

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «Технология машиностроения»

УДК 627.09

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Проректору по НР и ВС

КГТУ им. И. Раззакова

к.ф-м.н., доц. Чыныбаев М.К.

« _____ » _____ 2016г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Организационно-технологическое проектирование производственных систем»

Заведующий отделом науки

к.т.н., доцент

Асиев А.Т.

Руководитель по НИР

к.т.н., доцент

Трегубов А.В.

Бишкек 2016

Список исполнителей

Омуралиев У.К. к.т.н. проф.	общее научное руководство, редактирование отчета
Трегубов А.В. к.т.н., доцент, зав. кафедрой,	научный руководитель, написание 1 раздела отчета,
Рагрин Н.А. д.т.н., доцент	написание 2 раздела отчета,
Самсонов В.А. к.т.н., профессор	написание 3 раздела отчета
Сапрыкин Ю.В. проф., к.т.н.	написание 4 раздела отчета
Стародубов И.И. к.т.н., доцент	написание 5 раздела отчета
Тутлис В.П. проф., к.т.н.	написание 6 раздела отчета
Мамбеталиев Т.С. к.т.н. доцент	написание 7 раздела отчета
Сартов Т.Э., к.т.н., доцент	написание 8 раздела отчета
Жумалиев Ж.М. доцент	написание 9 раздела отчета
Сопоев М.К. ст. преподаватель	написание 10 раздела отчета
Дыйканбаева У.М. преподаватель	написание 11 раздела отчета
Белекова Ж.Ш. аспирантка	написание 12 раздела отчета
Биджиева О.А. ст. специалист	написание 13 раздела отчета
Сопоев М.К. ст. преподаватель	оформление и редактирование отчета

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕГУЛЯТОРА РЕЖИМАМИ РАБОТЫ КАМНЕОБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА С ИЗГОТОВЛЕНИЕМ НА 3D ПРИНТЕРЕ.	8
2. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ	19
3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАТОЧКИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ОТВЕРСТИЙ И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА.....	30
4. МОДЕЛЬ ДОКРИТИЧЕСКОГО ПОДРАСТАНИЯ ТРЕЩИНЫ НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЕ.	35
5. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	42
6. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	57
7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ.	69
8. ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ.....	78
9. КАТОДНЫЕ УЗЛЫ В ПЛАЗМОТРОНАХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КАТОДНЫХ ЯВЛЕНИЯХ	89
10. ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ	97
11. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБОТАННОЙ БЫСТРОРЕЖУЩИМИ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ	104
12. ТЕХНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МАРКИ 6082T6 (AL-MG-SI).....	116
13. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134

Реферат

Отчет содержит текст на **143** стр., **31** иллюстраций и **147** использованных источников.

Ключевые слова: сверло, стойкость, скорость резания, подача, диаметр, твердость, геометрические параметры сверл, стойкость инструмента, быстрорежущие спиральные сверла, кривые износа режущих элементов, струйно-абразивная резка, лазерная резка материалов, абразивные частицы, спектры пороговых кривых, конструкционная прочность, сварка трением, электроэрозионная обработка.

Основным объектом исследования является продукция, изготавливаемая на машиностроительных предприятиях Кыргызстана в условиях мелкосерийного и серийного производства.

В отчете рассматриваются вопросы: оптимизации геометрических параметров сверл применительно к конкретным условиям обработки деталей; пути повышения наработки до функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл на основе анализа кривых износа их режущих элементов; экспериментальные исследования по построению спектров пороговых кривых (диаграмм) конструкционной прочности при совмещенном осевом и внецентренном растяжении сталей с трещинами разных длин; анализ технологий сопряжения деталей методом сварки трением; пути обеспечения точности и производительности электроэрозионной обработки, повышение прочности коромысла ударного узла с механизмом переменной структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология изготовления машиностроительных изделий отличается огромным разнообразием, что соответственно требует создания большого количества многообразного оборудования и различных методов организации производства.

В развитии промышленного производства можно выделить две эры: индустриальную и информационную. Первая прошла свой путь развития, начиная с прошлого века, и характеризуется преимущественным развитием отраслей материального производства, которое в значительной степени стало массовым, крупносерийным, ориентированным на рынки большой емкости и на изделия массового спроса. В эпоху индустриализации основным фактором повышения эффективности производства была преимущественно экономия затрат живого труда в самых различных сферах деятельности при снижении затрат ресурсов на единицу конечной продукции за счет повышения удельной мощности технологического оборудования.

На смену индустриальной эры пришла информационный период, переход к которому в странах западной Европы начался в 50 - 60-е годы прошлого столетия и завершился в наиболее экономически развитых странах мира к середине 80-х гг. Информационную эру отличает преимущественный рост экономики, сферы услуг, особенно для отраслей, связанных с переработкой информации и осуществлением посреднической деятельности всех видов.

Производство в информационную эру становится в высшей степени гибким, не массовым и ориентируется на индивидуальные запросы потребителей и небольшие по емкости рынки сбыта.

Вступление Республики в рыночную экономику выдвинуло перед машиностроением ряд новых проблем, без решения которых невозможно обеспечить конкурентоспособность выпускаемой продукции: экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов; существенное

повышение качества продукции; ускорение темпов сменяемости ассортимента машин. Главным действующим фактором, определяющим возможность решения указанных проблем, является эффективность используемых технологических процессов (ТП). Наука о ТП формировалась постепенно по мере решения основных задач, связанных с проектированием. Было установлено, что ТП есть часть производственного процесса, сопровождающаяся изменением геометрических форм и размеров, а также физико-механических свойств поверхностного слоя. Затем была изучена структура ТП и его основная составляющая — технологическая операция, которая также характеризуется структурой и содержанием. Структура операции определяется количеством и последовательностью выполняемых переходов, а также содержанием — применяемыми методами обработки. Основными задачами, решаемыми при проектировании ТП, являются обеспечение необходимого качества и производительности обработки. Поэтому на следующем этапе основное внимание было уделено разработке вопросов точности обработки как главного параметра качества. Рассматриваются новые факторы, определяющие эффективность используемых технологических процессов. Учитывая широкие технологические возможности ионно-плазменных методов обработки, а также необходимость повышения эффективности ТП механической обработки, предлагается рассматривать методы поверхностной модификации не как отдельные ТП, а как заключительные операции единого ТП, обуславливающего формирование заданной формы, размеров, параметров качества, заданных физико-механических свойств поверхностного слоя детали. Реализация поставленной задачи потребует разработки: единых требований, предъявляемых к параметрам качества поверхностного слоя с учетом последующей поверхностной модификации; классификации различных методов механической обработки с учетом формируемых свойств поверхностного слоя; классификации различных методов поверхностной модификации с учетом эффективности и экономической целесообразности

применения, экологической безопасности; основополагающих принципов построения интегральных ТП, построенных на базе функционального объединения технологии получения заготовки, механической обработки и поверхностной модификации; методики контроля параметров поверхностного слоя, обуславливающей эффективное применение методов поверхностной модификации. Такой подход является принципиально новым и требует серьезной теоретической проработки и систематизации ранее накопленных знаний для достижения единой цели — создания более прогрессивных ТП, обеспечивающих изготовление новых видов техники.

Технолог в современных условиях должен выполнять в единицу времени не только большой объем работ, но и делать ее на высоком уровне. Решение этой проблемы лежит в автоматизации труда технолога, а это, в свою очередь, требует дальнейшего развития научных основ технологии машиностроения и совершенствования САПР ТП (Система Автоматизированного Проектирования, например, SolidCAM). Все это должно идти в направлении более глубокого изучения закономерностей технологических процессов, повышения уровня обобщений, формализации результатов исследований, применения математических методов, совершенствования методов расчета и разработки технологических процессов, проектирования средств технологического оснащения, методов организации технологической подготовки производства.

1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕГУЛЯТОРА РЕЖИМАМИ РАБОТЫ КАМНЕОБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА С ИЗГОТОВЛЕНИЕМ НА 3D ПРИНТЕРЕ.

На основании выбранной конструктивной схемы регуляторов работе[1] осуществляется процесс элементного проектирования конструкции гидравлического регулятора, который начинается с проектирования 2D модели регулятора с помощью программы SolidWorks на персональном компьютере (рис.1.1). На рис.1.2 приведена 3D модель гидравлического регулятора режима работы камнеобрабатывающего станка разработанная с помощью программы SolidWorks [2,3].



Рис. 1.1. Проектирование конструкции регулятора на персональном компьютере в среде SolidWorks.

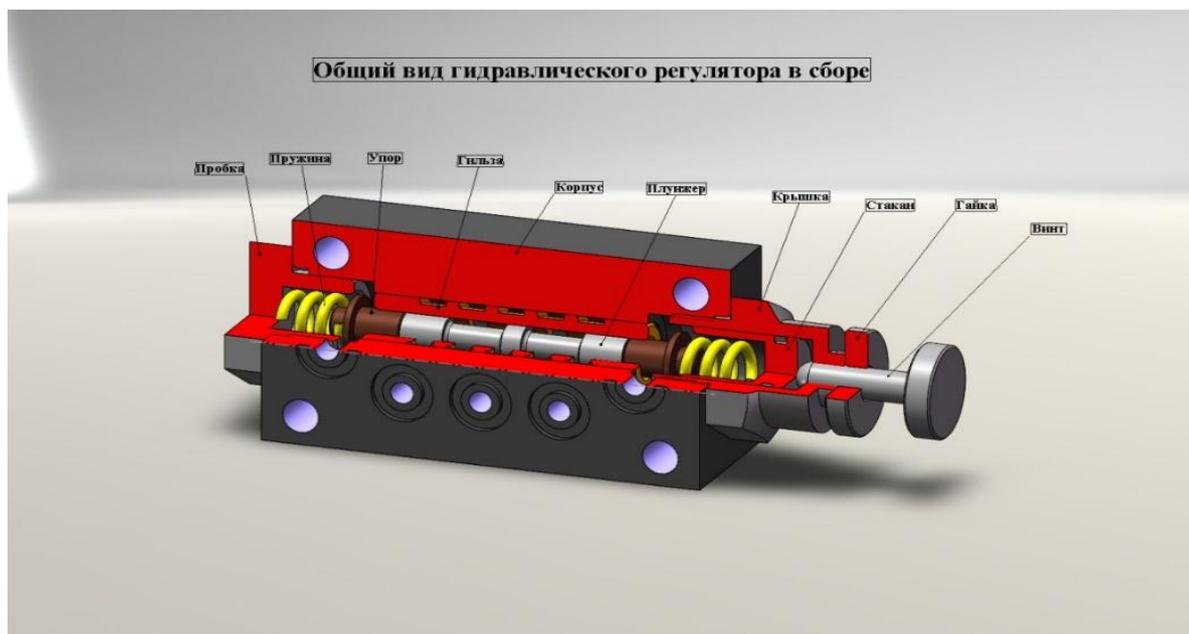


Рис. 1.2. 3D модель регулятора с разрезом в SolidWorks

Трехмерное моделирование изделий дает массу преимуществ перед традиционным двумерным проектированием, например, исключение ошибок собираемости изделия еще на этапе проектирования, создание по электронной модели детали управляющей программы для обработки на станке с ЧПУ. С помощью программы SolidWorks можно увидеть будущее изделие со всех сторон в объеме и придать ему реалистичное отображение в соответствии с выбранным материалом для предварительной оценки дизайна (рис. 1.2).

Трехмерная деталь SolidWorks получается в результате комбинации трехмерных примитивов. Большинство элементов основаны на плоском эскизе, по которому создается базовый трехмерный объект. Последовательное наращивание 3D объектов и позволяет в итоге получить необходимый результат-схему сборки регулятора (рис.1.3).

После того как созданы 3D модели деталей в среде SolidWorks, необходимо их сохранить в формате STL, что бы их можно было открыть в программе MAKERBOT DESKTOP 3D принтера.

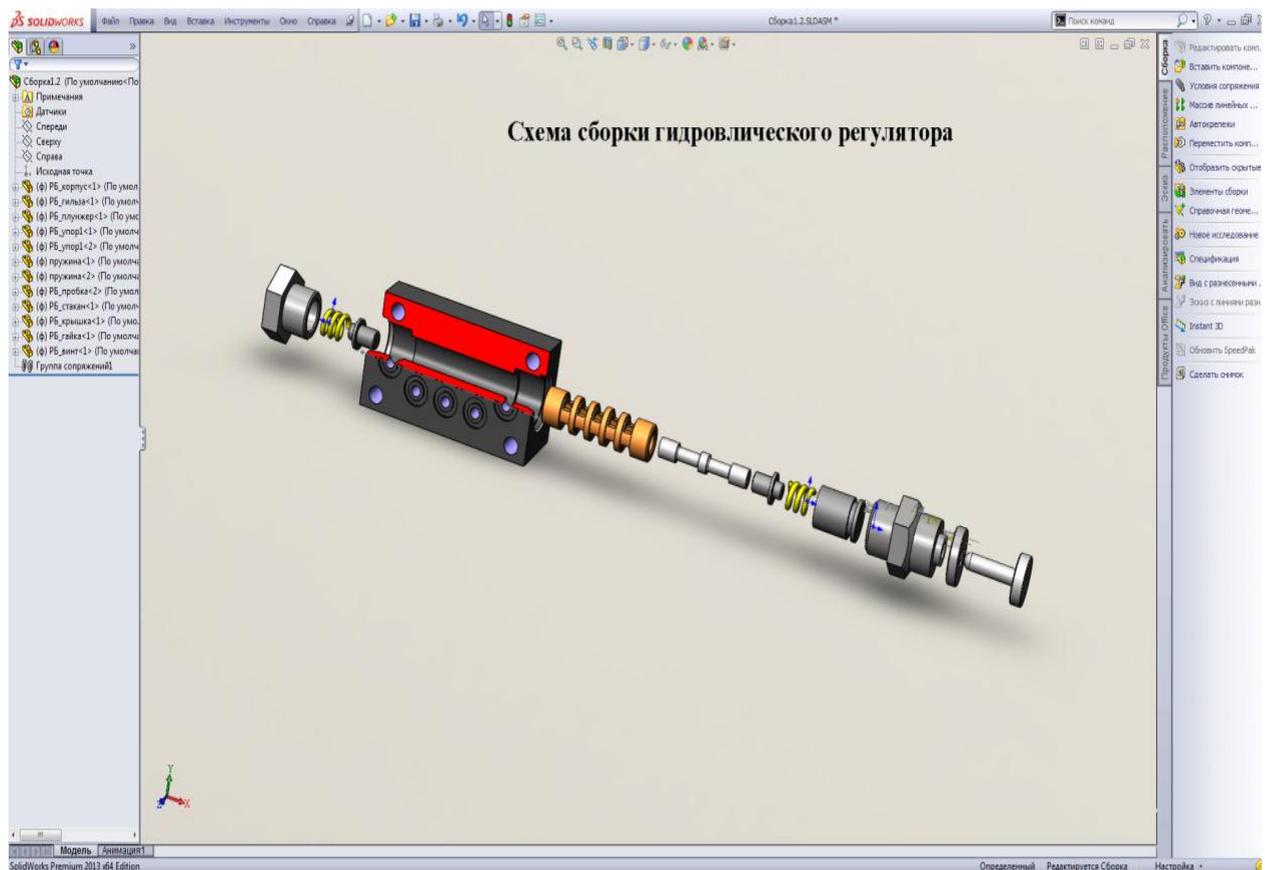


Рис.1.3. Схема сборки гидравлического регулятора с помощью SolidWorks.

Трехмерная деталь SolidWorks получается в результате комбинации трехмерных примитивов. Большинство элементов основаны на плоском эскизе, по которому создается базовый трехмерный объект. Последовательное наращивание 3D объектов и позволяет в итоге получить желаемый результат.

3D-принтер MAKERBOTREPLICATOR 2X

Эта модель 3D-принтера содержит в себе две печатающие головки, благодаря которым осуществляется печать сразу двумя цветами. Среди принтеров такого класса это определенно лучшая модель. Она обрела популярность за счет применения в печати ABS-пластика, палитра цветов которого достаточно богата для создания различного плана деталей и

объектов. Рабочая камера 3D-принтера рассчитана для создания предметов размером 24.6 x 15.2 x 15.5 см. Корпус оборудования выполнен из высокопрочных ударостойких материалов, что придает принтеру такие характеристики, как долговечность и надежность. Данное устройство позволяет выдерживать высокие нагрузки при быстром создании объектов.

Большое внимание в этой модели разработчики уделили платформе, так качество печати во многом зависит от нее. В MAKERBOT REPLICATOR 2X оснащен алюминиевой анодированной платформой, которая специально обработана для высококачественного построения предметов. Плоскость рабочей поверхности идеальна, благодаря чему исключено смещение и деформация деталей во время процесса печати.

MAKERBOT REPLICATOR 2X имеет две печатающие головки, то есть одновременно можно загружать 2 нити разного цвета. Естественно печать сразу двумя цветами намного практичнее, так как нет необходимости дополнительной разборки и сборки сложных конструкций, да и работа при этом не прерывается. Сам процесс печати проходит плавно, пластик наносится равномерно. Принтер позволяет наносить слой в 100 микрон с высоким разрешением, когда при стандартной печати он достигает 270-340 микрон. Экономия значительна, именно поэтому эта модель - наиболее популярна среди успешных бизнесменов.

MAKERBOT REPLICATOR 2X имеет усовершенствованный механизм загрузки пластика. Новая конструкция значительно улучшена за счет применения подшипника с поджимной пружиной, когда в остальных моделях используются поршень и винт, требующие дальнейшей корректировки. Сменить катушку теперь не составит труда и займет значительно меньше времени.

Для печати 3D-принтер использует распространенный ABS-пластик. Сам процесс нанесения на изделие этого материала достаточно оптимизирован, но для качественного результата все же необходимо проводить дополнительные настройки при калибровке оборудования.

Именно поэтому разработчики назвали эту модель "экспериментальной". Пользователь должен быть достаточно подготовлен к тщательному контролю печатного процесса. Не следует волноваться по поводу обучения, так как специалисты компании Векторус предоставят вам все необходимые навыки.

Преимуществом ABS-пластика является его распространенность и доступность. Также есть возможность использования богатой палитры цветов ABS-пластика (рис.1.4):



Рис. 1.4. Палитра цветов ABS-пластика.

В MAKERBOT REPLICATOR 2X успешно применяется программное обеспечение MakerWare, которое значительно упрощает и ускоряет работу с 3D-принтером. Рабочий процесс оптимизирован на 30%, соответственно скорость подготовки и самой печати стала значительно быстрее. Интерфейс программы интуитивно понятен, выполнение задач не требует дополнительной подготовки. Платформа MakerWare позволяет работать с различными операционными системами, такими как Windows, Mac и Linux. Для создания сложных 3D-объектов применяются распространенные форматы файлов - .obj и .stl.

Технические характеристики 3D принтера Makerbotreplicator 2x приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

СПЕЦИФИКАЦИИ	
Фактическая объем печати	24.6 x 15.2 x 15.5 cm
Материал корпуса:	сталь с порошковым покрытием
Материал печати	ABS-пластик
РАЗРЕШЕНИЕ И ТОЧНОСТЬ	
Режим высокого разрешения:	100 микрон
Режим нормального разрешения	270 микрон
Режим для быстрой печати	340 микрон
Точность позиционирования	XY: 11мкм Z: 2,5 микрон
Диаметр нити:	1,75 мм
Диаметр сопла:	0,4 мм
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
Комплект программного обеспечения:	MakerWare™ Bundle 2.0
Типы файлов:	STL OBJ .thing
Поддерживаемые операционные системы:	Windows (XP/7) Ubuntu Linux (10.04+) Mac OSX (10.6+)
Интерфейсы:	USB SDcard [включая]
РАБОЧИЕ УСЛОВИЯ	
Рабочая температура окружающей среды:	15° - 32°C
Температура хранения	0° - 32°C
Входное напряжение:	100 - 240В, ~4А, 50 - 60Гц
ГАБАРИТЫ И ВЕС	
Вес:	12,6 кг
Габаритные размеры	49 x 42 x 53.1 cm

Экспериментальный 3D принтер MakerBotReplicator 2X оптимизирован для создания моделей из ABS-пластика и предназначен для тех, кто хочет исследовать возможности 3Dпечати показан на рис.1.5.

