанной в работах Генки и А.А. Ильюшина. В частности, А.А. Ильюшин ввел понятие так называемого «простого», или пропорционального нагружения, при котором все составляющие внешних нагрузок изменяются в процессе нагружения пропорционально одному параметру. Он же установил эквивалентность простого нагружения и простого деформирования. В рассматриваемом случае в диске

как в упруго-пластическом теле под действием силы возникают в указанной кольцевой зоне пропорционально изменяющиеся и считающиеся известными осевые напряжения, вызывающие упруго-пластические деформации.

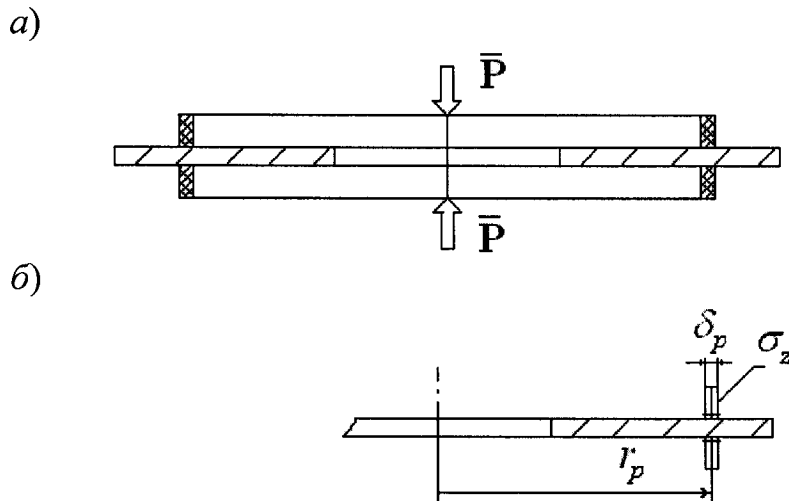


Рис. 3. Модель процесса вальцевания диска (а) и его расчетная схема (б)

После снятия нагрузки наступает процесс разгрузки. Причем в деформационной теории принято, что при активном деформировании тело ведет себя как нелинейно-упругое, а при разгрузке - как линейно упругое.

Остаточные напряжения возникают в диске в результате разгрузки, наступающей после упруго-пластической деформации, создаваемой вальцеванием по окружности. Для определения остаточных напряжений использована известная из теории пластичности теорема о разгрузке. В соответствии с этой теоремой, доказанной Генки, применимой и к рассматриваемому типу напряженного состояния, остаточные напряжения равны разности между напряжениями в упругопластическом теле и напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении о линейной упругости материала.

Четвертая задача связана с подготовкой диска термопластическим методом.

Сформулирована задача о создании упруго-пластических деформаций и последующей разгрузке материала диска в результате неравномерного нагрева и охлаждения вдоль радиуса. При этом избыточный перепад температур существенно выше критических значений, соответствующих потере устойчивости плоской формы равновесия диска.

Пятая задача заключается в исследовании деформаций отрезного диска при сферическом движении.

В роботизированных деревообрабатывающих комплексах дисковый инструмент приводится в исполнительное положение, совершая сложное движение в пространстве (Рис. 4). Подобное характерно и для работы быстровращающихся циркулярных пил, входящих в навесное оборудование валочно-

пакетирующей техники. В связи с этим сформулирована задача определения напряженно - деформированного состояния диска в зависимости от кинематических характеристик указанного движения.



Рис.4. Фрагменты пространственного движения пильного узла

Ее решение направлено на существенное снижение риска возникновения высоких переменных напряжений и обусловленных ими усталостных разрушений корпуса пил.

Шестая задача представлена как задача о собственных колебаниях и устойчивости предварительно нагруженного плоского криволинейного режущего сегмента инструмента и сформулирована на основе уравнений одномерной модели, применимой к пильному диску, имеющему вырезы и прорезы с длиной, соизмеримой с длиной его радиуса.

Формулировки представленных задач основаны на одномерных двухточечных краевых задачах, включающих полную систему дифференциальных уравнений и граничные условия. В диссертации для их решения выбран один из распространенных численных методов – метод начальных параметров, основанный на сведении краевой задачи к задаче Коши, то есть сведении краевой задачи к ряду задач для той же системы уравнений, но с начальными, а не граничными условиями.

Решение поставленных задач, включающих исследование закономерностей, связанных с конструированием и подготовкой к использованию дисков режущих инструментов необходимо для определения допустимых и рациональных конструктивных параметров и технологических режимов при их создании.

Четвертая глава включает обзор и исследование механических свойств инструментальных сталей для изготовления дисковых режущих инструментов при повышенных температурах, что необходимо для назначения технологических режимов подготовки инструментов к эксплуатации термостатическим методом.

Определение режимов подготовки новыми расчетными методами с использованием известных данных температурных зависимостей физико-механических свойств закаленных и отпущенных сталей 9ХФ, 9ХФМ позволяет в дальнейшем (глава 5) проверить правомерность этих методов, путем сравнения полученных теоретических и опубликованных экспериментальных результатов.

В связи с неоднозначностью и большим разбросом (до 30%) данных по механическим свойствам быстрорежущих сталей при повышенных температурах, приводимых в справочной литературе, для получения более достоверных результатов расчетов, получаемых на основе предлагаемых методов, были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

При этом для получения испытываемых образцов использован непосредственно один из инструментов серии готовых изделий, которые в дальнейшем подвергались термопластической подготовке. Изготовление образцов проводилось на станке электроэрозионным методом. Опыты на их растяжение при температурах нагрева от 300° до 600°С осуществлялись на испытательной машине Zwick/RoellZ050 (Германия).

В результате установлены необходимые механические характеристики сталей для формирования исходных данных при решении поставленных задач, связанных с подготовкой инструментов к эксплуатации.

Пятая глава содержит численные расчеты поставленных задач, анализ результатов и их сопоставление с данными экспериментальных исследований по динамике и устойчивости пил и фрез круглопильного оборудования.

Представлен расчет критических температур и температурных напряжений при неравномерном нагреве диска, соответствующих потере устойчивости его плоской формы равновесия. Для выбранного изменения толщин профиля сечения вдоль радиуса диска, диаметра фланца его заземления установлены предельно допустимые перепады температуры характерных видов неравномерного нагрева. Для случаев задания функции, описывающей неравномерный нагрев (2) при $n_1 = 2$, результаты численного расчета представлены на Рис.5. Радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения диска выражены через соответствующие распределенные силы, записанные в безразмерной форме

$$\sigma_{(r \leftrightarrow \theta)} = \frac{E_0 h_0^2}{\eta c^2} \tilde{N}_{(r \leftrightarrow \theta)}. \quad (3)$$

Здесь и в дальнейшем индекс (*) обозначает критические параметры, в частности, (см. Рис. 5) $\tilde{\lambda}^*$ - безразмерный параметр температуры, n^* - число узловых диаметров при потере устойчивости.

На основе предложенного метода учета температурных компенсаторов в конструкции диска проведен расчет критических температур, данные которого сопоставлены с известными результатами экспериментов (Таблица 1) на пилах с размерами $D = 500$ мм, $h = 2,5$ мм, $D_\phi = 125$ мм, $d = 50$ мм.

Из Таблицы 1 видно, что число прорезей (компенсаторов) в диске и их длина оказывают существенное влияние на значения критического перепада температур неравномерного нагрева, а также можно сделать заключение об удовлетворительном совпадении проведенных расчетных и экспериментальных данных, полученных Ю.М. Стахивым.