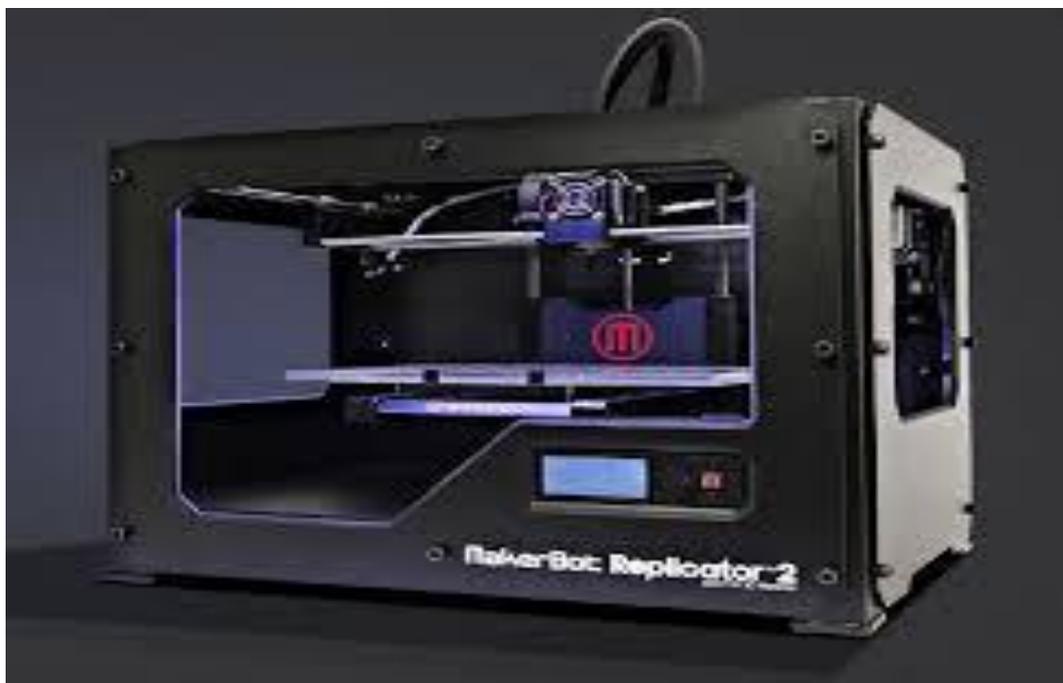


Рис. 1.5. Общий вид 3DпринтераMakerBotReplicator 2X

После того как были созданы все 3D детали регулятора в SolidWorks, нам нужно сохранить их в STL формате, что бы можно было открыть в MAKERBOT DESKTOP.

MAKERBOTDESKTOP программа для работы на 3D принтере MakerBotReplicator. Через неё осуществляется настройка печати (расположение детали, выбор экструдера правый или левый, скорость движения экструдера, выбор материала и тд.) рис.1.6.

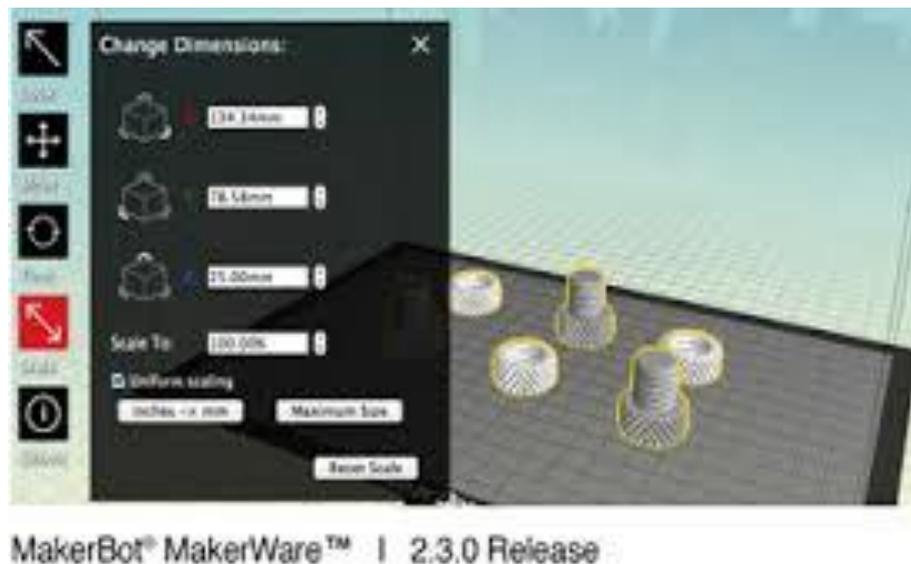


Рис.1.6. Пример работы программы MAKERBOTDESKTOP.

После того как выбраны все необходимые параметры (расположение детали, выбор экструдера правый или левый, скорость движения экструдера, выбор материала и тд.) в MAKERBOTDESKTOP необходимо произвести экспорт детали на SD карту. Затем SD карта устанавливается в 3D принтер MakerBotReplicator для печати (рис.1.7), табл.1.2.



Рис.1.7. Процесс печатания корпуса регулятора на 3D принтере.

Таблица 1.2.

№	Наименование	Кол-во	Материал	Время печати
1.	Корпус	1 шт	ABS (цвет белый)	7ч 15мин
2.	Винт	1 шт	ABS (цвет белый)	55мин
3.	Гайка	1 шт	ABS (цвет белый)	26мин
4.	Гильза	1 шт	ABS (цвет белый)	2ч 23мин
5.	Крышка	1 шт	ABS (цвет красный)	2ч 40мин
6.	Плунжер	1 шт	ABS (цвет синий)	35мин
7.	Пробка	1 шт	ABS (цвет красный)	1ч35мин
8.	Стакан	1 шт	ABS (цвет белый)	40мин
9.	Упор	2 шт	ABS (цвет белый)	2x28мин
10.	Пружина	2 шт	ABS (цвет красный)	2x38мин
	Итого	12 шт		18ч 7мин



а



б

Рис.1.8. Готовые детали регулятора (а) и инструменты для очистки от суппортов и склейки деталей (б).



Рис. 1.9. Очистка от суппортов и полировка деталей.

После распечатки деталей на 3D принтере производится удаление

суппортов, очистка и шлифовка поверхностей деталей (рис. 1.7;1.8;1.9) , а затем и окончательная сборка регулятора (рис.1.10).



Рис.1.10. Пластмассовая модель регулятора в сборе.

Выводы

1. Трехмерное моделирование изделий дает массу преимуществ перед традиционным двумерным проектированием, позволяя обеспечить высокое качество печатных изделий, оперативно вносить корректировки в конструкцию изделия и изменять дизайн регулятора.

2. Технология 3Dпрототипирования позволяет сократить время научно-исследовательских и опытно – конструкторских работ, более чем в 3раза, по сравнению с традиционными методиками.

2. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ

Введение. Сверла предназначены для получения отверстий в сплошном материале и этим отличаются от остальных видов режущих инструментов. Более 60% деталей изделий машиностроения и приборостроения имеют отверстия, которые, в основном, получают быстрорежущими спиральными сверлами. В общем объеме производства режущих инструментов быстрорежущие спиральные сверла составляют около 30%. Поэтому проблема обеспечения безотказности быстрорежущих спиральных сверл достаточно актуальна.

Проблема особенно актуальна для автоматизированного массового производства, одно из условий которого - одновременное использование большого количества режущих инструментов, когда рабочий не может контролировать величину износа каждого из них. Отказ сверла, выраженный в его поломке, приводит к остановке оборудования и, как правило, к браку при обработке изделия. При этом в результате воздействия большого количества случайных факторов процесса резания, величина износа инструментов имеет рассеивание, без учета которого обеспечить их безотказную работу практически невозможно.

Поэтому разработка критериальных зависимостей, позволяющих рассчитать критерии отказа, определяющие предельное состояние инструментов с учетом случайного характера процессов изнашивания, особенно актуальная проблема.

Цель исследований. Целью исследований является разработка критериальных зависимостей для определения признаков предельного состояния (критериев отказа) быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного массового производства, учитывающих случайный характер процессов изнашивания.

Анализ проблемы, задачи исследований. ГОСТ [4] в пояснении к термину «Критерий отказа режущего инструмента» определяет критерий затупления режущего инструмента, как частный случай критерия отказа, характеризующегося значением износа инструмента преимущественно по задней поверхности лезвия. Предельно допустимая величина износа задней поверхности является общепринятым критерием износа режущего инструмента [5]. Методикой [6] и нормативами [7] регламентируются критерии износа спиральных сверл в виде определенной ширины фаски

износа задней поверхности в зависимости от диаметра сверла, без учета случайного характера процессов изнашивания.

Известны зависимости износа задней поверхности от времени работы τ , скорости резания v и подачи s для различных видов режущих инструментов [8]. Для быстрорежущих спиральных сверл эта зависимость имеет вид:

$$\Delta = C_{\Delta} \tau^{1,42} v^{4,85} s^{2,35}, \quad (1)$$

где Δ - износ задней поверхности, C_{Δ} - постоянный коэффициент.

Очевидно, что зависимость (1) не может быть использована в качестве критериальной зависимости, т.к. по ней невозможно рассчитать предельно-допустимую величину износа сверл. Другие зависимости для расчета величины износа спиральных сверл не определены. Вместе с тем в работах [9, 10, 11] показано, что износ задних поверхностей быстрорежущих спиральных сверл может служить критерием отказа только на высоких скоростях резания (21 - 30 м/мин). При работе на средних и низких скоростях резания (6 - 16 м/мин), имеют место другие критерии отказа, не связанные с износом задних поверхностей.

На основании анализа проблемы и в соответствии с поставленной целью определены **задачи исследований**:

1. Разработать критерии отказа быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства и дать им научное обоснование.

2. Разработать критериальные зависимости для расчета критериев отказа быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства, учитывающих случайный характер процессов изнашивания.

Методы исследований. Задачи исследования решались испытаниями быстрорежущих спиральных сверл в лабораторных и производственных условиях [9, 12]. В лабораторных условиях испытывались спиральные сверла диаметром 10,2 мм по ГОСТ 10903–77 из стали Р6М5 при обработке заготовок из стали 45. Испытания сверл проводились до функционального отказа – полной потери режущих свойств в результате износа конструктивных элементов, участвующих в формировании отверстия. В процессе испытаний систематически фиксировались величины износов каждого из них. В производственных условиях испытывались партии спиральных сверл по ГОСТ 10903–77 из стали Р6М5 различных диаметров, по 25 шт. каждого диаметра при обработке заготовок из углеродистых конструкционных сталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках-автоматах. Сверла эксплуатировались до появления признаков потери работоспособности, за которыми следует функциональный отказ [11].

Результаты исследований

Разработка критериев отказа. Лабораторными испытаниями определено, что на работоспособность спиральных сверл, в зависимости от скорости резания, влияют износы задних поверхностей, ленточек и уголков, износ перемычки не оказывает влияния на работоспособность сверл [9].

В работах [13, 14] представлен анализ особенностей конструкции и износа спиральных сверл, существенно отличающихся от других видов режущих инструментов. Отмечено, что особенную роль в этом отличии играет уголок.

Уголок является точкой пересечения главной и вспомогательной режущих кромок сверла и линией пересечения главной задней поверхности со вспомогательной (ленточкой), поэтому он в равной мере является частью их обеих. Износ уголков сверла Δd представлен величиной уменьшения диаметра сверла в процессе изнашивания, как главных задних поверхностей, так и ленточек инструмента. В связи с этим можно допустить, что износ уголков характеризует величину износа, как главных задних поверхностей сверл, так и ленточек. Взаимосвязь этих износов представлена на рис. 2.1 [15].

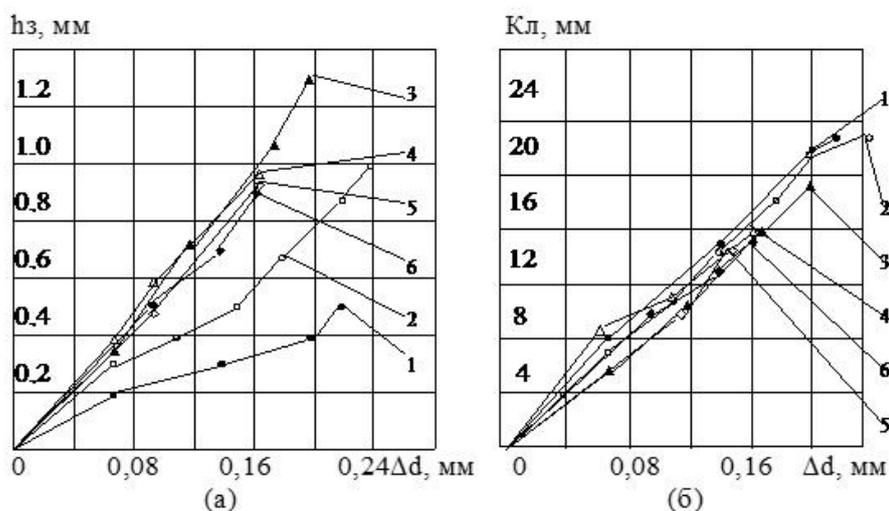


Рисунок 2.1 - Взаимосвязь износов главных задних поверхностей h_z , ленточек Кл с износом уголков Δd сверл диаметром 10,2 мм, где 1 - на скорости резания $V = 9$ м/мин; 2 - $V = 12$ м/мин; 3 - $V = 16$ м/мин; 4 - $V = 21$ м/мин; 5 - $V = 26$ м/мин; 6 - $V = 30$ м/мин

Взаимосвязь между износами задних поверхностей и уголков однозначна и не зависит от скорости резания в диапазоне скоростей резания 16 - 30 м/мин (рис. 1, а). Взаимосвязь между износами ленточек и уголков сверл не зависит от скорости резания и практически однозначна для всего представленного на рис. 2.1 диапазона скоростей резания.

Скорости резания, применяемые в автоматизированном массовом производстве для сверл диаметрами 10 мм и выше, не выходят за рамки

скоростей резания лабораторных исследований. Это видно из результатов анализа обширных статистических материалов представленных на рис. 2.2 [16]. На рис. 2.2 скорости резания не зависят от диаметра сверл и прочих условий эксплуатации. Диапазон применяемых скоростей резания сужается с увеличением диаметра сверл.

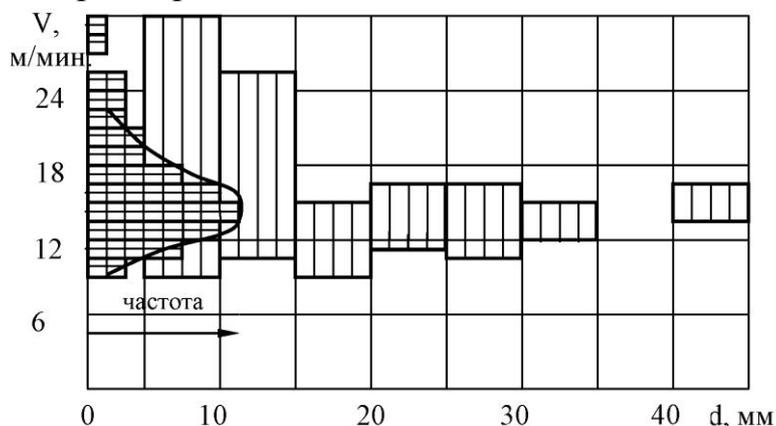


Рисунок 2.2 Скорости резания автоматизированного массового производства

На рис. 3 показаны графики стойкостных зависимостей при функциональном отказе сверл (рис. 2.3, 2.1), и при достижении, рекомендуемого нормативами [7], критерия износа (рис. 2.3, 2.2). Критерием износа сверл данного диаметра принята ширина фаски износа задней поверхности, равная 0,45 мм [7]. Характер кривых 1 и 2 совпадает только в диапазоне скоростей резания 21 - 30 м/мин. На других скоростях резания износ задних поверхностей не может служить характеристикой состояния сверл. Подтверждением этого вывода являются признаки потери работоспособности спиральных сверл, отмеченные в работе [11].

Т, час

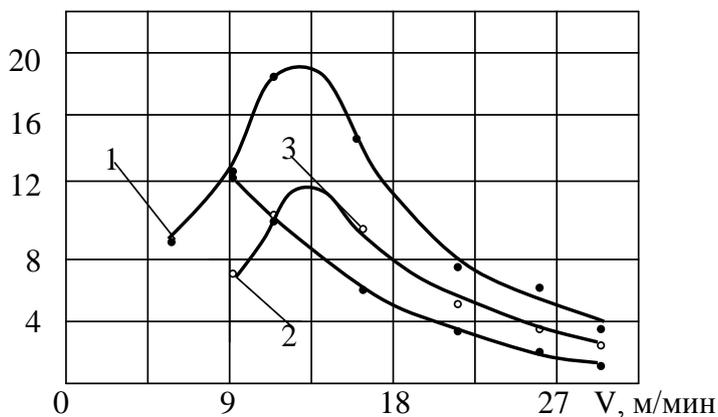


Рисунок 2.3 - Зависимости стойкости от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл диаметром 10,2 мм, где 1 при функциональном отказе, 2 - при достижении критерия износа [7], 3 - при достижении износа уголков величины равной 0,12 мм, подача S равна 0,23 мм/об

Характер графиков зависимостей 3 и 1 (рис. 2.3) полностью совпадает в диапазоне скоростей резания 9 - 30 м/мин. Это подтверждает вывод, что износ уголков может служить критерием отказа быстрорежущих спиральных сверл в этом диапазоне скоростей резания.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что по величине износа уголков можно судить о величине износа ленточек сверл, работающих с любыми скоростями резания, применяемыми в автоматизированном массовом производстве. Характеристикой износа задних поверхностей износ уголков может служить только на высоких скоростях резания.

Разработка критериальных зависимостей

Критериальные зависимости для расчета критерия функционального отказа. Для определения тесноты связи износов ленточек и уголков сверл диаметром 10,2 мм проведен корреляционный анализ, результаты которого представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Корреляционный анализ тесноты связи износов ленточек и уголков

V, м/мин	9	12	16	21	26	30	
$r_{\Delta d K_L}$	0,98	0,997	0,99	0,98	0,98	0,9	$\bar{r}_{\Delta d K_L} = 0,97$
$C_{\Delta d}$	0,0095	0,0109	0,0108	0,012	0,012	0,01	$\bar{C}_{\Delta d} = 0,0108$

В табл. 2.1 $r_{\Delta d K_L}$ -коэффициент корреляции износов уголков и ленточек, $C_{\Delta d}$ - постоянный коэффициент.

Корреляционный анализ показал наличие тесной линейной взаимосвязи между износами ленточек и уголков данных сверл в диапазоне скоростей резания 9 - 30 м/мин. Величина коэффициента корреляции лежит в пределах 0,9 – 0,99, при среднем значении равном 0,97.

На рис. 2.4 представлен график, показывающий линейную зависимость средних значений износа уголков сверл диаметром 10,2 мм от износа ленточек, которую можно представить в виде:

$$\bar{\Delta d} = \bar{C}_{\Delta d} \cdot K_L, \text{ мм.}$$

Величина постоянной $C_{\Delta d}$ существенно не изменяется при варьировании скорости резания (табл. 2.1) и в среднем равна 0,0108, на основании чего получи зависимость

$$\bar{\Delta d} = 0,0108 \cdot K_L, \quad (2)$$

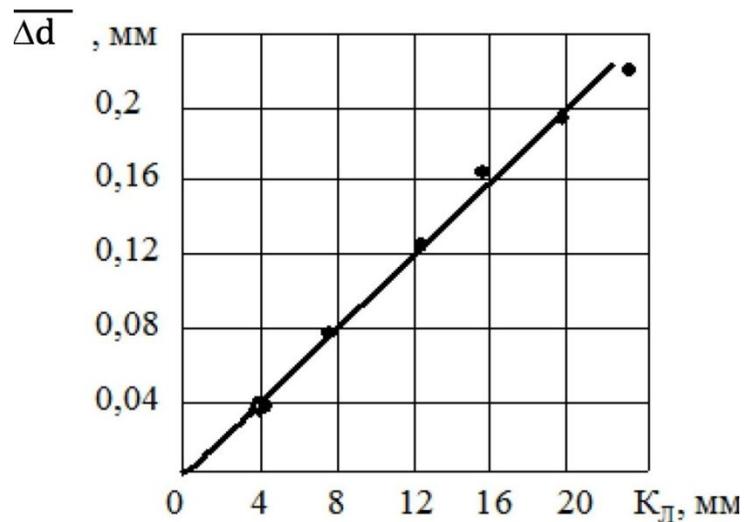


Рисунок 2.4 - Взаимосвязь среднего износа уголков $\overline{\Delta d}$ с износом ленточек $K_{л}$ сверл диаметром 10,2 мм

Из представленных в работе [15] материалов производственных испытаний спиральных сверл диаметром 9,8 мм следует, что их отказы имели место при превышении износа ленточек величины 10 мм. Износ ленточек равный 10 мм можно считать границей безотказной работы этих сверл. На рис. 2.1, б можно определить величину износа уголков сверл при этой величине износа ленточек. Для износа ленточек равного 10 мм величина износа уголков составляет от 0,1 до 0,12 мм. Подставив значение $K_{л} = 10$ мм в формулу 2, получим величину износа уголков $\Delta d = 0,1$ мм.