Для экспериментальных исследований устойчивости тонких отрезных

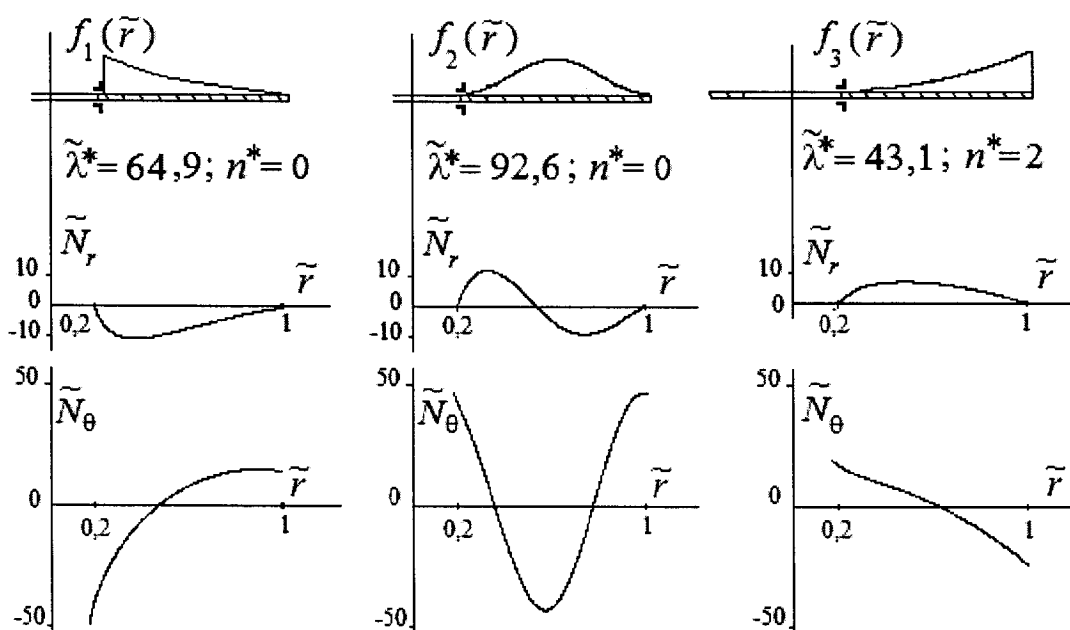


Рис. 5. Температурные напряжения в диске при потере устойчивости плоской формы равновесия для трех видов неравномерного нагрева

Таблица 1.

Зависимость критических температур от количества и длины прорезей

Число прорезей, шт.	0	4		8	
Длина прорези, мм	0	25	50	25	50
$\Delta T_{кр}, ^\circ\text{C}$	42,3 / 44	61,6 / 64	79,5 / 75	88,4 / 77	113,7 / 118
Примечание. В знаменателе приведены экспериментальные данные, приведенные в монографиях Ю.М. Стахиева					

фрез переменной и постоянной толщины при неравномерном нагреве и проверки достоверности теоретических выводов и обобщений создана лабораторная установка, представленная на Рис. 6.

При проведении на ней опытов фреза 1 приводится во вращение и нагревается у основания зубьев газовой горелкой 2. Температура T в зоне зубьев измеряется пирометром 3, данные которого обрабатываются специальной программой, отображаются на экране монитора компьютера 4 в виде

зависимости температуры от времени, процесс записывается на цифровую видеокамеру 5.

В опытах нагревание фрезы велось не только до момента потери устойчивости ее плоской формы равновесия, но и далее.

При этом искажения исходной формы равновесия приобретали все более отчетливый вид.

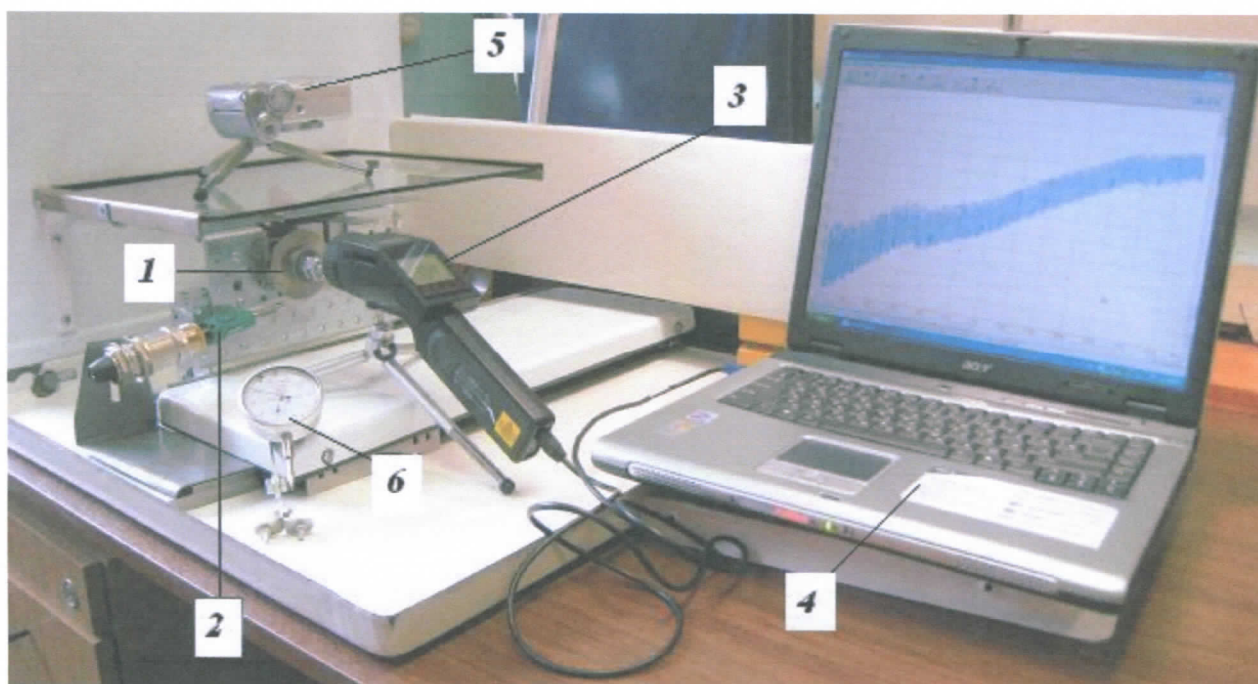


Рис. 6. Экспериментальная установка для исследования устойчивости плоской формы равновесия фрез при неравномерном нагреве: 1– фреза; 2 – газовая горелка; 3 – пирометр; 4– компьютер; 5 – цифровая видеокамера; 6–индикатор

На Рис.7 изображена развертка поперечных перемещений w зубьев фрезы, позволяющая определить форму потери устойчивости (штриховыми линиями на схеме показано положение узловых диаметров). В данном случае фреза потеряла устойчивость по форме без узловых окружностей с тремя узловыми диаметрами ($n = 3$). После окончания нагревания фреза остывала и восстанавливалась её первоначальная плоская форма.

При исследовании потери устойчивости эксперимент строится по следующей схеме: в момент потери устойчивости нагревание и вращение фрезы прекращается, пирометром измеряется температура вдоль радиуса диска фрезы от периферии до зажимных фланцев. Значения температур при этом записываются на видеокамеру непосредственно с экрана пирометра, а положение пятна (местоположение на диске) подсвечено лазерным лучом пирометра и одновременно фиксируется камерой.