Условия производственных испытаний сверл представлены в табл. 2.2 [17], в которой скорости резания изменяются в очень узких пределах и не зависят от диаметра сверла и прочих условий их эксплуатации. Это не противоречит результатам статистических исследований, представленных на рис. 2.2. В работах [18, 19] различными методами определена скорость резания максимума стойкостной зависимости, равная 12,8 м/мин. Характерно, что эта скорость практически совпадает со средней скоростью резания \overline{V} равной 12,75 м/мин (табл. 2.2).

Таблица 2 - Условия и результаты производственных испытаний

Диаметр сверла d , мм	9,8	10,5	11,5	12,0	13,8	17,5	21,0	35,0
Скорость резания V , м/мин	13,8	12,6	12,6	12,0	12,6	13,8	13,2	11,4
	$\bar{V} = 12,75$ м/мин							
Подача S , мм/об.	0,22	0,14	0,18	0,14	0,22	0,2	0,23	0,23
Твердость деталей НВ	200	300	200	180	200	190	300	300
Глубина сверления ℓ , мм	25,2	28,5	13,0	14,0	11,0	24,0	17,0	36,0
Средний износ ленточек при отказе сверл $\bar{K}_{\text{ДО}}$, мм	14,4	9,7	10,1	9,4	10,5	18,9	21,0	36,0

Величина износа уголков равная 0,1 мм может быть принята критерием допустимого износа сверл диаметром 10 мм. Критерий гарантирует безотказную работу быстрорежущих спиральных сверл данного диаметра при обработке углеродистых конструкционных сталей на скоростях резания табл. 2.2. При этом удаление 10-ти миллиметрового участка направляющей части сверла при заточке будет гарантировать полное восстановление работоспособности инструмента, а значит и максимальную суммарную стойкость (срок службы) [20].

На рис. 2.1, а минимальная величина износа задних поверхностей в диапазоне скоростей 21 - 30 м/мин при принятом критерии допустимого износа уголков $\Delta d = 0,1$ мм равна 0,45 мм (рис. 1, а), что соответствует нормативному критерию износа сверл этого диаметра [7] и подтверждает достоверность принятого критерия допустимого износа.

Величина износа уголков может быть измерена без снятия сверла со станка, что дает возможность автоматизации контроля состояния инструмента в процессе эксплуатации.

Для выбора критерия допустимого износа сверл других диаметров, необходимо использовать величины среднего износа ленточек при отказе сверл, полученные в результате производственных испытаний, представленные в табл. 2.2. И на рис. 2.5 [18].

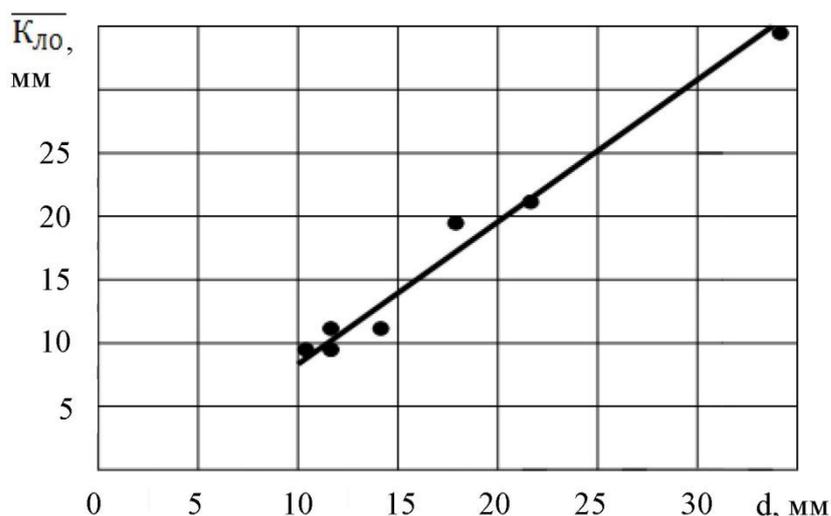


Рисунок 5 - Зависимость средней величины износа ленточек при отказе сверл от их диаметра

Зависимость, показанную на рис. 5 можно представить в виде:

$$\bar{K}_{ЛО} = 1,04d \text{ мм.} \quad (3)$$

Корреляционный анализ показал тесную связь диаметров всех сверл, представленных в табл. 2.2, с их средними величинами износа ленточек. Коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,92 при доверительном интервале 0,621 – 0,928. Как видно в табл. 2.2 величина среднего износа ленточек примерно равна диаметру сверла.

Среднее отношение $\frac{\sum \bar{K}_{ЛО}}{n} = 0,99$. Отношение средних величин $\frac{\bar{K}_{ЛО}}{d} = 1,1$, то есть с большой достоверностью можно принять среднюю величину износа ленточек при функциональном отказе, равной величине диаметра сверла, это может быть связано с прочностью сверла, зависящей от его диаметра. В работе [21] по результатам производственных исследований получен средний коэффициент вариации распределений износа ленточек при отказе сверл $\bar{\mathfrak{V}}_{КЛ}$, равный 0,225. Тогда среднеквадратическое отклонение $\sigma_{КЛ}$ можно определить по формуле:

$$\sigma_{КЛ} = d \cdot \bar{\mathfrak{V}}_{КЛ}.$$

Это значит, что износ ленточек сверл с учетом рассеивания с 95% вероятностью безотказной работы можно определить по формуле:

$$K_{Л\gamma 0,95} = d - 2\sigma_{КЛ} \text{ или } K_{Л\gamma 0,95} = d \cdot (1 - 2\bar{\mathfrak{V}}_{КЛ}),$$

то есть

$$K_{Л\gamma 0,95} = 0,55d, \text{ мм.} \quad (4)$$

Используя зависимости (2), (3) и (4) можно определить значение критерия допустимого износа Δd_0 в зависимости от диаметра сверла с 95 %

вероятностью безотказной работы инструмента ($\gamma = 0,95$) в виде

$$\Delta d_{0,95} = 0,55 \cdot 0,0108 \cdot 1,04 \cdot d, \text{ мм},$$

после перемножения постоянных коэффициентов получим

$$\Delta d_{0,95} = 0,0062d, \text{ мм}. \quad (5)$$

Критериальные зависимости для расчета критерия технологического отказа. На рис. 2.6 [22] представлены графики зависимостей разбивки обрабатываемых отверстий Δ от наработки L сверл диаметром 10,2 мм. Разбивка определялась разностью диаметра просверленного отверстия и первоначального диаметра сверла. Нарботка - суммарной глубиной просверленных отверстий. При сверлении со скоростями 16 м/мин и ниже после определенной наработки ($L_{кр}$) разбивка отверстий становится отрицательной (рис. 2.6), то есть диаметр просверленного отверстия становится меньше первоначального диаметра сверла. Отрицательная разбивка недопустима. Поэтому момент перехода от положительной разбивки к отрицательной ($L_{кр}$) является определяющим признаком критерия технологического износа – когда эксплуатация инструмента должна быть прекращена.

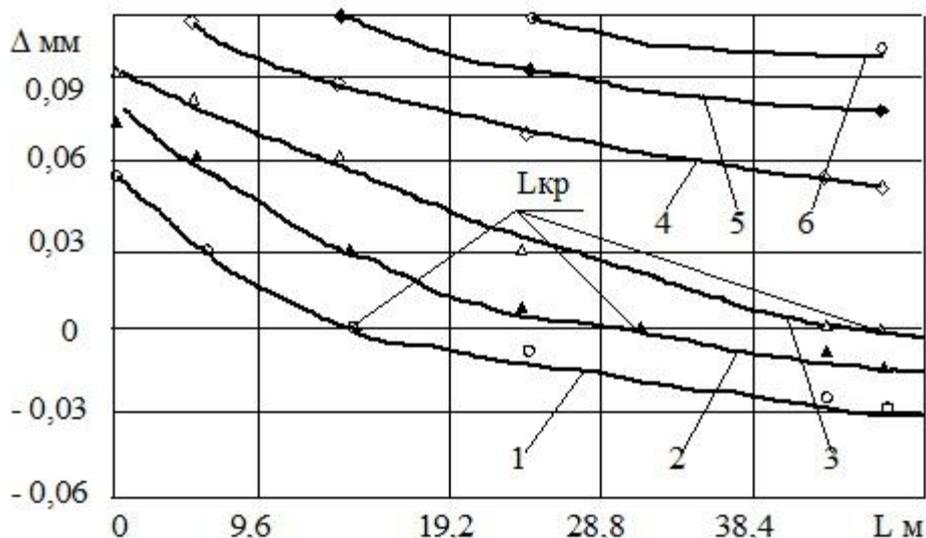


Рисунок 2.6 - Зависимость разбивки отверстия от наработки сверл, где 1 - $V = 9$ м/мин; 2 - $V = 12$ м/мин; 3 - $V = 16$ м/мин; 4 - $V = 21$ м/мин; 5 - $V = 26$ м/мин; 6 - $V = 30$ м/мин

На рис. 2.7 приведена зависимость величины износа задних поверхностей $h_{зкр}$, ленточек $K_{лкр}$, и уголков $\Delta_{дкр}$ сверл, диаметром 10,2 мм от скорости резания при достижении отрицательной разбивки.

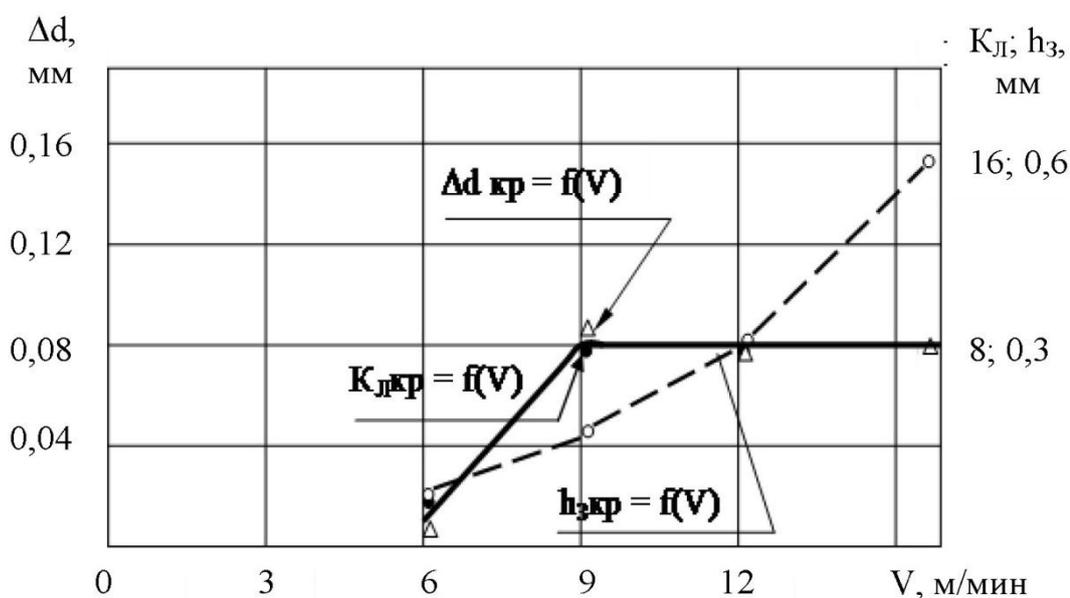


Рисунок 2.7 – Влияние скорости резания на величину износа конструктивных элементов сверл при достижении отрицательной разбивки

На рис. 7 видно, что величина износа задних поверхностей при достижении отрицательной разбивки варьируется от 0,16 мм до 0,6 мм. Износ задних поверхностей равный 0,6 мм превышает рекомендуемый нормативами [7] критерий износа равный 0,45 мм, и в этом случае, не может служить критерием технологического отказа. Это подтверждает вывод о том, что износ задних поверхностей в этом диапазоне скоростей резания не является преобладающим в потере работоспособности сверл.

Графики зависимостей величин износа ленточек $K_{Лкр}$ и уголков $\Delta d_{кр}$ от скорости резания при достижении отрицательной разбивки существенно отличаются от графика зависимости износа задних поверхностей от скорости резания (рис. 5). Вид графиков зависимостей $K_{Лкр} = f(V)$ и $\Delta d_{кр} = f(V)$ абсолютно идентичен, а в диапазоне скоростей 9 - 16 м/мин кривые обоих графиков параллельны оси абсцисс. Совпадение характеров графиков этих зависимостей может быть результатом тесной линейной взаимосвязи между износами ленточек и уголков сверл, показанной выше. Из рис. 2.7 следует, что для сверл диаметром 10,2 мм износ уголков равный 0,08 мм может служить критерием технологического износа в диапазоне скоростей резания 9 ÷ 16 м/мин, в основном применяемых в автоматизированном массовом производстве (рис. 2.2) [10].

Выше была показана тесная взаимосвязь средних износов ленточек при отказе сверл с их диаметрами, коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,92 при доверительном интервале 0,621 – 0,928. Тогда величину критерия технологического износа можно определить по формуле:

$$\Delta d_{TO} = 0,008d, \text{ мм.} \quad (6)$$

С учетом среднего коэффициент вариации стойкости сверл $\bar{\sigma}_{Kл} = 0,225$ получим зависимость для расчета критерия технологического износа с вероятностью безотказной работы $\gamma = 0,95$

$$\Delta d_{TO, \gamma, 0,95} = 0,0046, \text{ мм.} \quad (7)$$

Выше сказано, что нормативами [7] регламентируются критерии износа спиральных сверл в виде определенной ширины фаски износа задней поверхности в зависимости от диаметра сверла. Другие условия обработки не учитываются. Это подтверждается анализом производственных испытаний, приведенным в работах [10, 23], из которого следует, что износ задних поверхностей и ленточек сверл имеет значимую корреляционную связь только с диаметром сверл. Другие условия обработки значимых связей с износом сверл не имеют.

Полученные критериальные зависимости (5) и (7) могут быть использованы для расчета критериев функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл. Однако в процессе сверления необходимо периодически контролировать диаметр просверленных отверстий, что значительно проще, чем контролировать износ сверл и легко поддается автоматизации при обработке деталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках с ЧПУ в условиях автоматизированного производства.

Выводы

1. Разработаны критерии функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства в виде износа уголков.

2. Научно обосновано, что износ уголков спиральных сверл тесно взаимосвязан с износом ленточек на скоростях резания 9 - 30 м/мин, и с износом задних поверхностей на скоростях 21 - 30 м/мин.

3. Разработаны критериальные зависимости для расчета критериев функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства, учитывающие случайный характер процессов изнашивания.

3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАТОЧКИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ОТВЕРСТИЙ И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

Погрешности заточки спиральных сверл

Большое влияние на стойкость инструмента и точность обрабатываемых отверстий оказывает точность заточки сверл. Сверло считается правильно заточенным, если удалены следы затупления, состояние поверхностных слоев режущей части и шероховатость кромок отвечают требованиям технических условий, заданные геометрические параметры: 2φ , α , ψ - выполнены с необходимой точностью, биение главных кромок находится в установленных пределах.

Рассмотрим некоторые случаи погрешностей заточки сверл [27].

Случай I

$$l_1 < l_2$$

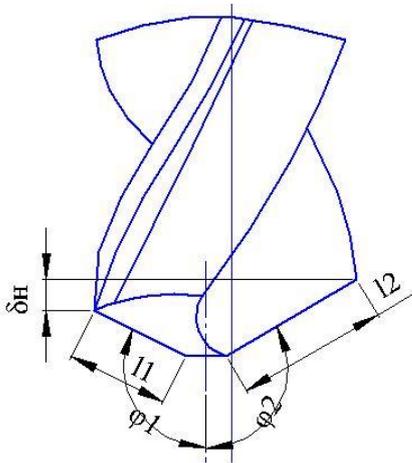
$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$S_1 < S_2$$

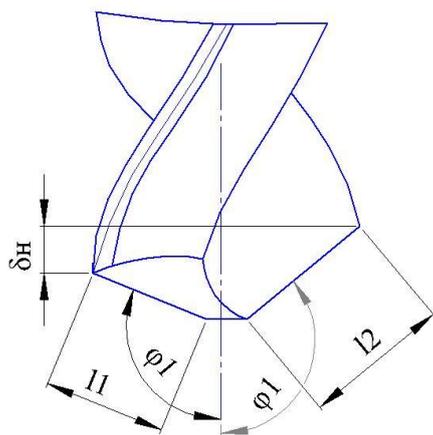
Одно перо сточено больше другого (подача осуществлена на разную глубину, выхаживание произведено неодинаково).

Результат – смещение поперечного лезвия, получение различной длины главных режущих лезвий, и как следствие

$$\Delta l_{oc} \neq 0.$$



Случай II



$$l_1 < l_2$$

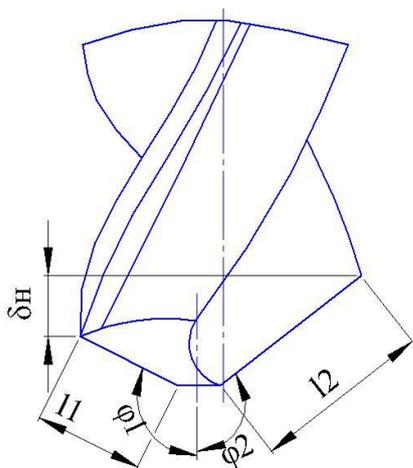
$$\varphi_1 < \varphi_2$$

После заточки первого пера сверло повернуто не точно на 180° или после поворота сверла его ось занимает положение под некоторым углом к первоначальному.

Результат – неравенство углов в плане, длин главных режущих лезвий и осевое

смещение точек главных режущих лезвий.

Случай III

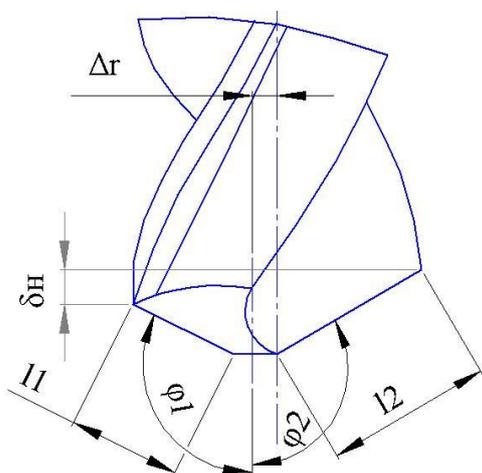


$$l_1 < l_2$$

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

Внешне не отличается от случая I как графически, так и по последствиям, но является результатом погрешностей в закреплении сверла в заточном приспособлении, когда ось сверла не совпадает с осью заточки.

Случай IV



$$l_1 < l_2$$

$$\varphi_1 < \varphi_2$$

Является обобщающим как комбинации ошибок первых 3-х случаев. В общем случае будут получены разные углы в плане, длины главных режущих лезвий, смещения поперечного лезвия и осевое смещение наружных точек главных режущих лезвий. В частном случае такое сочетание погрешностей может

получиться, когда окажется, что $\ell_1 = \ell_2$ или Δz или ℓ_{oc} [28].