Таким образом, экспериментально устанавливалось критическое значение температурного перепада ΔT °С, вдоль радиуса фрезы. При исследовании

устойчивости фрезы переменной толщины, характеризуемой коэффициентом k_h , принятым в виде

$$k_h = h/h_0 = \begin{cases} 1,5, & \text{при } 0,25 \leq \tilde{r} < 0,5 \\ 0,86 + 0,08(\tilde{r} - 0,5)^2, & \text{при } 0,5 \leq \tilde{r} \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

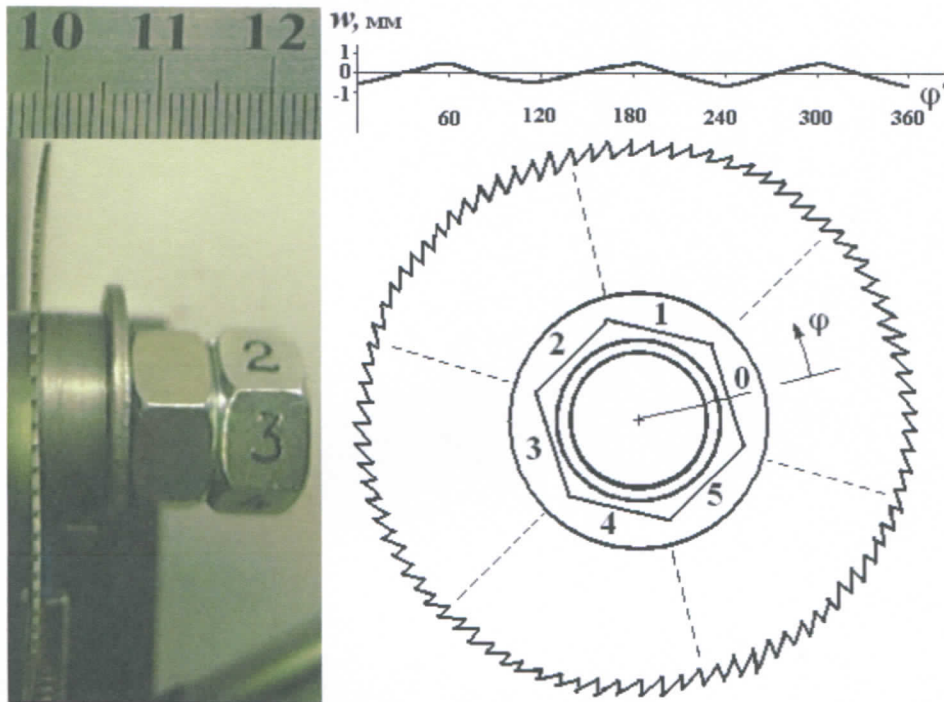


Рис.7. Форма потери устойчивости фрезы

материал фрезы - сталь Р6М5, в расчетах принято $h_0 = 0,5$ мм, $c = 32$ мм. Нагрев фрезы с помощью двух горелок позволил создать неравномерное поле температуры, которое можно аппроксимировать зависимостью (2) для случая: $i = 3, n_1 = 4$. На Рис.8 представлен график численного расчета распределения неравномерного нагрева, соответствующего потере устойчивости фрезы по форме с тремя узловыми диаметрами, там же результаты эксперимента отмечены символами «о». Наблюдаемое удовлетворительное совпадение теоретических результатов с данными проведенных опытов (см. Рис.8) свидетельствует о правомерности предложенного метода расчета.

Решена задача расчета динамических характеристик тонких круглых пил и фрез с учетом вращения в условиях неравномерного нагрева. Исследовано влияния совместного действия неравномерного нагрева и вращения на собственные динамические характеристики дисков при различных способах их закрепления.

Неравномерный нагрев диска при этом принят в виде (2). Установлено, что при скользящем защемлении внутреннего контура и в случае его заделки динамические характеристики диска отличаются несущественно.

Результаты расчетов частот свободных колебаний Ω для $\tilde{k}_a$ равного 0,2 и 0,4 в трех случаях распределения температур при $n_1 = 2$ представлены в виде

графиков, изображенных на Рис.9. При расчетах закрепление внутреннего контура принято в виде заделки.

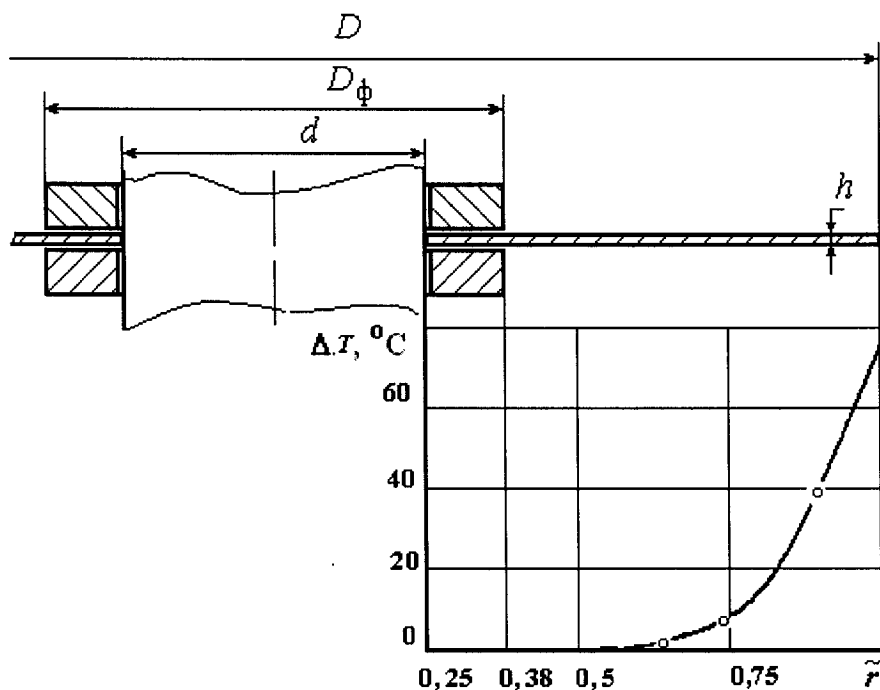


Рис. 8. Распределение вдоль радиуса температур неравномерного нагрева фрезы при потере ею устойчивости плоской формы равновесия

Частота собственных колебаний и частота вращения диска ω_0 определяются по формулам

$$\Omega^2 = \frac{E_0 h_0^2}{c^4 \eta \rho} \tilde{\Omega}^2, \omega_0^2 = \frac{E_0 h_0^2}{\eta c^4 \rho} \tilde{\omega}, \quad (5)$$

где ρ - плотность материала диска.

Для случая модели закрепления диска в виде скользящего защемления ($a < b$) динамические характеристики представлены на Рис. 10.

При этом в расчетах принято, что перепад температур неравномерного нагрева имел вид

$$\tilde{T}_2 = \tilde{\lambda} \cdot f_2(\tilde{r}), \quad (\tilde{k}_b \leq \tilde{r} \leq 1),$$

причем $f_2(\tilde{r}) = 0,5(1 - \cos(\tilde{p}))$, $\tilde{p} = 2\pi(1 - \tilde{r})/(1 - \tilde{k}_b)$, $\tilde{k}_b = b/c$,

где b - радиус фланца защемления диска.

Представленные на Рис. 9-10 зависимости динамических характеристик дисковых инструментов от факторов температуры, вращения, параметров и вида закрепления позволяют осуществить выбор геометрических размеров, обеспечивающих отстройку собственных частот инструмента от частот его резонансных режимов работы. Подобные зависимости, полученные с учетом переменности толщины радиального профиля дисков, создают новые возможности для совершенствования конструкций корпусов инструментов.