Согласно ГОСТ 2034-80 предельное отклонение угла при вершине и заднего угла не должны быть более $\pm 3^\circ$, допуск прямолинейности режущих кромок не должен быть более 0,15 мм.

Анализ влияния методов заточки сверл на точность обрабатываемых отверстий и стойкость инструмента

Конструкция спирального сверла соответствует двойному его назначению: быть режущим инструментом, образующим цилиндрическое отверстие в сплошном материале и шнеком, транспортирующим стружку из зоны резания.

Качество заточки сверла оценивается его геометрическими параметрами и состоянием поверхностного слоя (физико-механические характеристики, шероховатость, величина и знак остаточных напряжений).

Геометрические параметры сверла характеризуются не только значениями углов его заточки (α , 2φ , ω , ψ , γ и др.), но и конструктивными элементами (обратная конусность, утолщение сердцевины, форма задних и передних поверхностей и поперечной кромки и др.).

Поэтому без преувеличения можно сказать, что качество заточки сверл во многом предопределяет его стойкость и точность обрабатываемых им отверстий.

Проанализируем кратко основные методы заточки задних поверхностей сверл, их достоинства и недостатки.

Заточка конического вида

Коническая заточка – наиболее известный метод заточки. Обработка ведется торцовой или цилиндрической поверхностью шлифовального круга. Затачиваемое сверло и шлифовальный круг свободно осциллируют вдоль линии их контакта.

Существует три типа конической заточки, отличающиеся знаком угла установки головки: заточка по Уошборну, Вейскеру и Блау. Характерным для них является выпуклая форма поперечной кромки, отличие в закономерности изменения нормального заднего угла вдоль главной режущей кромки. Так, по мере приближения к оси сверла нормальный задний угол возрастает при заточке по Уошборну, остается постоянным при заточке по Блау и уменьшается при заточке по Вейскеру.

Заточка винтового вида

При этом виде заточки применяются шлифкруги, работающие конической, цилиндрической поверхностями или торцем круга. Обычно

диаметр шлифкруга в 10...30 раз превышает диаметр сверла. Винтовая заточка имеет следующие особенности: постоянный угол между осью сверла и плоскостью шлифкруга; вращение вокруг оси сверла; поступательное перемещение; суммарный вектор скорости которых при прямом ходе образует с осью сверла острый угол.

В процессе заточки сверл вследствие ряда причин, таких как: неодинаковая стачиваемость обеих перьев, неточность деления при переходе от заточки одного пера к другому, погрешность закрепления сверла в заточном приспособлении (ось сверла не совпадает с осью заточки) и другие, возможны погрешности их заточки, приводящие к несимметричности задних поверхностей.

Возможные случаи погрешностей заточки спиральных сверл показаны нами ранее.

Для сверл характерно многообразие методов заточки, но главное отличие их состоит в форме задних поверхностей и геометрических параметрах поперечной кромки, на которой процесс деформации стружки представляет сложное сочетание выдавливания и резания с отрицательными передними углами.

Как показали исследования [24, 25] в условиях равенства углов 2φ и α и симметричности главных кромок, нарастание задних углов от периферии к центру при всех методах заточки протекает практически с одинаковой скоростью. Для всех методов заточки в пределах диаметров секущего цилиндра $D_x(0,35...1,0)D$ задний угол приближенно равен:

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \operatorname{tg} \alpha \frac{D}{D_x}$$

Поэтому характер изменения задних углов вдоль кромок не может служить причиной отклонения эксплуатационных качеств сверл, что подтверждается равенством крутящих моментов у сверл с разной заточкой.

Главное отличие, определяемое методом заточки, заключается в геометрических параметрах поперечной кромки.

Так, поперечная кромка при конической и цилиндрической заточках представляет собой выпуклую кривую линию, очень близкую к прямой: превышение вершины сверла над точками пересечения поперечной и главных режущих кромок составляет $(0,002...0,005)D_{св}$; при винтовой заточке поперечная кромка практически прямолинейна. Такая форма поперечной кромки является недостатком криволинейных задних поверхностей, т.к. ухудшает и без того плохие условия центрирования сверла

во время резания, способствуя разбивке отверстия и снижению стойкости из-за увеличенного износа ленточек. Абсолютные величины отрицательных передних углов поперечной кромки для этого метода заточки не постоянны по ее длине, а несколько уменьшаются по направлению от вершины сверла к главной режущей кромке.

Выводы

При винтовой заточке величина переднего угла поперечной кромки несколько меньше, чем при конической и цилиндрической заточках, что облегчает процесс резания (уменьшает осевую силу и тепловыделение) и повышает стойкость сверл.

Наиболее рациональной заточкой с точки зрения простоты осуществления, точности, а также работоспособности задней поверхности является заточка по двум плоскостям. Эта заточка вследствие заострения поперечной кромки и уменьшения абсолютной величины передних углов на ней улучшает условия центрирования, уменьшает величину осевой силы и исключает необходимость подточки перемычки. Все это способствует высокой точности отверстий и стойкости инструмента. Результаты исследований различных методов заточки с точки зрения их влияния на точность обрабатываемых отверстий и стойкость инструмента изложены в работах [24, 25, 26, 27, 28, 29 и др.] и кратко представлены на иллюстрационных листах графической части проекта.

4. МОДЕЛЬ ДОКРИТИЧЕСКОГО ПОДРАСТАНИЯ ТРЕЩИНЫ НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЕ.

Работа посвящена исследованию механизма докритического подрастания усталостных трещин в конструкционных металлических материалах на макро- и микроструктурных уровнях с целью разработки модели структурно-энергетической микро-механики трещиностойкости в условиях внецентренного статического нагружения.

В основу модели положена концепция [30] стабильного микро-подрастания трещины, дискретно перемещающейся через большое число микрон зон разрушения (1) с предельной плотностью энергии деформации. При этом докритические стартовые значения силовых параметров

трещиностойкости σ_Q и K_Q могут быть значительно меньше их критических (предельных) значений σ_{IC} и K_{IC} (K_C) при которых происходят макроскачки и перемещения трещин на расстояния, соизмеримые с зонами глобальной пластической неустойчивости.

Рассматриваемая здесь модель докритического локального подрастания трещин в условиях максимального упругопластического стеснения при плоской деформации предполагает принятие следующих условий:

1. Одновременный микро-старт и локальное подрастание трещины возможны не во всех точках линии её фронта, а только в пределах центрального, относительно прямолинейного участка, протяжённостью ΔJ , равноудаленного от боковых поверхностей образца. С увеличением толщины образца t протяжённостью участка ΔJ , на котором достигается наибольшее упруго-пластическое стеснение, будет увеличиваться ($\Delta J \rightarrow t$) и наоборот: при малых t параметр $\Delta J \rightarrow 0$.

2. В пределах ΔJ общее приращение ΔL_{0*} исходной длины трещины L_0 (на микро- и макроуровне) при достижении предельного состояния не должно превышать $(0,045 \div 0,05) \cdot t$ для относительных длин трещин $L_0 / B_p \approx 0,35 \div 0,4$ или для $t < t_p$ ($B < B_p$). Здесь t_p и B_p - расчетные минимально достаточные толщина и ширина компактного образца, устанавливаемые в соответствии со Стандартом РФ [32].

3. Для средней длины трещины $L_0/B_p = 0,5$ (среди относительно больших трещин: $0,35 \leq L_0/B_p \leq 0,65$) допускаемое приращение ΔL_{0*} принимается равным $0.02 \cdot t_p$, что тоже соответствует требованию Стандарта [32].

4. По условию (3) для трещины относительной длины $L_0/B_p = 0,5$ устанавливается средний стартовый размер $2r_c = 0.02t_p$ пластической зоны, которая может быть сформирована к началу срагивания трещины в пределах участка ΔJ .

В соответствии с концепцией Ирвина [33] и её графической интерпритацией, предоставленной на рис.3, корреляционная связь между стартовыми значениями параметров $2r_c^{st}$ и $K_Q^{мик}$ может быть выражена следующим уравнением :

$$K_Q^{мик} = Q \cdot G_T \sqrt{2\pi r_c^{st}} \quad (1)$$

Здесь Q_{st} – коэффициент перенапряжения на границе пластической зоны $2r_c^{st}$ (при плоской деформации $Q > 1.0$) ; σ_t – предел текучести.

В соответствии с предлагаемой моделью микроразрушения [31], трещина, стартуя при K_Q^{st} и $2r_c^{st}$, стабильно подрастает, дискретно перемещаясь через большое число микрочон, поочередно формирующихся в пластической макроне (2), пока её длина не достигнет критическо $L_{IC} = L_0 + L_0^{мик}$ (где: $\Delta L_0^{мик} = r_c^{st}$) . К этому моменту размер пластической макрзоны и уровень интенсивности напряжений перед подросшей трещиной увеличатся до критических (предельных) значений - $2r_c^{IC}$ и K_{IC} (K_C), при которых движущаяся трещина длиной $L_0 + r_c^{st}$ может совершить макроскачѣк (иногда фиксируемый в эксперименте) в пределах второй половины пластической макрзоны стартового размер (т.е. на r_c^{st}) где предварительно будет достигнута

достаточно высокая плотность энергии в деформации и тогда общее приращение составит: $\Delta L_{ox} = \Delta L_0^{мик} + \Delta L_0^{мак} = 2r_c^{st}$ Согласно Н.А. Махутову, при плоско – деформированном напряженном состоянии связь между параметрами предельного состояния r_C^{IC} и K_{IC} может быть выражена следующим уравнением:

$$r_C^{IC} = \frac{K_{IC}^2}{6\pi\sigma_T^2}$$

Или

$$K_{IC} = \sqrt{3} \cdot \sigma_T \sqrt{2\pi} r_C^{IC}$$

Здесь $\sqrt{3}$, по аналогии с (1), соответствует критическому значению коэффициента перенапряжения $Q_{IC} \approx 1.7$ на границе пластической зоны $2r_C^{IC}$ при K_{IC} .

Дж. Ноттом было установлено, что при достаточно больших и острых (подобно хрупким) трещинах, критические уровни перенапряжений могут достигать более высоких значений: $Q_{IC}^{max} = 2,6 \div 2,8$. В этой связи

коэффициент $\sqrt{3}$ в уравнении (2), вероятно, соответствует наименьшему из возможных критических значений Q_{IC} , которые могут изменяться (в зависимости от условий нагружения и т.д.) В довольно широком интервале:

$1,7 \leq Q_{IC} \leq 2,8$. Примем, что значение 1,7 соответствует Q_{IC}^{min} , а 2,8 - Q_{IC}^{max}

Таким образом, с момента старта трещины на микроуровне (при плоской деформации $Q_{st} > 1$) и до достижения в материале с трещиной критического (предельного) состояния уровень перенапряжения на границе пластических зон может изменяться в следующих пределах:

$$1.0 < Q = (1,7 \div 2,8).$$

Как видно, границы интервала стартовых значений Q_{st} , отвечающих первым микроотрагиваниям трещин, пока не установлены. Вместе с тем, за

нижнюю границу интервала значений Q_{st} (при плоской деформации), в

первом приближении, можно принять $Q_{st}^{\min} \approx \sqrt{2}$, так как при меньших значениях ($Q_{st}^{\min} < 1,4$) стартовая величина параметра $K_Q^{мик}$ существенно приближается к таковой (K_{S^*}) установленной нами ранее для дискретно движущихся усталостных трещин при циклическом внецентральном растяжении.

Поскольку страгивать неподвижную трещину как известно, значительно труднее [8], то величины докритических параметров трещиностойкости при статическом и циклическом нагружении - K_Q^{st} и K_{S^*} должны иметь существенные различия, наблюдаемые только при $Q_{st} \geq 1,4$.

Поскольку силовой параметр трещиностойкости K коррелирует с энергией G_I на единицу длины трещины ($K_I^2 \approx \sigma_I \cdot E$ [4], где E - модуль упругости), то разность таких энергетических параметров, как K_{IC} и $K_Q^{мик}$

$$\Delta K_* = K_{IC} - K_Q^{мик} \quad (3)$$

Может соответствовать затратам энергии для приращения исходной длины трещины L_0 на величину $\Delta L_0^{мик}$

$$\text{Или: } \Delta K_* = Q_* \sigma_T \sqrt{\pi \cdot \Delta L_0^{мик}} \quad (4)$$

Приравняв первые части (3) и (4) можно определить значение коэффициента перенапряжения Q_* :

$$Q_* = \frac{K_{IC}^{\min} - K_Q^{мик}}{\sigma_T \sqrt{\pi \Delta L_0^{мик}}} \quad (5)$$

$$\text{Здесь } K_{IC}^{\min} = Q_{IC}^{\min} \sigma_T \sqrt{2\pi r_c^{IC}} \quad (6)$$

$$\text{И: } K_{IC}^{мик} = Q_{st}^{\min} \sigma_T \sqrt{2\pi r_c^{st}} \quad (7)$$

$$\text{При } Q_{st}^{\min} \approx 1.4; Q_{IC}^{\min} \approx 1.7 \text{ и } \Delta L_0^{мик} = r_c^{st}$$

Из (5) найдем, что $Q_* \approx 1,55$. То есть: $Q_* = (Q_{st} + Q_{IC})$

Решая совместно (6) и (7), получим :

$$\frac{K_{IC}^{\min}}{K_Q^{MIK}} = 1,2 \left[\frac{r_c^{IC}}{r_c^{st}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Так как в уравнении (4) параметр ΔL_0^{MIK} эквивалентен радиусу r_c^{st} пластической зоны стартового размера, T_0 (4) можно преобразовать к виду:

$$r_c^{st} = \frac{\Delta K_*^2}{2,4\pi\sigma_T^2} \quad (9)$$

Подставить это выражение для r_c^{st} в уравнении (7) и решая его совместно с (6) с целью установить ΔK с учётом (3), получим следующую корреляцию:

$$\Delta K_* \approx 0,44 K_{IC}^{\min} \quad (10)$$

Следует отметить, что безразмерные коэффициенты 1.2 в (8) и 0.44 в (10) не постоянны, соответствуют только минимальным значениям Q (стартовому $Q_{st}^{\min} \approx 1.2$ и критическому $Q_{IC}^{\min} \approx 1.7$), отвечающим компактным образцам, расчетные размеры которых (t_p и B_p) установлены [3] по K_{IC}^{\min} :

$$t_{P*} = 2,5 (K_{IC}^{\min})^2 / \sigma_T^2 ; \text{ при } L_0 / B_{P*} = 0.5$$

$$\text{и } t_{P*} / B_{P*} = 0.5 \quad (11)$$

где : K_{IC}^{\min} – наименьшее из критически значений K_{IC} для данного материала, структуры и температуры испытания t_i

Значение $K_{IC}^{\min} = K_{IC}^{ti}$ при температуре t_i определяется из условия постоянства величины произведения (С) двух силовых параметров

$C = \sigma_T^{ti} \cdot K_{IC}^{ti} = \text{Const}$ в широком диапазоне температур испытания [9].

Согласно [33], постоянная «С» устанавливается по экспериментальному значению K_{IC}^{-196} , определяемому при $t = -196^{\circ}\text{C}$ в условиях внецентренного растяжения компактных образцов небольших размеров ($t = 20_{\text{мм}}, B = 40_{\text{мм}}$):

$$C = K_{IC}^{-196} \cdot \sigma_T^{-196} \approx K_{IC}^{+20} \cdot \sigma_T^{+20}$$

где: K_{IC}^{+20} и σ_T^{+20} – значения K_{IC}^{min} предела текучести, отвечающее температуре $+20^{\circ}\text{C}$.

Зная «С» и предел текучести σ^{+20} можно установить для $+20^{\circ}\text{C}$ субкритический предел трещиностойкости – K_{IC}^{min} , который важно учитывать и для не хрупких материалов средней и даже низкой прочности, если не исключены такие факторы как: повышение скорости нагружения, присутствие в сечении с трещиной хрупких фаз, включений и т.п.

На рис. 4 сопоставлены значения субкритического $K_Q^{\text{мик}}$ и критического $K_Q^{\text{мак}} = K_{IC}^{\text{min}}$ пределов трещиностойкости, полученные расчетным путем (при $L_0 / B_{P*} = 0,5$ и при разных σ_T^{+20}) для сталей низкой, средней и высокой прочности. Здесь также указаны минимальные значения толщины t_{P*} компактного образца, достаточные для установления K_{IC}^{min} при $+20^{\circ}\text{C}$ в соответствии с условиями (11) [32].

Видно, что при указанных на рис.4 размерах компактных образцов, изменяющихся в зависимости от σ_T в очень широких пределах ($4_{\text{мм}} \leq t_P \leq 270_{\text{мм}}$), величина соотношения верхнего и нижнего пределов трещиностойкости практически не зависит от уровня прочности стали и в среднем равна $K_{IC}^{\text{min}} / K_Q^{\text{мик}} \approx 1,75$.

При этом значения субкритического(нижнего) предела трещиностойкости

($K_Q^{мик}$) составляют 55,6 % ÷ 61,1% от критических значений верхнего предела трещиностойкости (K_{IC}^{min}), а величина энергии ($\Delta K = K_{IC}^{min} - K_Q^{мик}$), затрачиваемой на дискретно – локальное подрастание трещины в пределах радиуса (r_c^{st}) пластической зоны стартового размера, зависящего от исходных длин трещин (L_0) и размеров образцов, изменяется от $\Delta K = 122 \text{ кг/мм}^{3/2}$ (для стали 20) до $70 \text{ кг/мм}^{3/2}$ (для высокопрочной стали 40ХН2СВА)

Ясно, что для низко – и высокопрочной стали полученные результаты могут представлять только теоретический интерес, так как испытать на трещиностойкость компактные образцы толщиной $t_{P^*} = 3 \div 4_{\text{мм}}$ (рис.4) или $t_{P^*} = 270_{\text{мм}}$ и шириной B_{P^*} соответственно равной $6 \div 8_{\text{мм}}$ или $540_{\text{мм}}$ практически невозможно (да и нет необходимости), поскольку инженерные конструкции таких размеров вряд ли будут востребованы на практике.

Вывод

Естественно, что практический интерес представляют прежде всего результаты, полученные на образцах, характерные размеры которых приближены к размерам конкретных деталей. При этом сопоставление разных материалов по трещиностойкости целесообразно проводить, корректируя экспериментальные значения с учетом конструкционных и прочностных параметров.

5. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Повышение требований к изделиям машиностроительной промышленности вызывает необходимость в использовании материалов деталей, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Такие материалы, как правило, являются труднообрабатываемыми и требуют использование нетрадиционных методов обработки.

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, одним из которых является обрабатываемой деталью, а другой-электродом-инструментом (ЭИ). Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла

Для получения высокой температуры в ограниченной области малого объема необходима большая концентрация энергии. Достижение этой цели осуществляется использованием импульсного напряжения, а ЭЭО осуществляется в жидкой среде, которая заполняет зазор между электродами, называемый межэлектродным промежутком (МЭП), или межэлектродным зазором.

Ввиду того, что любая гладкая поверхность имеет свой макро- или микрорельеф, между двумя электродами всегда найдутся две точки, расстояние между которыми будет меньше, чем между другими точками поверхностей электродов. При подключении к электродам источника напряжения (в данном случае импульсного) между электродами начинает протекать ток и возникает электрическое поле, напряженность которого между близлежащими точками электродов будет достигать наибольшего значения. Под воздействием электрического поля в зоне наибольшего напряжения происходит ионизация рабочей среды с образованием канала повышенной проводимости, т. е. нарушается электрическая прочность рабочей среды. И между этими двумя близлежащими точками происходит пробой МЭП. Между точками, в которых произошел пробой рабочей среды, образовывается канал с высокой электрической проводимостью.

Сечение канала разряда мало, а его расширению препятствует магнитное поле, которое сжимает канал. Ту же роль выполняет и рабочая среда, окружающая канал разряда. Длина канала разряда и его диаметр очень малы и поэтому плотность энергии в нем достигает больших величин, а температура в этом локальном объеме- десятков тысяч градусов. В точках, в

которых разрядный канал опирается на электроды, происходит оплавление и испарение материала с поверхности электродов. Рабочая среда, окружающая канал разряда, под воздействием высоких температур разлагается и испаряется. Все эти процессы происходят в очень малые отрезки времени и с выделением больших энергий, поэтому они носят динамичный взрывной характер.

Под действием сил, развивающихся в канале разряда, жидкий и парообразный материал выбрасывается из зоны разряда в рабочую среду, окружающую его, и застывает в ней с образованием отдельных частиц. В месте действия импульса тока на поверхности электродов появляются лунки, образовавшиеся вследствие удаления импульсным разрядом какого-то количества материала. Таким образом осуществляется электрическая эрозия токопроводящего материала, показанная на примере действия одного импульса, с образованием одной эрозионной лунки. После прекращения действия импульсного разряда напряжение на электродах падает. Начинается процесс деионизации рабочей среды, т. е. нейтрализация заряженных частиц, и электрическая прочность рабочей среды восстанавливается. Межэлектродный промежуток подготавливается для нового прохождения очередного разряда. Если на электроды от генератора периодически поступает импульсное электрическое напряжение, то процесс будет повторяться. При этом каждый новый импульсный разряд будет происходить в том месте, где расстояние между электродами минимально.

Если пауза между импульсными разрядами достаточна для деионизации рабочей среды, т. е. для восстановления ее электрической прочности, то процесс будет повторяться с образованием новых эрозионных лунок на поверхности электродов, этим и обуславливается электроэрозионный съем материала, т. е. ЭЭО. При достижении напряжения определенной величины происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда 6. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии металл в точке разряда плавится и испаряется, рабочая среда испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада 7 (газовым пузырем). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного металла 4 выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы. В дальнейшем эти частицы выносятся течением рабочей

... Количество тепловой энергии, выделяющейся на каждом из электродов при импульсном электрическом разряде, неодинаково; также различно и

количество снимаемого материала с поверхности каждого из электродов. Масса расплавленного и удаленного материала с электрода зависит от ряда факторов; к ним относятся: теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены электроды (температура кипения, плавления, теплопроводность и теплостойкость); параметры рабочего импульса; полярность подключенных электродов. Можно подобрать такое соотношение теплофизических свойств материала электродов и параметров импульса, при которых электрическая эрозия одного из электродов будет преобладать. Эрозия ЭИ нежелательна, так как под >ге воздействием в процессе работы изменяются его геометрические размеры, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на точность ЭЭО. Поэтому стремятся создать условия, при которых эрозия ЭИ была бы значительно меньше, чем эрозия обрабатываемой заготовки. Решают эту задачу различными способами. Использование импульсов, у которых ток не изменяет своего направления в течение всей длительности импульса.. Такие импульсы называются униполярными.

Использование униполярных импульсов позволяет осуществить процесс избирательной электрической эрозии одного из электродов на примере действия одного импульса, с образованием одной эрозионной лунки. После прекращения действия импульсного разряда напряжение на электродах падает. Начинается процесс деионизации рабочей среды, т. е. нейтрализация заряженных частиц, и электрическая прочность рабочей среды восстанавливается. Межэлектродный промежуток подготавливается для нового прохождения очередного разряда. Если на электроды от генератора периодически поступает импульсное электрическое напряжение, то процесс будет повторяться. При этом каждый новый импульсный разряд будет происходить в том месте, где расстояние между электродами минимально.

Если пауза между импульсными разрядами достаточна для деионизации рабочей среды, т. е. для восстановления ее электрической прочности, то процесс будет повторяться с образованием новых эрозионных лунок на поверхности электродов, этим и обуславливается электроэрозионный съем материала, т. е. ЭЭО. При достижении напряжения определенной величины происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда 6. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии металл в точке разряда плавится и испаряется, рабочая среда испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада 7 (газовым пузырем). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного металла выбрасываются за

пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы В дальнейшем эти частицы выносятся течением рабочей среды из МЭП.

Количество тепловой энергии, выделяющейся на каждом из электродов при импульсном электрическом разряде, неодинаково; также различно и количество снимаемого материала с поверхности каждого из электродов Масса расплавленного и удаленного материала с электрода зависит от ряда факторов; к ним относятся: теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены электроды (температура кипения, плавления, теплопроводность и теплостойкость); параметры рабочего импульса; полярность подключенных электродов Можно подобрать такое соотношение теплофизических свойств материала электродов и параметров импульса, при которых электрическая эрозия одного из электродов будет преобладать Эрозия ЭИ нежелательна, так как под воздействием в процессе работы изменяются его геометрические размеры, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на точность ЭЭО. Поэтому стремятся создать условия, при которых эрозия ЭИ была бы значительно меньше, чем эрозия обрабатываемой заготовки Решают эту задачу различными способами. Использованием импульсов, у которых ток не изменяет своего направления в течение всей длительности импульса. Такие импульсы называются униполярными

Использование униполярных импульсов позволяет осуществить процесс избирательной электрической эрозии одного из электродов. Если при этом оба электрода изготовлены из одного и того же материала, то при малой продолжительности импульсов преобладает эрозия электрода, имеющего положительную полярность (анода), а при импульсах большой длительности преобладает эрозия электрода, имеющего отрицательную полярность (катода). Деление импульсов на импульсы малой и большой длительности условное. Оно принято в ЭЭО и не имеет четких границ. Превышение эрозии одного электрода над другим принято называть в ЭЭО полярным эффектом.

При наличии изменений полярности за время прохождения импульсов полярный эффект также изменяется и может исчезнуть вовсе (в случае использования знакопеременных импульсов с одинаковой амплитудой частей импульса, имеющих разные полярности). Такое явление наблюдается, например, при работе на переменном токе Полярный эффект может сохраниться при знакопеременных импульсах, когда электроды изготовлены из различных материалов, имеющих различные тепло-физические свойства Полярный эффект достигает наибольшего значения при использовании униполярных импульсов значительной длительности и небольшой энергии В

ЭЭО принято, что если обрабатываемая деталь подключена к положительному полюсу генератора, а ЭИ — к отрицательному, то такое включение электродов называется включением на прямую полярность. Если ЭИ подключен к положительному полюсу генератора, а обрабатываемая деталь — к отрицательному, то такое включение электродов называется включением на обратную полярность.

Электрическая эрозия будет менее интенсивной у материалов, обладающих высокими температурами плавления, и наоборот. Интенсивность электрической эрозии обрабатываемого материала (детали) — одна из важнейших составляющих производительности процесса ЭЭО. Так, обрабатываемость алюминия выше, чем у стали, так как температура его плавления значительно ниже. Исключение составляет твердый сплав, который имеет эрозионную стойкость ниже, чем у стали, и обладает более высокой температурой плавления.

Материалы, из которых должны изготавливаться ЭИ, должны иметь высокую эрозионную стойкость. Таким образом, подбирая материал для ЭИ с более высокими теплофизическими свойствами (что соответствует и более высокой эрозионной стойкости), можно значительно уменьшить его износ в процессе работы. Наилучшие показатели в отношении эрозионной стойкости ЭИ и обеспечения стабильности протекания электроэрозионного процесса имеют: медь, латунь, вольфрам, алюминий и углеграфитовые материалы. Они пригодны для изготовления ЭИ при обработке всей группы материалов, обрабатываемых электроэрозионным методом. ЭИ из меди применяются реже из-за высокой их стоимости и дефицитности меди, а чаще применяют ЭИ из углеграфита.

Применяются ЭИ различной конфигурации. Копировально-прошивочные операции выполняются профилированными ЭИ. Такие ЭИ имеют трехмерную поверхность, являющуюся зеркальным отображением обрабатываемой детали или ее элементов, т. е. форма и размеры ЭИ определяются формой и размерами обрабатываемой детали или ее элементов.

Контурная вырезка осуществляется непрофилированными ЭИ. В качестве непрофилированного ЭИ используется калиброванная проволока, изготавливаемая из латуни, вольфрама и других сплавов. В этом случае форма и размеры ЭИ могут быть не связаны с формой и размерами обрабатываемой детали или ее элементов и отображать их лишь частично.

Электроэрозионным способом могут выполняться различные технологические операции профилированным и непрофилированным ЭИ. Если при этом оба электрода изготовлены из одного и того же материала, то при малой продолжительности импульсов преобладает эрозия электрода,

имеющего положительную полярность (анода), а при импульсах большой длительности преобладает эрозия электрода, имеющего отрицательную полярность (катода). Деление импульсов на импульсы малой и большой длительности условное. Оно принято в ЭЭО и не имеет четких границ. Превышение эрозии одного электрода над другим принято называть в ЭЭО полярным эффектом.

. При наличии изменений полярности за время прохождения импульсов полярный эффект также изменяется и может исчезнуть вовсе (в случае использования знакопеременных импульсов с одинаковой амплитудой частот импульса, имеющих разные полярности). Такое явление наблюдается, например, при работе на переменном токе. Полярный эффект может сохраниться при знакопеременных импульсах, когда электроды изготовлены из различных материалов, имеющих различные тепло-физические свойства. Полярный эффект достигает наибольшего значения при использовании униполярных импульсов значительной длительности и небольшой энергии. В ЭЭО принято, что если обрабатываемая деталь подключена к положительному полюсу генератора, а ЭИ — к отрицательному, то такое включение электродов называется включением на прямую полярность. Если ЭИ подключен к положительному полюсу генератора, а обрабатываемая деталь к отрицательному, то такое включение электродов называется включением на обратную полярность.

Электрическая эрозия будет менее интенсивной у материалов, обладающих высокими температурами плавления, и наоборот. Интенсивность электрической эрозии обрабатываемого материала (детали) — одна из важнейших составляющих производительности процесса ЭЭО. Так, обрабатываемость алюминия выше, чем у стали, так как температура его плавления значительно ниже. Исключение составляет твердый сплав, который имеет эрозионную стойкость ниже, чем у стали, и обладает более высокой температурой плавления.

Материалы, из которых должны изготавливаться ЭИ, должны иметь высокую эрозионную стойкость. Таким образом, подбирая материал для ЭИ с более высокими теплофизическими свойствами (что соответствует и более высокой эрозионной стойкости), можно значительно уменьшить его износ в процессе работы. Наилучшие показатели в отношении эрозионной стойкости ЭИ и обеспечения стабильности протекания электроэрозионного процесса имеют: медь, латунь, вольфрам, алюминий и углеграфитовые материалы. Они пригодны для изготовления ЭИ при обработке всей группы материалов, обрабатываемых электроэрозионным методом. ЭИ из меди применяются реже из-за высокой их стоимости и дефицитности меди, а чаще применяют

ЭИ из углеграфита.

Применяются ЭИ различной конфигурации. Копировально-прошивочные операции выполняются профилированными ЭИ. Такие ЭИ имеют трехмерную поверхность, являющуюся зеркальным отображением обрабатываемой детали или ее элементов, т. е. форма и размеры ЭИ определяются формой и размерами обрабатываемой детали или ее элементов.

Контурная вырезка осуществляется непрофилированными ЭИ. В качестве непрофилированного ЭИ используется калиброванная проволока, изготавливаемая из латуни, вольфрама и других сплавов. В этом случае форма и размеры ЭИ могут быть не связаны с формой и размерами обрабатываемой детали или ее элементов и отображать их лишь частично.

.Электроэрозионным способом могут выполняться различные технологические операции профилированным и непрофилированным ЭИ.

Схема формообразования способом копирования формы ЭИ получила наибольшее распространение и охватывает большинство операций, выполняемых электроэрозионным методом

По схеме формообразования прямым копированием ЭИ получает движение подачи в направлении к обрабатываемой детали.. Движение подачи необходимо для компенсации увеличения межэлектродного зазора между деталью и ЭИ. В процессе электрической эрозии происходит удаление металла с поверхности обрабатываемой детали и расстояние между деталью и ЭИ монотонно увеличивается. Увеличение МЭП приводит к тому, что приложенного к электродам напряжения оказывается недостаточно, чтобы наступил пробой МЭП с образованием импульсного разряда. Для улучшения стабильности электроэрозионного процесса ЭИ может сообщаться колебательное движение в направлении. Колебательное движение ЭИ улучшает вынос продуктов эрозии из зоны обработки. При таком (орбитальном) перемещении ЭИ 2 все его точки движутся по одинаковым орбитам, что обеспечивает эквидистанционное копирование детали / рабочей части ЭИ. Эквидистанта данной кривой есть геометрическое место концов равных отрезков, отложенных в определенном направлении на нормаль к этой кривой (например, эквидистанта окружности есть окружность). Орбитальное движение приводит к увеличению средней величины бокового зазора между ЭИ и деталью, благодаря чему улучшаются условия удаления продуктов эрозии из МЭП. При обработке глубоких полостей по мере углубления ЭИ радиус траектории движения его увеличивают с одновременным переходом на чистовые режимы обработки. Такое сочетание орбитального движения ЭИ и режима обработки позволяет повысить точность обработки и снизить шероховатость обрабатываемой

поверхности

К недостаткам ЭЭО с орбитальным движением можно отнести уменьшение площади одновременно обрабатываемой поверхности. Это вызвано постоянно изменяющимися во времени межэлектродным зазором, т. е. уменьшением или увеличением его во времени на одном и том же участке межэлектродного пространства.

Уменьшение площади одновременно обрабатываемой поверхности приводит к снижению производительности процесса ЭЭО. Она определяется объемом материала, снятого с обрабатываемого изделия в единицу времени. Производительность ЭЭО зависит от мощности, подаваемой в МЭП, сочетания пары материалов электродов и обрабатываемости материалов (интенсивности их эрозионного разрушения).

Материал ЭИ, используемый при ЭЭО, также влияет на производительность процесса... Наибольшая предельная мощность достигается при ЭЭО медными ЭИ, меньшая — алюминиевыми и еще меньшая — графитовыми материалами. Однако в реальных условиях ЭЭО на производительность обработки будут оказывать влияние и другие факторы. К этим факторам относятся свойство рабочей среды, влияние глубины внедрения ЭИ в обрабатываемую деталь, форма обрабатываемой поверхности, площади обрабатываемой поверхности и др.

В процессе работы рабочая среда изменяет свои свойства, т. е. загрязняется продуктами разложения и эрозии, а вязкость ее увеличивается. Производительность ЭЭО в значительной степени зависит от вязкости рабочей среды (особенно при работе с импульсами большой энергии). Увеличение вязкости ухудшает условия выноса продуктов эрозии из зоны обработки. При сложных формах поверхности обрабатываемой детали условия удаления продуктов эрозии ухудшаются. Явление ухудшения эрозии проявляется при увеличении глубины внедрения ЭИ в изделие. Для поддержания необходимой производительности применяют различные приемы, обеспечивающие ускорение удаления из зоны обработки продуктов эрозии: прокачку и отсос рабочей среды через МЭП, вибрацию ЭИ и, если это возможно, — вращение ЭИ или детали.

Производительность ЭЭО можно повысить, используя многоконтурные схемы обработки, когда одно изделие обрабатывается несколькими ЭИ, изолированными друг от друга (по секциям). Каждая секция подключена к генератору импульсов автономно. При такой схеме ЭЭО может происходить несколько электрических разрядов одновременно. Использование многоконтурной схемы обработки повышает производительность, но не пропорционально количеству контуров, так как эти контуры работают от

одного регулятора подачи и при нарушении электроэрозивного процесса в одном из контуров прекращается процесс во всех контурах.

В ЭЭО используются короткие во времени импульсы тока большой величины (от единиц до тысяч ампер) и достаточно высокого напряжения (до 200—300 В).

Для формирования импульсов напряжения, следующих друг за другом через определенные промежутки времени, применяют специальные устройства, называемые генераторами импульсов. Характеристики генераторов в основном определяют технологические показатели ЭЭО. В последнее время широкое применение получили статические (тиристорные и транзисторные) генераторы импульсов, имеющие различные характеристики и способные формировать импульсы напряжения различной формы и параметров.

Основными параметрами периодических импульсов напряжения различной формы являются длительность, амплитуда, частота следования и скважность. Импульсы характеризуются также крутизной переднего и заднего фронтов, максимальным и средним значениями тока и напряжения, максимальной и средней мощностью импульса, энергией импульса.

Практически любая электрическая цепь помимо активного омического сопротивления обладает емкостью и индуктивностью, которые являются инерционными элементами и вносят определенную задержку в нарастании. При такой схеме ЭЭО может происходить несколько электрических разрядов одновременно. Использование многоконтурной схемы обработки повышает производительность, но не пропорционально количеству контуров, так как эти контуры работают от одного регулятора подачи и при нарушении электроэрозивного процесса в одном из контуров прекращается процесс во всех контурах..

Длительность импульса $t_{\text{д}}$, определяется временем его действия. Длительность импульса при постоянной частоте связана со скважностью обратной пропорциональной зависимостью...

Промежуток времени между двумя импульсами называется паузой $t_{\text{п}}$. Промежуток времени, через который наблюдается повторение начала или окончания импульсов называется периодом T ,

Различают скважность импульсов по э.д.с. и по току. В первом случае скважность импульсов характеризуется при холостом ходе генератора, во втором — при нагрузке.

Энергия импульса — это работа, совершаемая единичным импульсом в МЭП. При технологических расчетах пользоваться этой величиной неудобно и ее заменяют эквивалентной ей величиной средней мощностью $P_{\text{ср}}$ или

средним током /ср, т е.

Для достижения высоких технологических показателей ЭЭО разрядные импульсы, генерируемые источниками питания, могут отличаться от прямоугольных униполярных импульсов.. Отечественные широкодиапазоинные генераторы импульсов (ШГИ) наряду с прямоугольными импульсами могут формировать и гребенчатые. Это достигается сложением на нагрузке МЭП низкочастотных, так называемых «защитных» импульсов, с высокочастотными силовыми импульсами.

Прямоугольные импульсы генерируются как отдельными импульсами, так и пакетами импульсов. Импульс состоит практически из двух частей: из «поджигающего» импульса большой амплитуды и малой длительности и рабочего меньшей амплитуды, но значительно большей длительности. Поджигающий импульс служит для пробоя межэлектродного промежутка при больших его значениях, а рабочий импульс для съема металла.

Гребенчатые импульсы состоят из следующих друг за другом коротких рабочих импульсов со сравнительно большим напряжением и так называемых защитных импульсов, которые действуют в интервалах между рабочими. Такое сочетание импульсов позволяет снизить износ ЭИ. Рассмотрим процесс развития искрового разряда в МЭП и изменения напряжения за время действия импульса напряжения.

Длительность нарастания зависит от крутизны переднего фронта импульса и величины и характера межэлектродного зазора. На этом участке проходит процесс ионизации рабочей среды. На втором участке /—2 напряжение резко падает, что соответствует пробоем межэлектродного зазора и образованию искрового разряда. Участок 2—3 соответствует времени разряда. На участке 3—4 происходит спад напряжения. Этот участок является задним фронтом импульса.

В импульсах различают передний фронт (нарастание) и задний фронт (спадание). Крутизна фронта характеризуется скоростью изменения тока или напряжения во времени.

Для достижения высоких технологических показателей ЭЭО разрядные импульсы, генерируемые источниками питания, могут отличаться от прямоугольных униполярных импульсов, показанных на рис. 4. Отечественные широкодиапазоинные генераторы импульсов (ШГИ) наряду с прямоугольными импульсами могут формировать и гребенчатые

Так, длительность и амплитуда импульса совместно определяют его энергию. Увеличение длительности импульса и амплитуды повышает его энергию, что приводит к росту скорости съема металла с детали и ухудшению качества поверхности. Изменение скважности импульсов при

неизменной частоте их следования приводит к изменению длительности импульса и паузы между ними. Поскольку скважность импульса является обратной величиной заполнению импульсом периода, то уменьшение скважности вызывает повышение скорости съема металла. Скважность импульсов оказывает влияние на износ ЭИ. При работе с обратной полярностью электродов снижение скважности уменьшает износ ЭИ, а при прямой полярности электродов снижение скважности приводит к повышению износа ЭИ. Изменением скважности импульсов можно менять шероховатость обрабатываемой поверхности за счет изменения энергии импульса. Увеличение скважности улучшает качество поверхности, но приводит к износу ЭИ. Если задана шероховатость поверхности и износ ЭИ, то регулировать среднее значение рабочего тока целесообразно изменением скважности.

Частота следования импульсов, как и длительность импульса, влияет на те же технологические параметры. С ростом частоты снижается производительность процесса, улучшается качество поверхности и повышается точность ЭЭО.