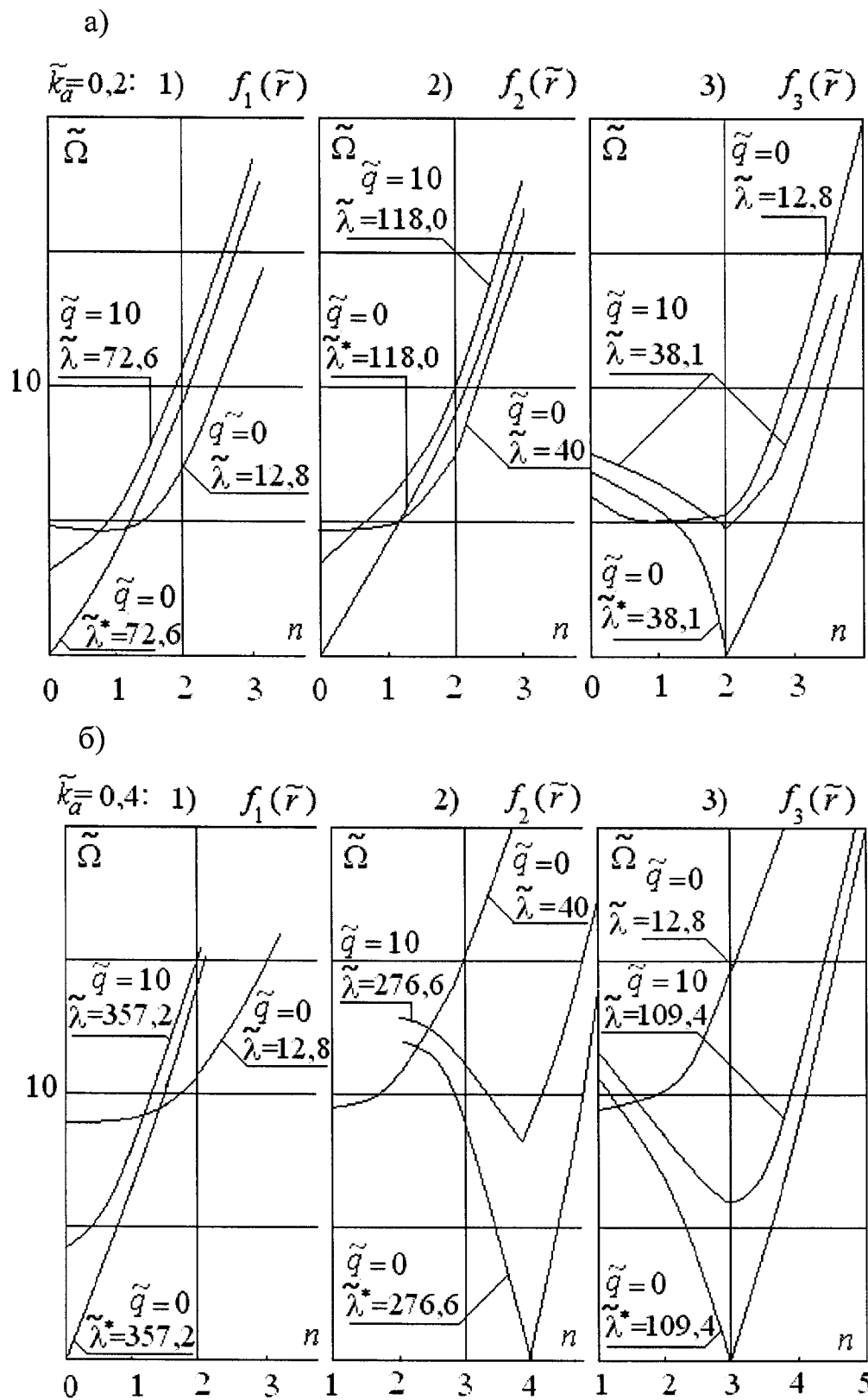


Рис.9. Частоты свободных колебаний для трех видов неравномерного нагрева диска с жестким закреплением внутреннего контура (с учетом равномерного вращения $\tilde{q} \neq 0$ и $\tilde{q} = 0$) в случае: $\tilde{k}_a = 0,2$ (а), $\tilde{k}_a = 0,4$ (б)

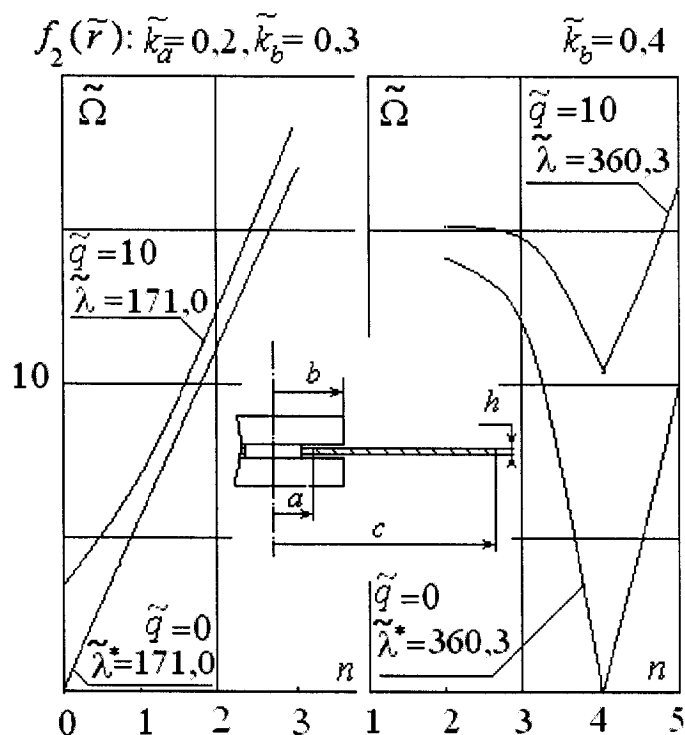


Рис.10. Частоты и формы свободных колебаний неравномерно нагретого диска (в неподвижном состоянии и с учетом его равномерного вращения) при различных радиусах контура заземления

Выяснение основных факторов, неблагоприятно влияющих на работоспособность и эксплуатационные свойства инструмента и количественные оценки этого влияния, позволяют организовать комплекс конструктивных и технологических мероприятий, направленных на максимально возможное снижение их негативных последствий. Однако, как правило, названные меры не являются универсальными и поэтому требуют определения конкретных областей и условий применимости.

В этом плане характерным примером служит введение в конструкцию диска температурных компенсаторов. По опубликованным экспериментальным данным определения влияния радиальных прорезей на частоты свободных колебаний пил для $n \leq 1$ и $n \geq 3$ с увеличением длины прорезей частоты уменьшаются, а для $n = 2$ увеличиваются.

Исследовались пилы с размерами $D = 500$ мм, $h = 2,5$ мм, $D_{\phi} = 125$ мм. Для экспериментов выбирались невальцованные и непрокованные пилы, в каждой из которых делались четыре радиальных прореза длиной до 60 мм.

Результаты расчета на основе разработанного метода представлены на Рис. 11 в виде графиков для форм колебаний с $n=1, 2, 3$ в виде пунктирной, штрихпунктирной и сплошной линий, а экспериментальные данные, отвечающие этим формам, изображены соответственно символами « $\circ$ », « $\diamond$ » и « $\star$ ».

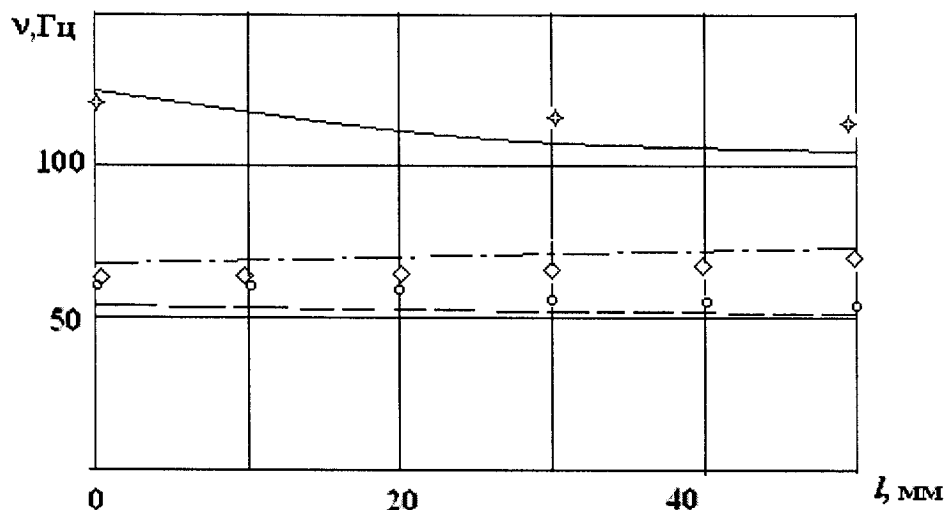


Рис.11. Зависимости собственной частоты диска от длины прорезей и формы колебаний

Результаты экспериментов и расчетов имеют удовлетворительное совпадение, что может служить основанием к использованию предложенной модели в исследованиях динамики конструкций пил и фрез с радиальными температурными компенсаторами.