На стабильность электроэрозионного процесса оказывают существенное влияние крутизна и стабильность импульсов напряжения, так как эти параметры импульса напряжения определяют постоянство и длительность импульсов тока, т. е. его энергию при постоянной амплитуде.

Энергоемкость электрической эрозии определяется теми процессами, которые происходят на границах между каналом разряда, с одной стороны, и анодом или катодом - с другой.

Процесс разряда сопровождается поступлением потока энергии на ту часть катода, которая граничит с каналом. Этот поток складывается из следующих составляющих: кинетической энергии ионов, потенциальной энергии ионов, тепловой энергии нейтральных частиц плазмы, тепловой и кинетической энергии паров расплавленного металла. Пополнение энергии осуществляется за счет энергии импульса.

Для практических целей о энергоемкости процесса можно судить по средней мощности, которая потребляется от генератора импульсов. Измерение мощности может быть произведено прибором ваттметром. Средние значения тока и напряжения на эрозионном промежутке за один период могут быть измерены приборами магнитоэлектрической

На обрабатываемость металлов и сплавов резанием (снятием стружки) существенное влияние оказывают его физико-механические свойства, такие как вязкость, твердость, хрупкость. От их значений, при прочих равных условиях, зависит скорость съема материала в единицу времени.

На обрабатываемость материалов электроэрозионным способом также оказывают влияние теплофизические свойства материалов. Чем выше температура плавления материала, тем меньше материала будет удалено единичным разрядом. Электроэрозионная обрабатываемость различных материалов, таким образом, будет характеризоваться удельным расходом энергии на единицу массы снятого материала....

Так, длительность и амплитуда импульса совместно определяют его энергию. Увеличение длительности импульса и амплитуды повышает его энергию, что приводит к росту скорости съема металла с детали и ухудшению качества поверхности. Изменение скважности импульсов при неизменной частоте их следования приводит к изменению длительности импульса и паузы между ними. Поскольку скважность импульса является обратной величиной заполнению импульсом периода, то уменьшение скважности вызывает повышение скорости съема металла. Скважность импульсов оказывает влияние на износ ЭИ. При работе с обратной полярностью электродов снижение скважности уменьшает износ ЭИ, а при прямой полярности электродов снижение скважности приводит к повышению износа ЭИ. Изменением скважности импульсов можно менять шероховатость обрабатываемой поверхности за счет изменения энергии импульса. Увеличение скважности улучшает качество поверхности, но приводит к износу ЭИ. Если задана шероховатость поверхности и износ ЭИ, то регулировать среднее значение рабочего тока целесообразно изменением скважности.

Частота следования импульсов, как и длительность импульса, влияет на те же технологические параметры. С ростом частоты снижается производительность процесса, улучшается качество поверхности и повышается точность ЭЭО.

Интенсивность эрозионного съема материала зависит от длительности теплового воздействия. При одной и той же энергии разрядного импульса эрозионный съем увеличивается с увеличением длительности разрядного импульса до некоторых пределов, а затем начинает падать. Объясняется это тем, что увеличение длительности воздействия приводит к расширению зоны плавления большого объема материала. Однако при этом снижается плотность энергии разрядного импульса, а следовательно, снижается и температура в точках приложения разряда на поверхности электродов. Поэтому для каждой энергии импульса имеется оптимальное значение его длительности, при которой интенсивность эрозии будет максимальной.

Экспериментально установлено, что если обрабатываемость стали 45 и других углеродистых сталей принять за единицу, то обрабатываемость

других металлов и сплавов может быть выражена следующими соответствующими соотношениями:

.. Вязкие сплавы обрабатываются лучше, чем сталь 45, а твердые сплавы, которые обычным резанием не обрабатываются, электроэрозионным способом могут быть обработаны.

Твердый сплав обрабатывают малыми по времени импульсами, обеспечивающими высокую температуру в момент разряда (прямая полярность электродов). Оптимальная плотность тока при обработке твердого сплава в 1,5—2 раза ниже, чем при обработке сталей. Твердые сплавы обычно обрабатываются на режимах до 50 А (среднее значение тока). Припуск под последующую обработку нужно стремиться снизить до минимальных значений. Припуск на доводку должен составлять 0,02—0,03 мм, однако удаление и этого припуска является весьма трудоемкой операцией. В случае обработки фасонных полостей (для получения минимального припуска при оптимальной производительности) последовательно осуществляют: предварительную (черновую), получистовую и чистовую обработку с обновлением ЭИ. Если обрабатывается сквозное или глухое отверстие постоянного по высоте профиля, то обработку производят на режиме, обеспечивающем необходимую точность и шероховатость. Обновление ЭИ осуществляют путем подрезания торца. Эффективность работы в значительной степени зависит от подачи в зону обработки рабочей среды, необходимой для удаления продуктов эрозии. Чаще всего используется отсос или прокачка рабочей среды через ЭИ.

Жаропрочные сплавы из-за своей вязкости обычным резанием обрабатываются значительно хуже, чем конструкционные или инструментальные стали, а электроэрозионным методом — лучше. Объясняется это тем, что жаропрочные сплавы имеют низкую теплопроводность и теплоемкость, а именно эти свойства материалов и оказывают существенное влияние на обрабатываемость их электроэрозионным способом.

Обрабатываемость вязких алюминиевых и магниевых сплавов также выше, чем у сталей. Обработку этих сплавов можно осуществлять на всех возможных режимах ЭЭО.

Интенсивность эрозионного съема материала зависит от длительности теплового воздействия. При одной и той же энергии разрядного импульса эрозионный съем увеличивается с увеличением длительности разрядного импульса до некоторых пределов, а затем начинает падать. Объясняется это тем, что увеличение длительности воздействия приводит к расширению зоны

плавления большого объема материала. Однако при этом снижается плотность энергии разрядного импульса, а следовательно, снижается и температура в точках приложения разряда на поверхности электродов. Поэтому для каждой энергии импульса имеется оптимальное значение его длительности, при которой интенсивность эрозии будет максимальной.

. Электроэрозионным способом целесообразно обрабатывать фасонные формующие полости, которые обычно получают обработкой на координатно-фрезерных станках или на станках с программным управлением. Полости простой геометрической формы (например, тела вращения) обрабатывать электроэрозионным методом неэффективно.

Если изделие после изготовления подвергается термообработке, то ЭЭО производят после термообработки и шлифования базовых поверхностей заготовки. Слишком большой припуск под ЭЭО нежелателен, так как перед термообработкой основную его массу можно снять на универсальном фрезерном станке...

Особенно удобна и эффективна ЭЭО при восстановлении изношенных формообразующих полостей штампов и пресс-форм; восстановление полости производят без отжига изделия.

Чтобы увеличить производительность ЭЭО, особенно при обработке штампов и пресс-форм, имеющих большую площадь обрабатываемой поверхности, используют многоконтурную обработку.

В машиностроении часто возникает необходимость изготавливать изделия, имеющие различные закрытые полости, соединительные каналы и т.д. Обрабатывать закрытые полости и каналы можно в корпусных деталях, изготавливаемых из черных и цветных металлов. Однако чаще всего приходится обрабатывать такие полости или каналы в алюминиевых и жаропрочных сплавах. Наиболее целесообразно при этом использовать электроды из углеродистого графита.

В машиностроении часто возникает необходимость выполнения операций отрезки или вырезки заготовок с заданными геометрическими размерами. Производительность электроэрозионного разрезания труднообрабатываемых материалов в два — десять раз выше, чем при механическом резании. В некоторых случаях, например при разрезании заготовок из металлокерамики, электроэрозионный метод становится одним из немногих, который позволяет вообще выполнять эту операцию.

Электроэрозионное разрезание заготовок выполняется дисковым, пластинчатым или проволочным ЭИ, а технологический ток может быть подведен при этом от источников постоянного, переменного или импульсного напряжения. Разрезание может выполняться в воздушной среде

и в воде с погружением разрезаемой заготовки в ванну, а также при поливе водой зоны разрезания. Операция может выполняться на копировально-прошивочных, проволочных вырезных станках и специальных станках для отрезания заготовок.

Существуют различные способы электроэрозионного упрочнения поверхностного слоя деталей — наплавка, термообработка, антикоррозийное покрытие и электроэрозионное легирование, которое сопровождается различными физико-химическими превращениями поверхностного упрочняемого слоя детали и позволяет в связи с этим повысить износостойкость, жаропрочность, коррозионную стойкость детали и снизить ее коэффициент трения. С помощью легирования можно произвести ремонт изношенной детали, придав ее поверхностному слою новые свойства.

Процесс электроэрозионного легирования заключается в переносе материала ЭИ, отвечающего определенным требованиям, на обрабатываемую поверхность детали импульсным электрическим разрядом, обеспечивая прочное сцепление вводимого легирующего материала с поверхности детали.

Перед тем, как приступить к ЭЭО, необходимо спроектировать технологический процесс. Под проектированием подразумеваются следующие этапы: выбор режима черновой обработки; обеспечение связи оптимальной производительности процесса и шероховатости обработки с режимом обработки, расчет числа проходов, определение припуска, который нужно снять ЭЭО, расчет машинного времени на ЭЭО, выбор необходимой оснастки и контрольно-измерительных приборов.

Выводы:

1. Важным параметром ЭЭО является энергия импульса; которая определяет производительность, точность и качество поверхности. С ростом энергии импульса производительность процесса ЭЭО увеличивается, но снижается качество поверхности.

2. Установлено, что чем больше длительность импульса, тем большая мощность может быть реализована при ЭЭО и большая скорость съема металла получена, но при этом качество поверхности очень низкое (на поверхности видны лунки и следы оплавления).

3. С уменьшением длительности импульса и повышением частоты их следования реализуемая мощность уменьшается, а также уменьшается и скорость съема металла, но качество обработанной поверхности значительно повышается.

6. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Машины, как и другие изделия, изготавливаются только по проекту, который, в любом случае, является совокупностью графических и текстовых документов. Правила и порядок разработки, оформления и обращения этих документов устанавливается комплексом стандартов – Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), разработанной в 70-е годы XX в. Проектирование машин выполняют в несколько стадий, установленных ГОСТ 2.103-68. Для единичного производства это:

1. Разработка технического предложения по ГОСТ 2.118-73.
2. Разработка эскизного проекта по ГОСТ 2.119-73.
3. Разработка технического проекта по ГОСТ 2.120-73.
4. Разработка документации для изготовления изделия.
5. Корректировка документации по результатам изготовления и испытания изделия.

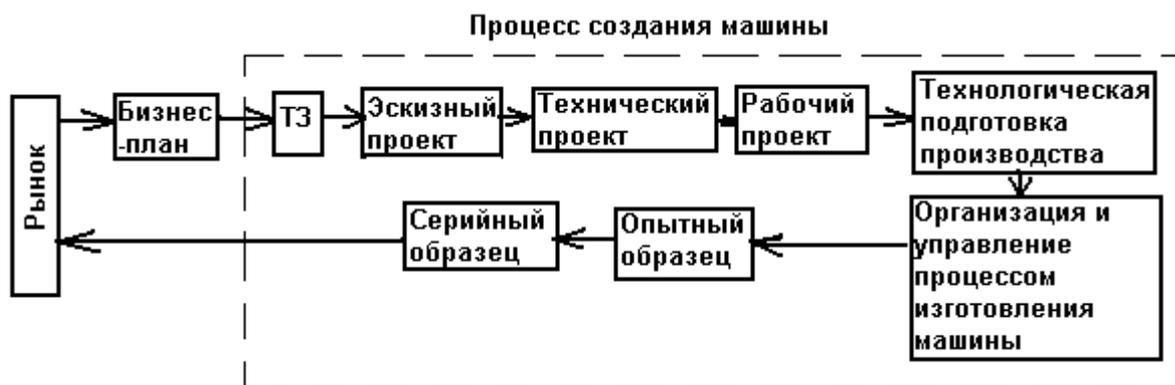


Рис. 6.1. Этапы производства изделий машиностроения

Стадии проектирования при серийном производстве такие же, но только корректировку документации приходится повторять несколько раз: сначала для опытного экземпляра, затем для опытной партии, затем по результатам изготовления и испытаний первой промышленной партии. В любом случае, приступая к каждому этапу конструирования, как и вообще к любой работе, необходимо чётко обозначить три позиции:

Исходные данные – любые объекты и информация, относящиеся к делу ("что мы имеем?"). Цель – ожидаемые результаты, величины, документы, объекты ("что мы хотим получить?"). Средства достижения цели – методики проектирования, расчётные формулы, инструментальные средства, источники энергии и информации, конструкторские навыки, опыт ("что и как делать?"). Деятельность конструктора-проектировщика обретает смысл только при наличии заказчика – лица или организации, нуждающихся в изделии и

финансирующих разработку.

Задачи конструирования

Процесс внесения изменения в искусственную среду представляется как ряд событий, представленных рисунком 6.2.

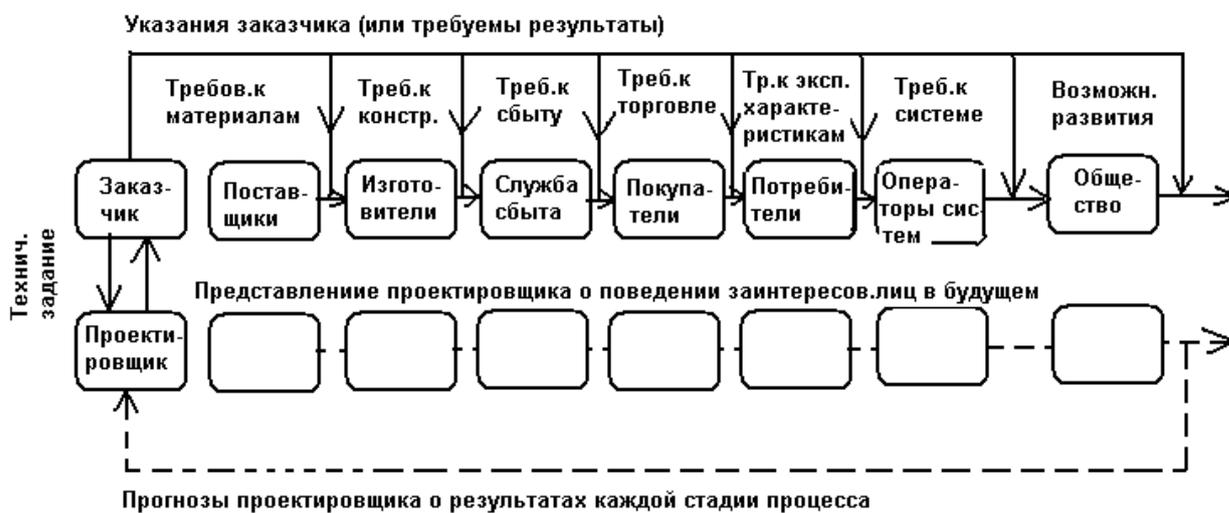


Рис. 6.2. Схема задач проектирования

Теоретически заказчик должен составить и выдать разработчику Техническое Задание – документ, в котором грамотно и чётко обозначены все технические, эксплуатационные и экономические параметры будущего изделия. Но, к счастью, этого не происходит, поскольку заказчик поглощён своими ведомственными задачами, а, главное, не имеет достаточных навыков проектирования. Таким образом, инженер не остаётся без работы. Работа начинается с того, что заказчик и исполнитель совместно составляют (и подписывают) Техническое Задание. При этом исполнитель должен получить максимум информации о потребностях, пожеланиях, технических и финансовых возможностях заказчика, обязательных, предпочтительных и желательных свойствах будущего изделия, особенностях его эксплуатации, условиях ремонта, возможном рынке сбыта. Тщательный анализ этой информации позволит проектировщику правильно выстроить логическую цепочку "Задание – Цель – Средства" и максимально эффективно выполнить проект.

Разработка Технического Предложения начинается с изучения Технического Задания. Выясняются назначение, принцип устройства и способы соединения основных сборочных единиц и деталей. Всё это сопровождается анализом научно-технической информации об аналогичных конструкциях. Выполняются кинематический расчёт, проектировочные расчёты на прочность, жёсткость, износостойкость и по критериям работоспособности. Из каталогов предварительно выбираются все стандартные изделия – подшипники, муфты и т.п. Выполняются первые

эскизы, которые постепенно уточняются. Необходимо стремиться к максимальной компактности расположения и удобства монтажа-демонтажа деталей. На стадии Эскизного Проекта выполняются уточнённые и проверочные расчёты деталей, чертежи изделия в основных проекциях, прорабатывается конструкция деталей с целью их максимальной технологичности, выбираются сопряжения деталей, прорабатывается возможность сборки-разборки и регулировки узлов, выбирается система смазки и уплотнения. Эскизный проект должен быть рассмотрен и утверждён, после чего он становится основой для Технического Проекта. При необходимости изготавливаются и испытываются макеты изделия.

Технический Проект должен обязательно содержать чертёж общего вида, ведомость технического проекта и пояснительную записку. Чертёж общего вида по ГОСТ 2.119-73 должен дать сведения о конструкции, взаимодействии основных частей, эксплуатационно-технических характеристиках и принципах работы изделия. Ведомость Технического Проекта и Пояснительная Записка, как и все текстовые документы должны содержать исчерпывающую информацию о конструкции, изготовлении, эксплуатации и ремонте изделия. Они оформляются в строгом соответствии с нормами и правилами ЕСКД (ГОСТ 2.104-68; 2.105-79; 2.106-68). Таким образом, проект приобретает окончательный вид – чертежей и пояснительной записки с расчётами, называемыми **рабочей документацией**.

Требования к машинам и критерии их качества. Требования к машинам многообразны и часто противоречивы, однако их можно условно разделить на основные взаимосвязанные группы:

1. Технологические требования.
2. Экономические требования.
3. Эксплуатационные требования.

Качество машины, т.е. её максимальное соответствие всем требованиям [35] невозможно без неустанного внимания инженера на всех стадиях "жизни" машины. Качество закладывается на стадии проектирования, обеспечивается на стадии производства и поддерживается в процессе эксплуатации. Степень соответствия требованиям характеризуют критерии качества (*греч. "крит эрион" – узкое место*) – некие конкретные параметры (*греч. "пара мэтрос" – измеряемый*), т.е. измеряемые или вычисляемые величины. Однако известно, что полное удовлетворение всех требований – абсолютно невыполнимая задача, поэтому всегда приходится идти на компромисс, обозначая главные требования и обеспечивая соответствующие им критерии качества. Отметим поэтому лишь основные требования к деталям и машинам.

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ – изготовление изделия при минимальных затратах труда, времени и средств при полном соответствии своему назначению.

ЭКОНОМИЧНОСТЬ – минимальная стоимость производства и эксплуатации.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции.

НАДЕЖНОСТЬ – свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению заданных функций (ГОСТ 27.002-83).

Основными критериями качества машин считают:

МОЩНОСТЬ – скорость преобразования энергии;

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ – объём работы (продукции, информации), выполняемой в единицу времени;

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ – доля дошедшей до потребителя энергии (мощности);

ГАБАРИТЫ – предельные размеры;

ЭНЕРГОЁМКОСТЬ - расход топлива или электричества отнесённый к объёму работы (пройденному расстоянию, произведённой продукции);

МАТЕРИАЛОЁМКОСТЬ – количество конструкционного материала машины, обычно отнесённого к единице мощности;

ТОЧНОСТЬ – способность максимально соответствовать заданному положению (скорости и т.п.);

ПЛАВНОСТЬ ХОДА – минимальные ускорения при работе машины.

Условия нормальной работы деталей и машин. Успешная работа деталей и машин заключается в обеспечении работоспособности и надёжности.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ деталей и машин определяется как свойство выполнять свои функции с заданными показателями и характеризуется следующими критериями:

ПРОЧНОСТЬ – способность детали сопротивляться разрушению или необратимому изменению формы (деформации);

ЖЁСТКОСТЬ – способность детали сопротивляться любой деформации;

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ – способность сохранять первоначальную форму своей поверхности, сопротивляясь износу;

ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ – способность сохранять свои свойства при действии высоких температур;

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ – способность работать в нужном диапазоне режимов без недопустимых колебаний.

Надёжность определяется как свойство детали и машины выполнять свои функции, сохраняя заданные показатели в течение заданного времени и, по существу, выражает собой перспективы сохранения работоспособности.

В процессе работы детали и машины подвергаются не только расчётным нагрузкам, которые конструктор ожидает и учитывает, но и попадают во внештатные ситуации, которые очень трудно предусмотреть, как, например, удары, вибрация, загрязнение, экстремальные природные условия и т.п. При этом возникает отказ – утрата работоспособности вследствие разрушения деталей или нарушения их правильного взаимодействия. Отказы бывают полные и частичные; внезапные (поломки) и постепенные (износ, коррозия); опасные для жизни; тяжёлые и лёгкие; устранимые и неустраиваемые; приработочные (возникают в начале эксплуатации) и связанные с наличием дефектных деталей; отказы по причине износа, усталости и старения материалов. Надёжной можно считать машину, имеющую следующие свойства.

БЕЗОТКАЗНОСТЬ – способность сохранять свои эксплуатационные показатели в течение заданной наработки без вынужденных перерывов.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ – способность сохранять заданные показатели до предельного состояния с необходимыми перерывами для ремонтов и технического обслуживания.

РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ – приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей посредством техобслуживания и ремонта.

СОХРАНЯЕМОСТЬ – способность сохранять требуемые эксплуатационные показатели после установленного срока хранения и транспортирования. Надёжность трудно рассчитать количественно, она обычно оценивается как вероятность безотказной работы на основании статистики эксплуатации группы идентичных машин.

При всей значимости всех описанных критериев, нетрудно заметить, что **ПРОЧНОСТЬ ЯВЛЯЕТСЯ ВАЖНЕЙШИМ КРИТЕРИЕМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ**. Невыполнение условия прочности автоматически делает бессмысленными все другие требования и критерии качества машин. Действительно, немногого стоит технологичная, жёсткая, износостойкая, теплостойкая, виброустойчивая, дешёвая в эксплуатации, ремонтпригодная конструкция самого передового дизайна, если она сломалась при первой же нагрузке!

Общие принципы прочностных расчётов. Все этапы проектирования, каждый шаг конструктора сопровождается расчётами. Это естественно, т.к. грамотно выполненный расчёт намного проще и в сотни раз дешевле

экспериментальных испытаний. Чаще всего конструктор имеет дело с расчётами на прочность. Различают проектировочные и проверочные расчёты. Проектировочный расчёт выполняется, когда по ожидаемым нагрузкам, с учётом свойств материала определяются геометрические параметры деталей.

Проверочный расчёт выполняют, когда известна вся "геометрия" детали и максимальные нагрузки, а с учётом свойств материала определяются максимальные напряжения, которые должны быть меньше допускаемых. Несмотря на такие "провокационные" названия, следует помнить, что оба этих вида расчётов всегда сопутствуют друг другу и выполняются на стадии проектирования деталей и машин. Математическая формулировка условия прочности любой детали очень проста: $\sigma \leq [\sigma]$, $\tau \leq [\tau]$. То есть, при любых обстоятельствах конструктор обязан учитывать и обеспечивать такие условия работы, чтобы напряжения в материале деталей не превышали допускаемых. В качестве допускаемых назначаются предельные напряжения, при которых наступает разрушение материала. Допускаемые напряжения следует принимать меньше предельных, "с запасом": $[\sigma] = \sigma_{\text{пред.}} / n$, где n - коэффициент запаса (обычно $1,2 < n < 2,5$). В разных обстоятельствах коэффициент запаса может быть либо задан заказчиком, либо выбран из справочных нормативов, либо вычислен с учетом точности определения нагрузок, однородности материала и специфических требований к надёжности машин. Выполнение всех видов прочностных расчётов для каждой детали займет очень много времени. Поэтому инженер должен сначала изучить опыт проектных работ.

Понятие о машине. Определение понятия машина разрабатывалось в течение многих лет. Начиная с далеких времен, машина характеризовалась как устройство, предназначенное для действия в нем сил природы согласно потребностям человека. Но до сего времени не найдено определение машины, в достаточной мере отражающей ее физическую сущность. Это обстоятельство явилось причиной многих споров по поводу того, что следует называть машиной. Например, до сих пор нет ясности в том, считать часы машиной или механизмом? Весьма ожесточенные нападки в свое время пришлось выдержать Д.И. Менделееву, причислившему и, видимо, не без основания, к машинам ... доменную печь.

В предыдущей формулировке: «Машина – это механизм или сочетание механизмов, осуществляющих определенные целесообразные движения для преобразования энергии или производства работы».

Согласно этому определению ни часы, ни, тем более, доменная печь не могут претендовать на название машины. А как быть с электронно –

вычислительным устройством, которое скорее стихийно, прямо со дня своего создания, было названо машиной?

Для того, чтобы узаконить причисление ЭВМ к машинам были внесены в определение изменения:

«Машина – устройство, выполняющее механическое движение для преобразования энергии, материалов и информации».

«Механизм – система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел. Механизм составляет основу большинства машин, применяется во многих приборах, аппаратах и технических устройствах».

Сущность машины заключается в том, что она осуществляет качественное преобразование исходного продукта в готовый или промежуточный, полезный для человека продукт. Причем, процесс преобразования может вестись механическим, физическим или химическим путем как каждым в отдельности, так и в сочетаниях друг с другом.

Чаще всего машина работает по схеме, представленной рисунком 6.3.

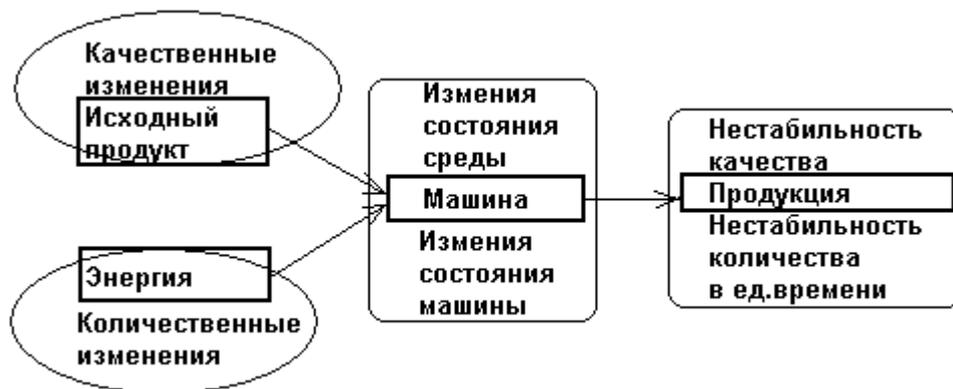


Рисунок 6.3. Схема работы машины.

Но есть машины, предназначенные для преобразования одного вида энергии в другой. Это машины: двигатели и генераторы.

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ. Основная цель первой части алгоритма проектирования технических систем - переход от расплывчатой проектной ситуации к четко построенной и предельно простой схеме (модели) задачи.

1.1. Записать условия мини-задачи (без специальных терминов) по следующей форме:

Техническая система для (указать назначение) включает (перечислить основные части системы). Техническое противоречие 1: (указать). Техническое противоречие 2: (указать). Необходимо при минимальных изменениях в системе (указать результат, который должен быть получен).

Пример. Техническая система для механической обработки деталей машин включает оборудование, оснащенное резцедержателем,

технологическим оснащением, устройством смены режущего инструмента, система охлаждения.

ТП-1 (техническое противоречие): если режущих инструментов в резцедержателе, если это револьверная головка, много и режущие инструменты с учетом высокой производительности, надежно формируют геометрию заготовки, но происходит частая смена режущих инструментов (здесь понятие инструмент соответствует стандартам на обработку резанием, а не термину, используемому в системах проектирования машин).

ТП-2: если режущих инструментов мало, то заметного ухудшения в обработке нет, но требует дополнительной обработки.

Необходимо при минимальных изменениях обеспечить надежную обработку заготовки с минимальными затратами.

Примечания:

1. Мини-задачу получают из изобретательской ситуации, вводя ограничения:

Все остается без изменений или упрощается, но при этом появляется требуемое действие (свойство) или исчезает вредное действие (свойство).

Переход от ситуации к мини-задаче не означает, что взят курс на решение небольшой задачи. Наоборот, введение дополнительных требований (результат должен быть получен «без ничего») ориентирует на обострение конфликта и заранее отсекает пути к компромиссным решениям.

2. При записи 1.1 следует указать не только технические части системы, но и природные, взаимодействующие с техническими. В задаче о револьверной головке такими природными элементами системы являются окружающая среда и трение стружки о поверхности инструмента, если обработка ведется в естественной среде, а не в вакууме.

3. Техническими противоречиями называют взаимодействия в системе, состоящие, например, в том, что полезное действие вызывает одновременно и вредное. Или — введение (усиление) полезного действия либо устранение (ослабление) вредного действия вызывает ухудшение (в частности, недопустимое усложнение) одной из частей системы или всей системы в целом.

Технические противоречия составляют, записывая одно состояние элемента системы с объяснением того, что при этом хорошо, а что плохо. Затем записывают *противоположное состояние этого же элемента* и вновь — что хорошо, что плохо.

Иногда в условиях задачи дано только изделие, технической системы (инструмента) нет, поэтому нет явного ТП. В этих случаях ТП получают, условно рассматривая два состояния изделия, хотя одно из них заведомо

недопустимо. Например, дана задача: «Как наблюдать невооруженным глазом микрочастицы, взвешенные в образце оптически чистой жидкости, если эти частицы настолько малы, что свет обтекает их?»

ТП-1: Если частицы малы, жидкость остается оптически чистой, но частицы невозможно наблюдать невооруженным глазом.

ТП-2: Если частицы большие, они хорошо наблюдаемы, но жидкость перестает быть оптически чистой, а это недопустимо.

Условия задачи, казалось бы, заведомо исключают рассмотрение ТП-2: изделие менять нельзя! Действительно, в дальнейшем мы будем исходить (в данном случае) из ТП-1, но ТП-2 даст дополнительные требования изделиям: маленькие частицы, оставаясь маленькими, должны стать большими...

4. Термины, относящиеся к инструменту и внешней среде, необходимо заменять простыми словами для снятия психологической инерции. И это потому, что термины:

— навязывают старые представления о технологии работы инструмента: «ледокол колет лед» — хотя можно продвигаться сквозь льды, не раскалывая их;

— затушевывают особенности веществ, упоминаемых в задаче: «опалубка» — это не просто «стенка», а «железная стенка»;

— сужают представления о возможных состояниях вещества: термин «краска» тянет к традиционному представлению о жидкой или твердой краске, хотя она может быть и газообразной.

1.2. Выделить и записать конфликтующую пару: изделие и инструмент.

Правило 1. Если инструмент по условиям задачи может иметь два состояния, надо указать оба состояния.

Правило 2. Если в задаче есть пары однородных взаимодействующих элементов, достаточно взять одну пару.

Примечания:

5. Изделием называют элемент, который по условиям задачи надо обработать (изготовить, переместить, изменить, улучшить, защитить от вредного действия, обнаружить, измерить и т. д.). В задачах на обнаружение и измерение изделием может оказаться элемент, являющийся по своей основной функции инструментом, например, шлифовальный круг.

6. Инструментом называют элемент, с которым непосредственно взаимодействует изделие (фреза, а не станок, огонь, а не горелка). В частности, инструментом может быть часть окружающей среды. Инструментом являются стандартные детали, из которых собирают изделие. Например, набор частей игры «Конструктор» — это инструмент для изготовления различных моделей.

7. Один из элементов конфликтующей пары может быть *сдвоенным*. Например, даны два разных инструмента, которые должны одновременно действовать на изделие, причем один инструмент мешает другому. Или даны два изделия, которые должны воспринимать действие одного и того же инструмента: одно изделие мешает другому.

1.3. Составить графические схемы ТП-1 и ТП-2, используя рисунки, приведенные ниже.

Пример. ТП-1: много режущих инструментов.

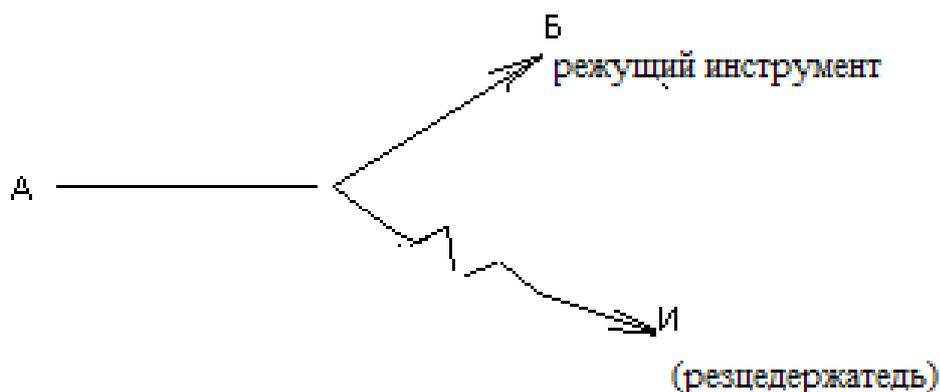


Рисунок 6.4. Схема ТП-1.

ТП-2: мал объем резцедержателя.

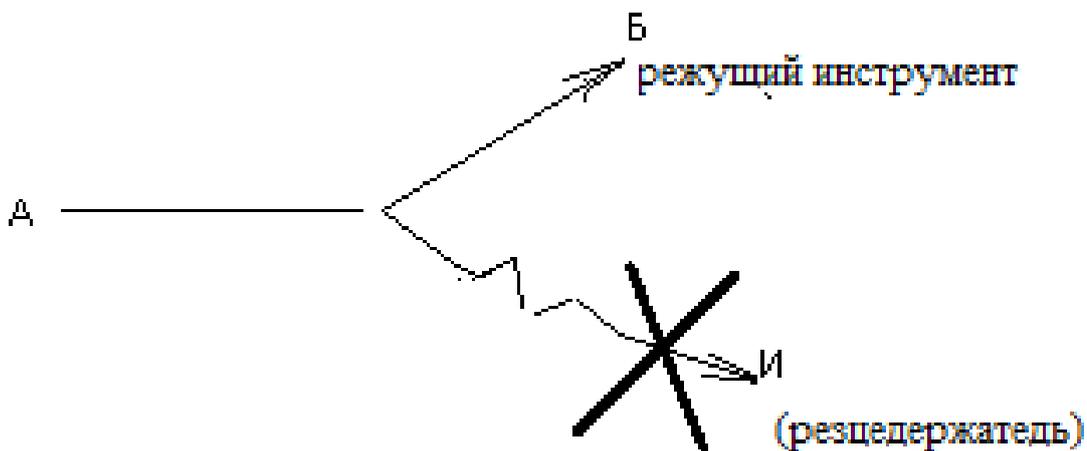


Рисунок 6.5. Схема ТП-2.

Примечания:

8. На рис. 6.6 приведены схемы типичных конфликтов. Допустимо использование нетабличных схем, если они лучше отражают сущность конфликта.

а) В некоторых задачах встречаются схемы конфликтов, например:

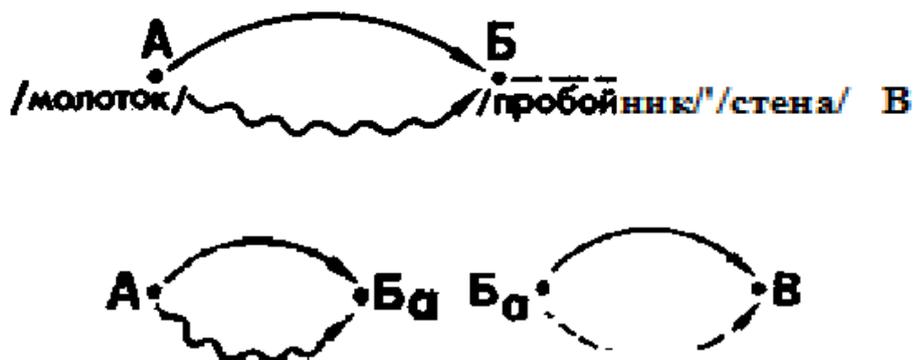


Рисунок 6.6. Типичные схемы конфликтов.

Такие схемы сводятся к однозвенным, если считать *Б* *изменяемым изделием* или перенести на *Б* основное свойство (или состояние) *А*.

9. Конфликт можно рассматривать не только в пространстве, но и *во времени*. Так, в задаче об опылении цветов сильный ветер вначале закрывает лепестки, из-за чего затем не переносит пыльцу, хотя это он может делать хорошо. Такой подход позволяет иногда четче выделять задачу, которую надо решать.

10. Шаги 1.2 и 1.3 уточняют общую формулировку задачи. Поэтому после шага 1.3 необходимо вернуться к 1.1 и проверить, нет ли несоответствий в линии 1.1—1.2—1.3. Если несоответствия есть, их надо устранить, откорректировать линию.

1.4. Выбрать из двух схем конфликта (*А* и *Б*) ту, которая обеспечивает наилучшее осуществление главного производственного процесса (основной функции технологической системы, указанной в условиях задачи). Указать, что является главным производственным процессом.

Примечания:

12. Выбирая одну из двух схем конфликта, мы выбираем и одно и двух противоположных состояний инструмента. Дальнейшее решение должно быть привязано к этому состоянию. Нельзя, например, подменять «малое количество проводников» каким-то «оптимальным количеством». *Алгоритм проектирования технических систем (АПТС) требует обострения, а не сглаживания конфликта.*

«Вцепившись» в одно состояние инструмента, мы в дальнейшем должны добиться, чтобы при этом состоянии появилось положительное свойство, присущее другому состоянию. Проводников мало, и увеличивать их количество мы не будем, но в результате решения молнии должны отводиться так, словно проводников очень много.

13. С определением главного производственного процесса (ГПП) иногда возникают трудности в задачах на измерение. Измерение почти всегда производят ради изменения, т. е. обработки детали, выпуска продукции. Поэтому ГПП в измерительных задачах — это ГПП всей измерительной

системы, а не измерительной ее части. Например, необходимо измерять давление внутри выпускаемых электроламп. ГПП — не измерение давления, а выпуск ламп. Исключением являются только некоторые задачи на измерение в научных целях.

1.5. Усилить конфликт, указав предельное состояние (действие) элементов.

Правило 3. Большинство задач содержат конфликты типа «много элементов» и «мало элементов» («сильный элемент»—«слабый элемент» и т. д.) Конфликты типа «мало элементов» при усилении надо приводить к одному виду — «ноль элементов» («отсутствующий элемент»).

1.6. Записать формулировку модели задачи, указав 1) конфликтную пару; 2) усиленную формулировку конфликта; 3) что должен сделать вводимый для решения задачи икс-элемент (что он должен сохранить и что должен устранить, улучшить, обеспечить и т. д.).

Примечания:

14. Модель задачи условна, в ней искусственно выделена часть элементов технической системы. Наличие остальных элементов только подразумевается. Так, в модели задачи о защите антенны из четырех элементов, необходимых для формулировки задачи (антенна, радиоволны, проводник и молния), остались только два, остальные упоминаются в скобках — их можно было бы вообще не упоминать.

15. После шага 1.6 следует обязательно вернуться к 1.1 и проверить логику построения модели задачи. При этом часто оказывается возможным уточнить выбранную схему конфликта, указав в ней х-элемент, например, так:



Рисунок 6.7. Уточненные схемы конфликтов.

Выводы:

1. Икс-элемент не обязательно должен оказаться какой-то новой вещественной частью системы. Икс-элемент — это некое изменение в системе, некий икс вообще. Он может быть равен, например, изменению температуры или агрегатного состояния какой-то части системы или внешней среды.

2. Проверить возможность применения системы стандартов к решению модели задачи. Если задача не решена, перейти ко второй части АРИЗ. Если задача решена, можно перейти к седьмой части АРИЗ, хотя и в этом случае рекомендуется продолжить анализ со второй части.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ.

Уплотнение формовочной смеси рассматривается как процесс уменьшения объема пор между частицами и конгломератами частиц кварцевого песка, покрытых слоем связующего. Исследование этого вопроса при импульсных методах уплотнения (AIR-ИМПАКТ и GAS-ИМПАКТ) затруднено, прежде всего, быстротечностью процесса и изменением деформационных характеристик формовочной смеси в процессе уплотнения. В отчете представлен подход к моделированию процесса импульсного уплотнения песчаных форм на базе экспериментальных и теоретических исследований.