Расчет остаточных напряжений в диске в результате вальцевания и оценка их влияния на его устойчивость и динамические характеристики имеет решающее значение для организации процесса подготовки инструмента к работе. Проведенное исследование позволило установить параметры, определяющие процесс вальцевания и его результата для создания в диске заданного уровня остаточных напряжений, найти эффективное конструктивное решение проведения этого процесса, а также оценить влияние остаточных напряжений на устойчивость плоской формы равновесия при неравномерном нагреве и собственные частоты и формы колебаний диска.

В качестве исследуемого выбран диск с геометрическими параметрами: $h = 2$ мм, $c = 120$ мм, $a = 24$ мм, изготовленный из стали 9ХФМ.

При численном методе упругопластического расчета диска использован метод переменных параметров упругости, основанный на сведении физически нелинейной задачи расчета при упругопластических деформациях к последовательности линейных задач с переменными параметрами упругости.

В качестве параметров вальцевания приняты: $\tilde{\sigma}_z = -250$, $\tilde{\delta}_p = \delta_p / c = 0,02$ и три значения радиуса $\tilde{r}_p = r_p / c = 0,35, 0,55, 0,75$.

Разность значений сил, соответствующих упруго-пластическому и упругому состоянию, определяет остаточное напряженное состояние, возникающее после разгрузки. На Рис. 12 приведены результаты расчета остаточного напряженного состояния, представленного в безразмерных параметрах

$\tilde{N}_r^0, \tilde{N}_\theta^0$ в трех случаях расположения зоны вальцевания.

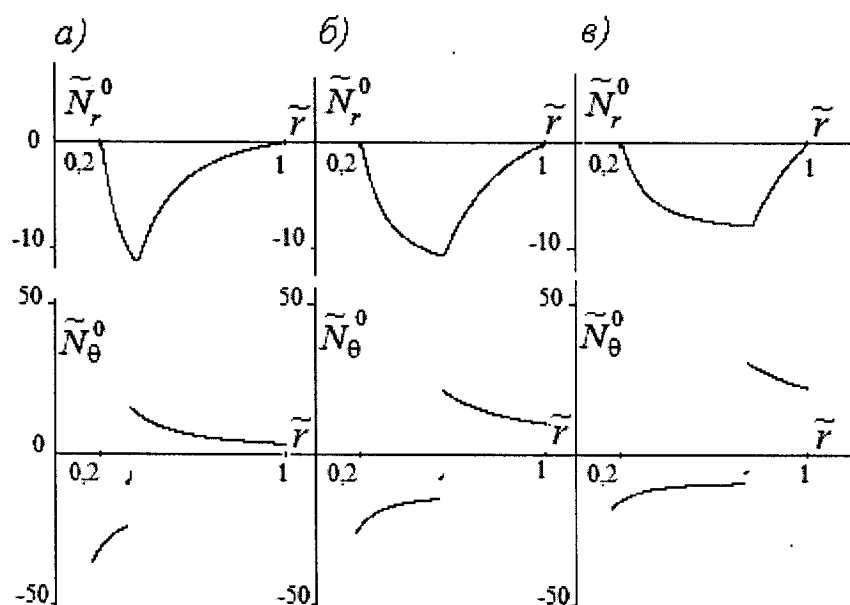


Рис.12. Эпюры остаточных напряжений диска после вальцевания для:
 $\tilde{r}_p = r_p/c = 0,35$ (а), $0,55$ (б), $0,75$ (в)

Анализ влияния остаточных напряжений, вызванных вальцеванием, на устойчивость диска при неравномерном нагреве рассмотрен для второго и третьего случая перепада температур $\tilde{T}_i = \tilde{\lambda} \cdot f_i(\tilde{r})$, ($i = 2, 3$).

Результаты расчета приведены на Рис.13 для $\tilde{k}_a = 0,2$, $\mu = 0,3$, где указаны найденные критические значения $\tilde{\lambda}^*$ и даны эпюры соответствующего напряженного состояния, получаемых в двух случаях расположения зоны вальцевания. Для удобства проведения сравнения результатов в скобках (см. Рис.13) указаны критические значения параметра $\tilde{\lambda}^*$, полученные для невальцованного диска (см. Рис. 5).

Анализ результатов показывает, что при вальцевании диска по окружности с радиусом $\tilde{r}_p = 0,55$ его критическое значение температурного перепада с неравномерным нагревом по закону $f_3(\tilde{r})$ увеличивается в два раза. При этом для нагрева, соответствующего $f_2(\tilde{r})$, $\tilde{\lambda}^*$ уменьшается почти в восемь раз. Вальцевание с радиусом $\tilde{r}_p = 0,35$ приводит к 1,5-кратному повышению $\tilde{\lambda}^*$ при нагреве по закону $f_3(\tilde{r})$ и 1,5-кратному снижению критического значения температурного перепада с нагревом $-f_2(\tilde{r})$. В связи с этим в случае опасности возникновения неравномерного нагрева средней зоны диска, предпочтение следует отдать вальцеванию по окружности с радиусом $\tilde{r}_p = 0,35$. Отметим, что наличие остаточных напряжений не оказало влияния на формы потери устойчивости.

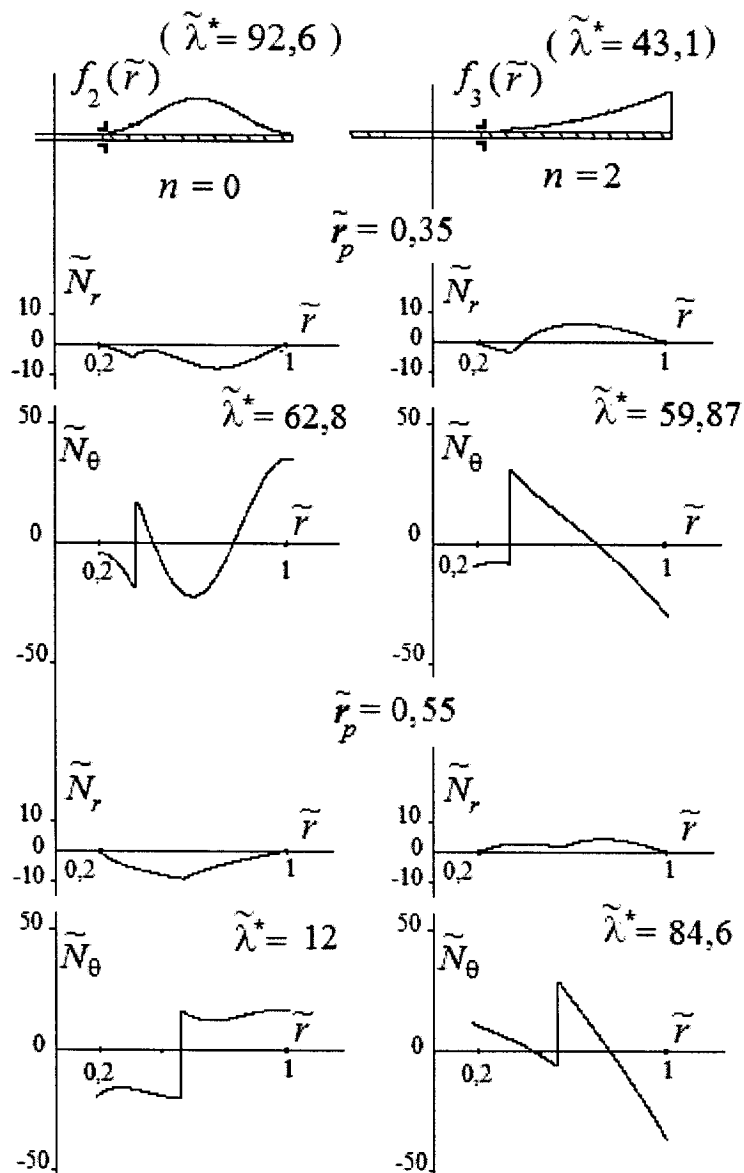


Рис.13. Напряжения в диске при потере устойчивости от неравномерного нагрева

Для вальцевания рассматриваемых фрез предложено приспособление, показанное на Рис. 14. Вальцевание на нем осуществляется с помощью шариков, собранных в сепараторы стандартных упорных подшипников. При воздействии прессы с заданной силой P на опорные шайбы 3 и вращении подвижных шайб 4 с помощью рукояток 5 фреза 8 будет провальцована по окружности, как показано на Рис. 15. На фрезе образуется характерная “дорожка”, получающаяся в результате остаточной пластической деформации. По площади взаимного контакта шарика и фрезы при воздействии силы можно оценить напряжение σ_z , создаваемое вальцеванием. Диаметр круговой площадки контакта шарика и фрезы определяет параметр δ_p , а параметр r_p определяют габаритные размеры сепараторов выбранных подшипников.

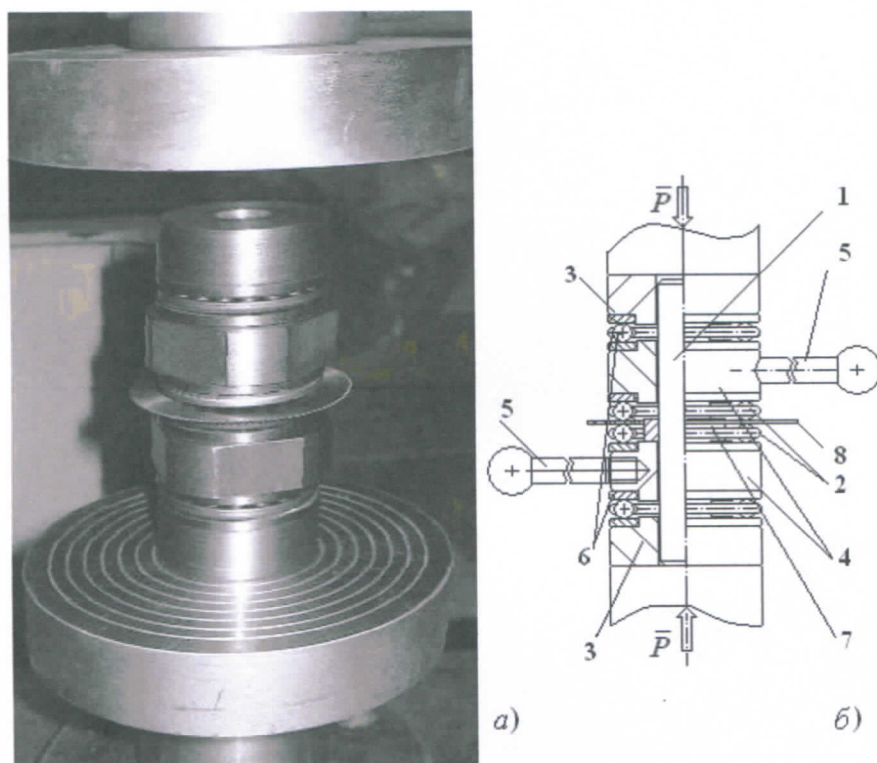


Рис. 14. Вид (а) и схема (б) приспособления для вальцевания:

- 1 – направляющий шток; 2 – сепаратор с шариками;
- 3 – опорная шайба; 4 – подвижная шайба; 5 – рукоятка;
- 6 – упорный подшипник; 7 – втулка; 8 – вальцуемая фреза

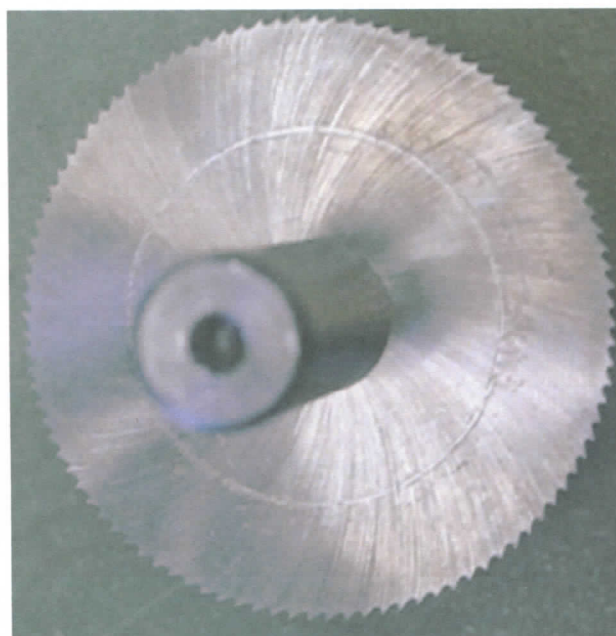


Рис. 15. Фреза после вальцевания

Вальцеванию была подвергнута серия фрез, изготовленных из быстрорежущих сталей Р18 и Р6М5. При расчетах механические характеристики для этих марок сталей, взяты в соответствии с данными главы 4.

После вальцевания фрезы были подвергнуты динамическим испытаниям на вибрационном стенде в целях определения частот и форм собственных колебаний. Результаты опытов сведены в Таблицу 2. В ней также указаны данные теоретических расчетов, которые проведены с учетом переменности толщин испытываемых фрез вдоль их радиуса.

Таблица 2.

Собственные частоты невальцованных ($\tilde{N}_z = 0$) и вальцованных фрез

D, мм	D_ϕ , мм	d , мм	h_0 , мм	Z	$r_p = 19\text{ мм}$		$\nu_n, \Gamma_{\text{ц}}$		
					δ_p , мм	$\tilde{N}_z$	ν_0	ν_1	ν_2
63	22	16	0,3	128	0	0	545/550	540/500	636/590
					0,25	-1575	383/400	474/450	757/720
	24				0	0	596/580	600/625	695/660
					0,25	-1575	425/510	522/580	809/800
67	30	22	0,5	100	0,35	-579	833/880	924/910	1275/1250
62				0,35	-590	1093/1140	1117/1175	1271/1240	
1			100	0,65	-280	762/750	928/960	1466/1420	
			100	0,6	-295	715/710	907/950	1485/1550	
			56	0,7	-230	1082/1170	1082/1170	1390/1400	
Примечание. В знаменателе приведены экспериментальные данные									

Анализ сравнения полученных результатов свидетельствует об удовлетворительном совпадении экспериментальных и теоретических данных. Обнаруживаемое их расхождение обусловлено пренебрежением наличия впадин зубьев при задании в расчетах геометрических размеров фрез. Проведенные опыты подтверждают основное, установленное теорией, положение: вальцевание средней зоны диска увеличивает собственную частоту ν_n для формы колебаний с двумя узловыми диаметрами $n = 2$ и уменьшает для форм с $n = 0, 1$.

На основании проведенных исследований и представленных результатов сделано заключение о том, что разработанный метод определения напряженного состояния, возникающего после вальцевания, можно эффективно использовать для назначения технологических параметров подготовки к эксплуатации дисковых инструментов, используемых при обработке различных материалов. Указанный метод применим не только в технологии подготовки инструментов, выполненных из традиционно используемых инструментальных сталей 9ХФ и 9ХФМ, но и для дисковых инструментов, изготовленных из других марок сталей.

Определение максимально допустимого остаточного напряженного состояния, создаваемого в дисковых инструментах путем вальцевания, позволяет сформулировать и решить задачу о влиянии их подготовки к экс-

плутации на собственные частоты и формы колебаний, а также динамическую устойчивость.

Для проверки результатов расчета остаточных напряжений, приведенных термопластическим методом использованы известные экспериментальные данные, полученные на дисках из стали 9ХФ при нагревании их периферийной зоны до 460°C и последующего охлаждения. По результату установленного характера распределения температур в этих опытах определены эпюры остаточных напряжений вид, которых представлен на Рис.16 сплошными линиями, а точки соответствуют данным эксперимента, проведенного А.А. Настенко и Ю.М. Стахиевым.

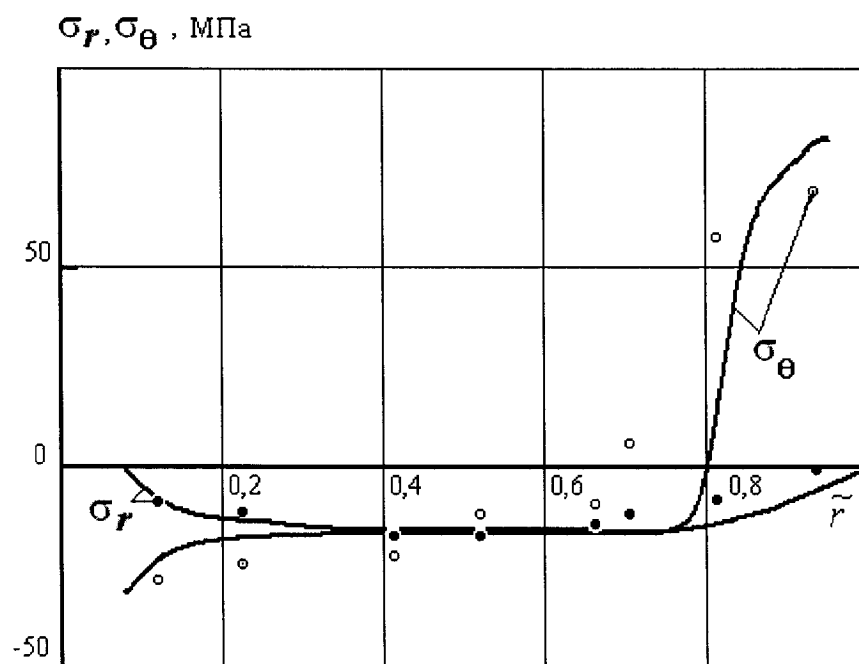


Рис.16. Остаточные напряжения в диске, полученные термопластическим методом

На основе исследований устойчивости плоской формы диска в зависимости от его остаточных напряжений найдена связь между отношением $2h/D$ и критической температурой неравномерного нагрева периферийной зоны. Графики, представленные на Рис.17, позволяют определить предельные температуры, не вызывающие потери устойчивости инструмента от применения термопластической подготовки его к эксплуатации. Теоретические расчеты эффекта повышения устойчивости в результате действия остаточных напряжений, полученных термопластическим методом, проверены и подтверждены экспериментально с помощью уже описанной лабораторной установки.

При решении задачи, связанной с расчетами прочности отрезного диска при пространственном вращении, предложен метод расчета допустимых кинематических характеристик движения. Результаты расчетов подтвердились данными проведенных экспериментов.

На основе решений задач устойчивости и частот собственных колебаний несущих элементов корпуса инструментов в виде тонких одномерных полос

найжены допустимые значения сил, определяющих работоспособность конструкции. Предложена экспериментальная установка по исследованию устойчивости плоской формы равновесия инструментов при действии сосредоточенной силы, с помощью которой подтверждена достоверность теоретических расчетов.

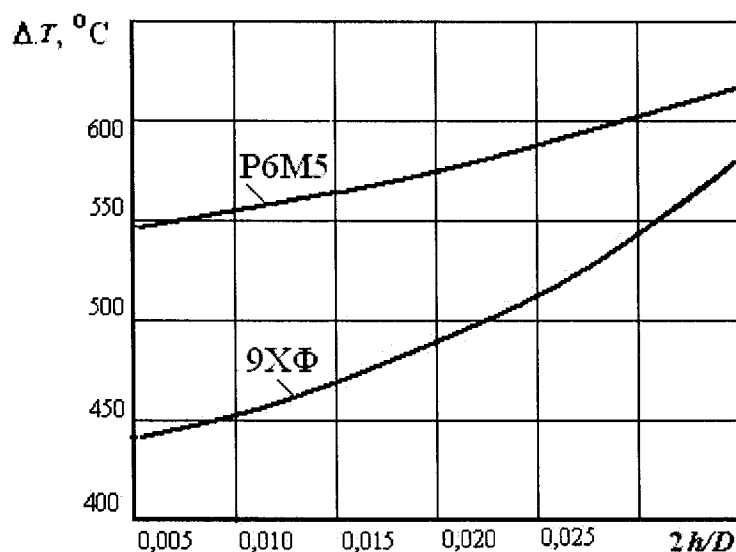


Рис.17. Зависимости критической температуры термопластического метода наведения остаточных напряжений от отношения толщины h к радиусу дисков $D/2$ из сталей 9ХФ и Р6М5

Таким образом, все результаты решения поставленных задач нашли свое экспериментальное подтверждение, свидетельствующее о правомерности использования выбранных расчетных схем, разработанных методов и алгоритмов для создания корпусов дисковых режущих инструментов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Шестая глава посвящена изложению последовательности расчета параметров проектируемой конструкции дискового инструмента, необходимых для обеспечения ее требуемой работоспособности, а также рекомендаций по выбору технологических режимов подготовки инструмента к эксплуатации. В частности рассмотрен алгоритм и пример расчета допустимых частот вращения дискового инструмента при неравномерном нагреве, расчет допустимых напряжений создаваемых в диске вальцеванием и термопластическим методом при его подготовке к эксплуатации, расчет критической частоты вращения диска с учетом остаточных и температурных напряжений.

Для создания осевых напряжений при вальцевании разработана методика расчета необходимой силы прижима к диску вальцовочных роликов.

Разработанные рекомендации позволяют существенно сокращать затраты на поиск и выбор рациональных конструкций дискового инструмента, а также отработку и практическую реализацию режимов подготовки его к эксплуатации.

Приложение содержит тексты программ для проведения расчетов на ЭВМ, примеры подтверждения полученных с их помощью результатов расчета

данными опытов, описание оборудования для экспериментального определения динамических характеристик дисков, акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы.

Выводы

1. Обосновано, что потеря динамической устойчивости корпусов быстровращающихся дисковых инструментов является основным ограничивающим фактором повышения производительности обработки. Неравномерный нагрев диска, возникающий в процессе резания, не только снижает динамическую устойчивость, но и может привести к потере устойчивости его плоской формы равновесия, а также необратимым искажениям формы инструмента. Учет этих явлений требует комплексного подхода к разработке новых методов расчета, как для проектирования конструкций дисков, так и режимов их подготовки к эксплуатации.
2. На базе основных положений механики деформируемого твердого тела разработана математическая модель и метод расчета динамических характеристик и устойчивости дискового инструмента, которые позволяют определять предельно допустимые значения режимов подготовки и эксплуатации дисковых пил, выбирать геометрические параметры инструмента повышенной производительности, а также количество и размеры его температурных компенсаторов.
3. Разработан теоретический метод определения предварительных напряжений в диске, которые требуется в нем создать для компенсации температурных напряжений в зависимости от вида неравномерного нагрева, и обеспечивающие устойчивость плоской формы равновесия инструмента при эксплуатации.
4. На основе положений деформационной теории и теоремы о разгрузке разработан новый метод расчета процесса вальцевания диска режущего инструмента, для создания в нем предельно допустимого предварительного остаточного напряженного состояния, не вызывающего потери его устойчивости.
5. Разработан метод расчета остаточных напряжений, создаваемых в диске термопластическим способом при подготовке инструмента, и найдены значения температур неравномерного нагрева, обеспечивающие повышение устойчивости инструмента при его дальнейшем использовании.
6. Предложен метод оценки качества подготовки к эксплуатации дискового инструмента, основанный на сравнении расчетного и экспериментального перепада температур неравномерного нагрева диска, вызывающего потерю его устойчивости.
7. Разработанная модель для определения напряженного состояния диска, совершающего сложное пространственное движение, позволяет установить ограничения на его кинематические характеристики из условия не разрушения корпуса.

8. Разработаны рекомендации по конструкциям дискового инструмента, подготовке их к эксплуатации, назначению режимов работы на основе использования алгоритмов и программ расчета динамического и статического поведения дисковых пил.

9. Результаты работы в виде программных продуктов и рекомендаций использованы и внедрены на ЗАО «ПК ПИЛАТЭКС», ООО «Тюменский станкостроительный завод», ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», ОАО ВНИИДМАШ «СТАНКОМЭЗ», в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, в ОАО «МПО по выпуску алмазного инструмента», МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Список публикаций по теме диссертации

1. Карпачев А.Ю. Свободные колебания круглых пластин при неравномерном нагреве // Известия вузов. Машиностроение. 2005. №4. С. 3 – 12. (1,25 п.л.).

2. Карпачев А.Ю. Собственные динамические характеристики вращающихся круглых пил при неравномерном нагреве // Вестник машиностроения. 2006. №5. С.32-36. (0,63 п.л.)

3. Карпачев А.Ю. Свободные колебания тонкого диска с радиальными прорезами по периферии // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 6. С. 3 - 6. (0,5 п.л.).

4. Карпачев А.Ю., Николаев С.М. Исследование динамических характеристик дисковой пилы с радиальными компенсаторами // Вестник машиностроения. 2013. №12. С.37-38. (0,32 п.л./ 0,16 п.л.).

5. Карпачев А.Ю., Николаев С.М. Динамические характеристики отрезных фрез // Вестник машиностроения. 2014. №10. С.80-82. (0,44 п.л./ 0,22 п.л.).

6. Карпачев А.Ю. Влияние остаточных напряжений на устойчивость круглых пластин при неравномерном нагреве // Известия вузов. Машиностроение. 2006. №9. С. 3 – 13. (1,38 п.л.).

7. Карпачев А.Ю. Исследование влияния вальцевания на динамические характеристики круглых пил и фрез // Вестник машиностроения. 2007. №12. С.42-48. (0,79 п.л.).

8. Карпачев А.Ю. К анализу эффективности применения термопластического метода подготовки к работе тонких круглых пил и фрез переменной толщины // Вестник машиностроения. 2010. №11. С.61-65.(0,63 п.л.).

9. Карпачев А.Ю. Испытания отрезных фрез на устойчивость их плоской формы равновесия при неравномерном нагреве // Вестник машиностроения. 2009. №3. С.55-56. (0,44 п.л.).

10. Карпачев А.Ю. Проблема собственных значений в прогрессивных технологиях проектирования режущих полотен // Научные технологии. 2001. №3. Т.2. С.52-57. (0,75 п.л.)

11. Карпачев А.Ю., Букеткин Б.В. Исследования механических свойств стали Р6М5 при повышенных температурах // Вестник машиностроения. 2010. №-6. С.40-41. (0,26 п.л. / 0,13 п.л.).

12. Карпачев А.Ю. К определению низших частот свободных колебаний дисковых пил при неравномерном нагреве // Вестник машиностроения. 2004. №5. С.33-34. (0,25 п.л.).
13. Карпачев А.Ю. К исследованию устойчивости дисковых пил при неравномерном нагреве // Известия вузов. Машиностроение. 2004. №1. С. 21-24. (0,38 п.л.).
14. Карпачев А.Ю., Небесный М.В., Овчинников В.А. К исследованию динамического поведения систем с распределенными параметрами на ЭВМ // Известия вузов. Машиностроение. 2007. №-5. С.3-12. (1,2 п.л. / 0,4 п.л.).
15. Карпачев А.Ю. О деформации упругого тонкого диска при сферическом движении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. Спец. вып. №8. С.129-138. (0,88 п.л.).
16. Карпачев А.Ю. К оценке запаса устойчивости плоской формы изгиба режущего полотна лесопильного оборудования // Вестник машиностроения. 1991. №-4. С.25-26. (0,26 п.л.).
17. Карпачев А.Ю. Исследование устойчивости режущего полотна ленточнопильного станка в зависимости от конструктивной схемы его закрепления // Известия вузов. Машиностроение. 2000. №1-2. С. 41– 43. (0,38 п.л.).
18. Карпачев А.Ю. Устойчивость режущего полотна ленточнопильных станков // Известия вузов. Машиностроение. 1994. №4-6. С. 40 – 42. (0,38 п.л.).
19. Karpachev, A.Yu. Stability of plane equilibrium of mills in nonuniform heating[Текст] // Russian Engineering Research. 2009. V.29. №3. P.272-275. (0,5 п.л.).
20. Карпачев А.Ю. Об исследовании эффективности применения термопластического метода подготовки к работе круглых пил. Технология и оборудование для переработки древесины //Науч. тр. МГУЛ. Вып. 349. 2010. С. 85-92. (0,5 п.л.).
21. Карпачев А.Ю. Устойчивость круглых пил с компенсаторами //Науч. тр.МГУЛ. Вып. 353. 2011. С. 61-65. (0,31 п.л.).
22. Карпачев А.Ю. Устойчивость круглых пластин при неравномерном нагреве// Сб. научн. статей, посвященный 125- летию кафедры теоретической механики ИМТУ-МГТУ им. Н.Э. Баумана.- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. С. 121-123.(0,38 п.л.)
23. Карпачев А.Ю. Исследование влияния необратимых процессов в металлах конструкций при пластическом деформировании // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Шестой Всероссийской конференции 26-28 января 2011г. Ч.II.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 208-209. (0,13 п.л.).
24. Именитов Л.Б., Карпачев А.Ю. Оценка влияния конфигурации тонкой полосы на устойчивость плоской формы изгиба. Вопросы исследования прочности деталей машин // Сб. научн. тр. М.: МИП, 1993. С.32-35. (0,25 п.л./ 0,125 п.л.).

25. Карпачев А.Ю. Влияние кривизны оси балки на устойчивость плоской формы при изгибе / МГТУ им. Н.Э. Баумана //Деп. рук. ВИНТИ. 1999. №635-В99. 5с. (0,31 п.л.).

26. Карпачев А.Ю. Влияние скорости движения растянутой полосы на устойчивость ее плоской формы при изгибе/ МГТУ им. Н.Э. Баумана //Деп. рук. ВИНТИ. 1999. №1239-В99. 6с. (0,38 п.л.).

27. Карпачев А.Ю. Определение низших частот свободных колебаний статически нагруженной тонкой упругой полосы / МГТУ им. Н.Э. Баумана // Деп. рук. ВИНТИ.1999. №1861-В99. 8с. (0,5 п.л.).

28. Карпачев А.Ю. К расчету остаточных напряжений в дисках // Научные материалы. 1-я Международная научно-техническая конф., посвященная 90-летию В.Н. Челомея, 24-25 мая 2004 г., - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО Машиностроения. С.95-96. (0,13 п.л.).

29. Карпачев А.Ю. Устойчивость дисков при проковке // Материалы Международ. науч. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы механики», посвященной 90-летию В.И. Феодосьева. – Москва, 4-6 мая 2006. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С.113.(0,06 п.л.).

30. Карпачев А.Ю. Остаточные напряжения в тонком диске от предварительного неравномерного нагрева // Научные материалы. 2-я Международная научно-техническая конф., посвященная 95-летию В.Н. Челомея, 19-20 мая 2009 г., - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО Машиностроения.- С.241-242.(0,13 п.л.).

31. Карпачев А.Ю. Собственные колебания круглых пил с радиальными компенсаторами //Науч. тр. МГУЛ. Вып. 358. 2012. С. 87- 90. (0,25 п.л.).

32. Карпачев А.Ю. Устойчивость и колебания полос произвольной конфигурации // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Седьмой Всероссийской конференции 29-31 января 2013г. Ч.II.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 111-114. (0,25 п.л.).

33. Карпачев А.Ю. Устойчивость и динамические характеристики одномерных элементов в конструкциях инструментов для распиловки материалов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. Вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1143.html>. (1,31 п.л.).

34. Свидетельство Гос. рег. программы для ЭВМ №2013617463. Расчет допустимой температуры нагрева термопластического метода подготовки к эксплуатации круглых пил из стали 9ХФ/ Карпачев А.Ю. Москва. 2013.

35.Свидетельство Гос.рег. программы для ЭВМ №2013617766. Расчет допустимой температуры нагрева термопластического метода подготовки к эксплуатации отрезных и прорезных фрез, изготавливаемых из быстрорежущих сталей/ Карпачев А.Ю. Москва. 2013.