Математическое описание процесса импульсного уплотнения

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0 \quad \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_0 – начальная плотность слоя формовочной смеси, v – скорость частиц слоя формовочной смеси, σ - нормальные осредненные напряжения, являющиеся суммой нормальных средних напряжений, действующих на верхних и нижних границах слоя формовочной смеси, ε - деформация слоя формовочной смеси, t – время.

Напряжения упругости

$$\sigma_1 = E_D * \varepsilon_1, \text{ при нагрузке} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = E_R * \varepsilon_1 \quad \text{при разгрузке}, \quad (2)$$

где E_D, E_R - динамические модули упругости при нагрузке и разгрузке,

ε_1 - упругая (вязкая) деформация.

Напряжение вязкого сопротивления

$$\sigma_2 = \mu^{**} \partial \varepsilon / \partial t,$$

(3)

где μ - параметр вязкости.

Полное напряжение в рассматриваемом слое смеси

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4)$$

равно также $\sigma = \varepsilon_2 * E_{II}$,

(5)

где E_{II} - параметр переукладки.

Полная деформация рассматриваемого слоя смеси

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

Начальные условия:

$$\sigma(t=0)=0, \quad s(t=0)=0, \quad v(t=0)=0, \quad (6)$$

где s, v – перемещения и скорости границ слоя смеси,

Граничные условия:

На свободной поверхности уплотняемой формы

$$\sigma(z=0)=p(t), \quad (7)$$

где $p(t)$ - давление газо-воздушной смеси на свободной поверхности формы.

На модельной плите

$$s(z=h_0)=s_M(t), \quad v(z=h_0)=v_M(t), \quad (8)$$

где $v_M(t), s_M(t)$ - скорости и перемещения модельной плиты со столом.

где ρ_0 – начальная плотность слоя формовочной смеси, v – скорость частиц слоя формовочной смеси, σ - нормальные осредненные напряжения, являющиеся суммой нормальных средних напряжений, действующих на верхних и нижних границах слоя формовочной смеси, ε - деформация слоя формовочной смеси, t – время.

Описание программы Sandcomp 1

Программа Sandcomp1 предназначена для исследования уплотнения формовочной смеси газоимпульсным методом с помощью различных моделей процесса уплотнения. Программа позволяет задавать различные параметры процесса уплотнения (такие, как нагрузка на формовочную смесь, характеристики формовочной смеси, характеристики основания), проводить расчет для различных моделей процесса, представлять результаты в виде графиков плотности, деформации, напряжений и скоростей слоев смеси и демонстрировать движение формовочной смеси в течение процесса уплотнения.

Рабочие окна программы

Главное окно выходит на экран после запуска программы. Главное окно имеет меню, пункты которого позволяют вывести на экран все рабочие окна программы, и набор дублирующих команды меню управляющих кнопок. Закрытие главного окна приводит к закрытию всех окон программы и окончанию работы программы.

Параметры

Окно *Параметры* имеет полный набор инструментов, позволяющих задавать все исходные для расчета параметры процесса уплотнения. Сохранение изменений, т.е. нажатие на кнопку *Сохранить*, отменяет полученные при расчете результаты расчета, т.к. результаты расчета должны соответствовать указанным исходным параметрам расчета. Для сохранения результатов расчета следует закрывать окно без нажатия на кнопку

Сохранить. Окно *Параметры* не позволяет переключаться на другие окна до закрытия окна.

Выбор модели

Окно *Выбор модели* позволяет выбрать для текущего расчета и просмотра результатов одну из трех предлагаемых программой моделей. В окне демонстрируется схема выбранной модели. Наименование выбранной модели отражается на всех рабочих окнах программы.

Расчет

Окно *Расчет* позволяет запустить на выполнение процесс расчета и проследить окончание трех этапов расчета по индикаторам. Расчет производится для указанной модели по указанным параметрам. Результаты расчета сохраняются до нажатия кнопки *Сохранить* окна *Параметры*.

Графики

Окно *Графики* позволяет просмотреть графики параметров процесса уплотнения, найденные в результате расчета. Демонстрируются графики указанной модели процесса. Окно позволяет указать период процесса, не выходящий за расчетный период, а также указать слои формовочной смеси для отражения параметров расчета. При отсутствии результатов расчета для указанной модели управляющие элементы для показа графиков не активны и активизируются после проведения расчета для указанной модели.

Демонстрация

Окно *Демонстрация* позволяет просмотреть результаты расчета в виде движения формовочной смеси и отражения плотности в различный момент времени для различных слоев. Показ движения формовочной смеси начинается после нажатия кнопки *Run* при условии, если существуют результаты расчета для указанной модели. Другие кнопки позволяют просматривать движение в различные моменты времени. Выбор другой модели процесса устанавливает картину движения в начальный момент и активизирует кнопку *Run* при наличии результатов расчета для указанной модели.

Модели процесса уплотнения

Модели процесса уплотнения можно разделить на три составляющие:

- Нагрузка на уплотняемую формовочную смесь;
- Формовочная смесь, уплотняемая под действием нагрузки;
- Движение основания как твердого тела на упругом фундаменте.

Формовочная смесь представлена в виде сплошного тела в трех вариантах:

- Упругое;
- Вязкоупругое;

- Вязкоупругое с переукладкой.

Моделирование нагрузки и движения основания общее для трех моделей формовочной смеси. Движение формовочной смеси описывается уравнениями трех видов: сохранения количества движения, уравнения неразрывности и уравнений, отражающих зависимость напряжения от деформации (уравнений среды). Первые два вида уравнений являются классическими уравнениями механики. Последний вид уравнений (уравнения среды) является объектом исследования и не имеет окончательных формулировок. Представленные в программе зависимости отражают три варианта сплошной среды, указанные выше.

Моделирование нагрузки

Нагрузка задается в виде кусочно – линейной функции, представленной на рис. 7.1. Указанные на рисунке параметры функции являются регулируемыми и задаются в программе как исходные параметры для расчета.

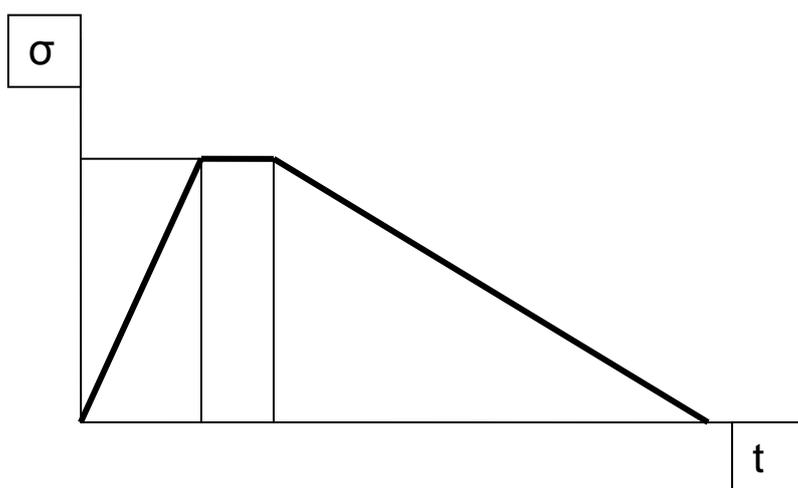


Рис. 7.1. Модель нагрузки, где σ_{\max} – максимальное значение нагрузки;

t_0, t_1, t_2, t_k – соответственно время начала процесса уплотнения, время достижения максимального значения нагрузки, время окончания периода, в течение которого значение нагрузки можно считать максимальным и время спада нагрузки до нулевого значения.

Моделирование движения формовочной смеси

Важнейшим параметром уплотнения формовочной смеси является плотность ρ смеси, полученная в результате уплотнения смеси. При моделировании движения формовочной смеси рассматривается плотность в зоне, близкой к стенкам корпуса, где сказывается влияние трения формовочной смеси на ее движение и в зоне, достаточно удаленной от стенок корпуса, где можно считать, что влияние трения отсутствует. Плотность

смеси определяется через такие параметры уплотнения формовочной смеси, как скорость V слоев смеси, напряжения σ и деформации ε в различных слоях смеси. Моделирование процесса уплотнения основывается на линейной зависимости параметров уплотнения в течение элементарного промежутка Δt и для элементарного объема формовочной смеси. Поэтому весь период процесса уплотнения разбивается на элементарные промежутки времени Δt и весь объем формовочной смеси делится на взаимодействующие друг с другом горизонтальные пласти толщиной Δz и массой δm . Классические уравнения механики (закон сохранения импульса и условие неразрывности среды), описывающие движение пласта как сплошного тела, в «машинном» виде представляются следующим образом:

$$((\sigma_{i,j} + \sigma_{i,k}) * F_{\text{осн}} / 2 - ((\sigma_{i-1,j} + \sigma_{i-1,k}) * F_{\text{осн}} / 2 + \delta m * G + T * \text{Sgn}(V)) * \Delta t = \delta m * ((v_{i,j} + v_{i-1,j}) / 2 - (v_{i,k} + v_{i-1,k}) / 2); \quad (9)$$

$$((\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j}) / 2 - (\varepsilon_{i,k} + \varepsilon_{i-1,k}) / 2) \Delta t - ((v_{i,j} + v_{i,k}) / 2 - (v_{i-1,j} + v_{i-1,k}) / 2) / \Delta z = 0 \quad (10)$$

Уравнения среды для трех принятых моделей среды выглядят следующим образом:

а) Для упругого тела

$$\sigma_{i,j} = \sigma_{i,k} + (\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,k}) * E_k \quad (11)$$

б) Для вязкоупругого тела

$$\sigma_{1,i,j} = \sigma_{1,i,k} + (\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,k}) * E_k \quad (12)$$

$$\sigma_{2,i,j} = \sigma_{2,i,k} + ((\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,k}) / \Delta t - (\varepsilon_{i,k} - \varepsilon_{i,k-1}) / \Delta t) * \eta_k \quad (13)$$

$$\sigma_{i,j} = \sigma_{1,i,j} + \sigma_{2,i,j} \quad (14)$$

с) Для вязкоупругого тела с переукладкой

$$\sigma_{1,i,j} = \sigma_{1,i,k} + (\varepsilon_{1,i,j} - \varepsilon_{1,i,k}) * E_k \quad (15)$$

$$\sigma_{2,i,j} = \sigma_{2,i,k} + ((\varepsilon_{1,i,j} - \varepsilon_{1,i,k}) / \Delta t - (\varepsilon_{1,i,k} - \varepsilon_{1,i,k-1}) / \Delta t) * \eta_{1k} \quad (16)$$

$$((\varepsilon_{2,i,j} - \varepsilon_{2,i,k}) / \Delta t = (\varepsilon_{2,i,k} - \varepsilon_{2,i,k-1}) / \Delta t + (\sigma_{i,j} - \sigma_{i,k}) * \eta_{2k} \quad (17)$$

$$\sigma_j = \sigma_{1j} + \sigma_{2j} \quad (18)$$

Моделирование движения основания

Основание представлено в модели как твердое тело,двигающееся под действием следующих сил:

- Равнодействующей распределенной силы, равной произведению напряжения σ_z на нижнем слое формовочной смеси на площадь $F_{\text{осн}}$;
- Силы тяжести основания; масса основания задается через коэффициент массы КМ, показывающий отношение массы основания к массе формовочной смеси, т.е. $M_{\text{осн}} = M_{\text{ф.см.}} * \text{КМ}$;
- Силы упругости $C_{\text{упр}}$ со стороны фундамента основания; Сила упругости рассчитывается как произведение коэффициента жесткости

основания $K_{\text{жестк}}$ на текущее перемещение основания, равное перемещению последнего слоя формовочной смеси v_z .

Уравнение движения основания отражает закон сохранения импульса движения и выглядит следующим образом:

$$((\sigma_{z,j} + \sigma_{z,k})/2 * F_{\text{осн}} + M_{\text{осн}} * G + K_{\text{жестк}} * S) * \Delta t = M_{\text{осн}} * (v_{z,j} - v_{z,k}) \quad (19)$$

где S – перемещение основания, рассчитываемое как сумма всех элементарных перемещений $V_{\text{ср}} * \Delta t$ за периоды, предшествующие расчетному периоду.

В уравнениях 4 -10 индекс j означает значение параметров в конечный момент времени, k - в начальный момент времени расчетного периода. За начальные условия принимаются все параметры с индексом k и как граничное условие – значение напряжения на нулевом слое, определяемое с по графику нагрузки

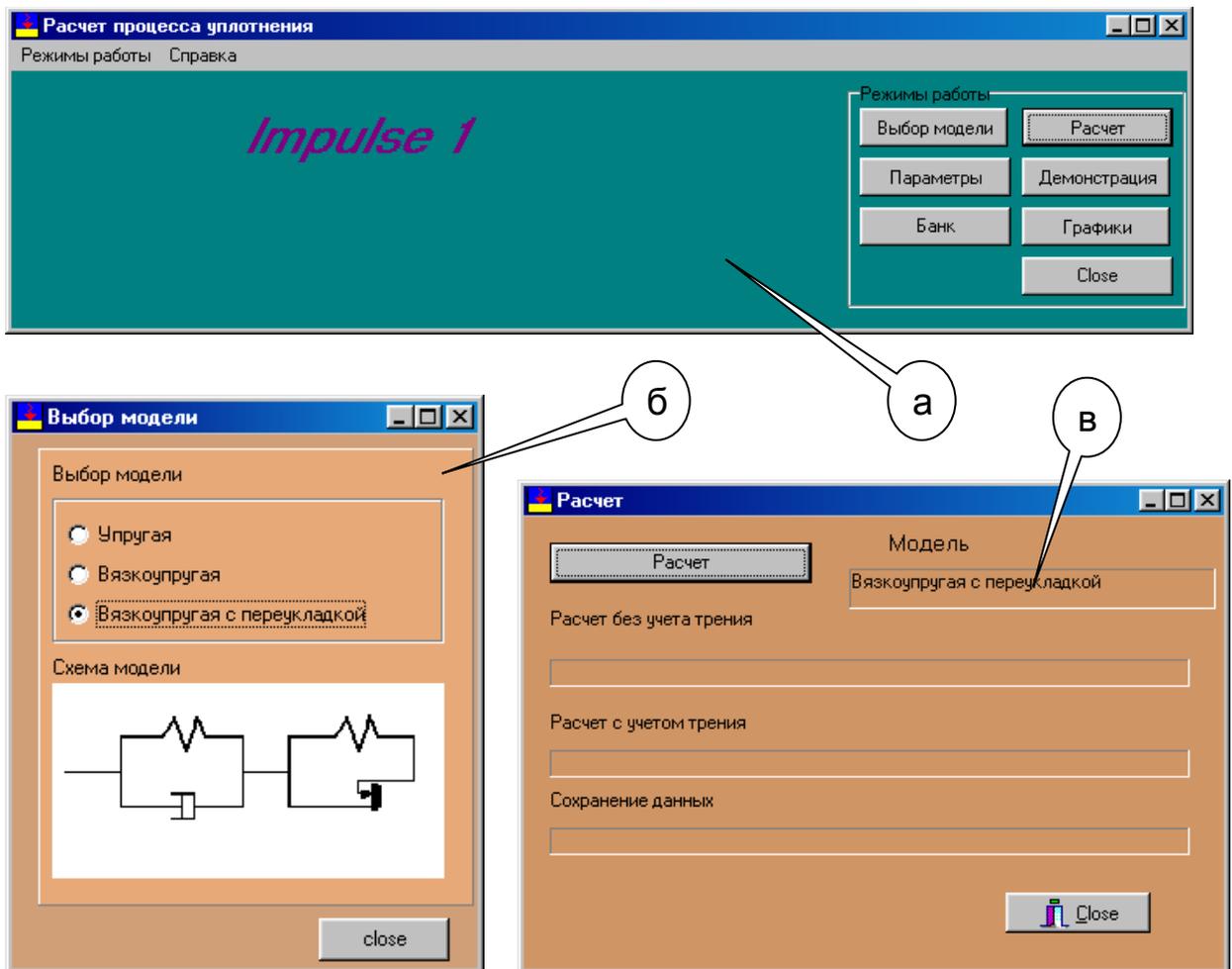


Рис. 7.2. Рабочее меню программы *Impulse 1*: а – основная панель, б – панель выбора модели, в – панель контроля расчета и сохранения данных.

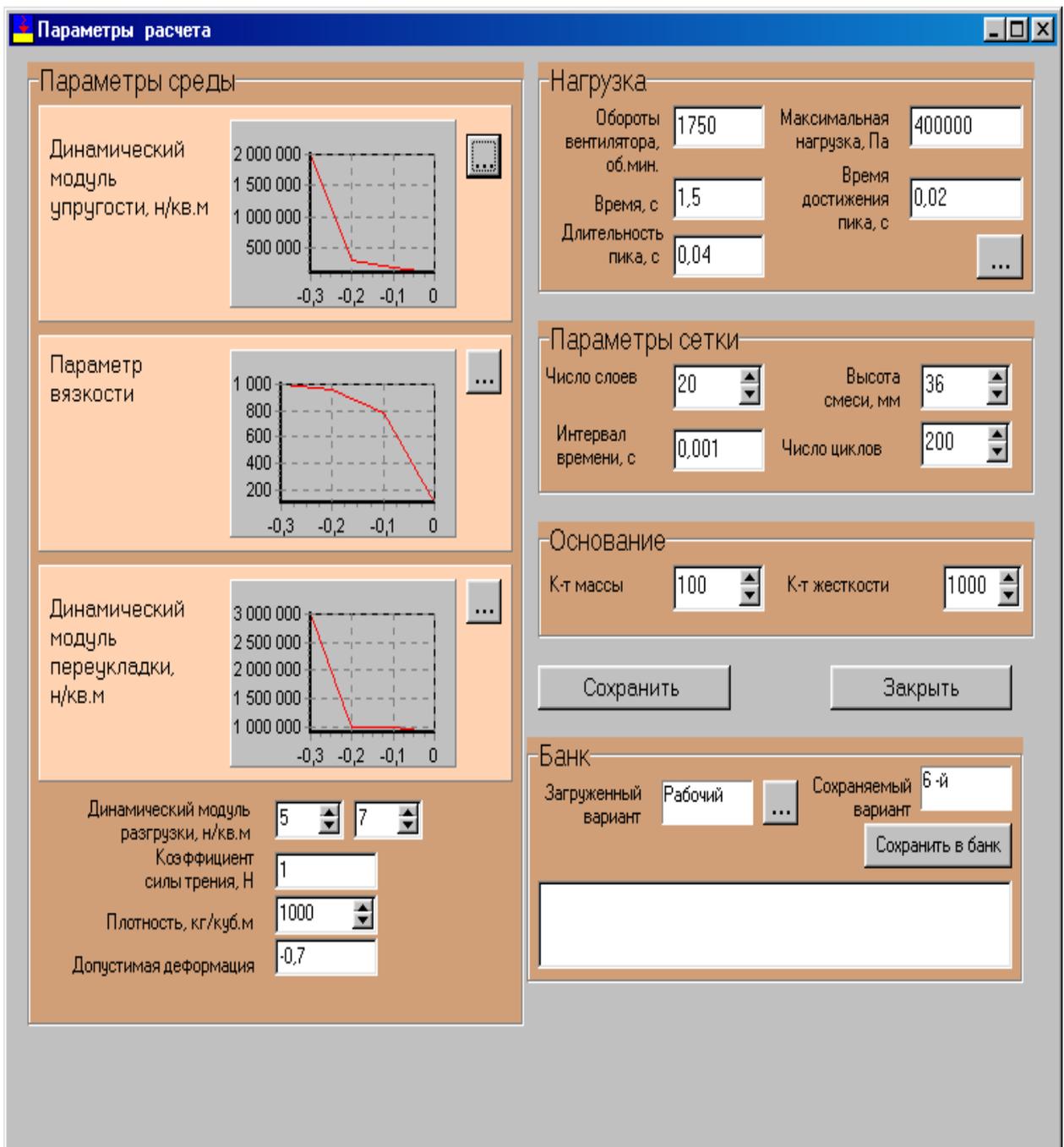


Рис.7.3. Панель настройки регулируемых параметров модели процесса уплотнения формовочной смеси.

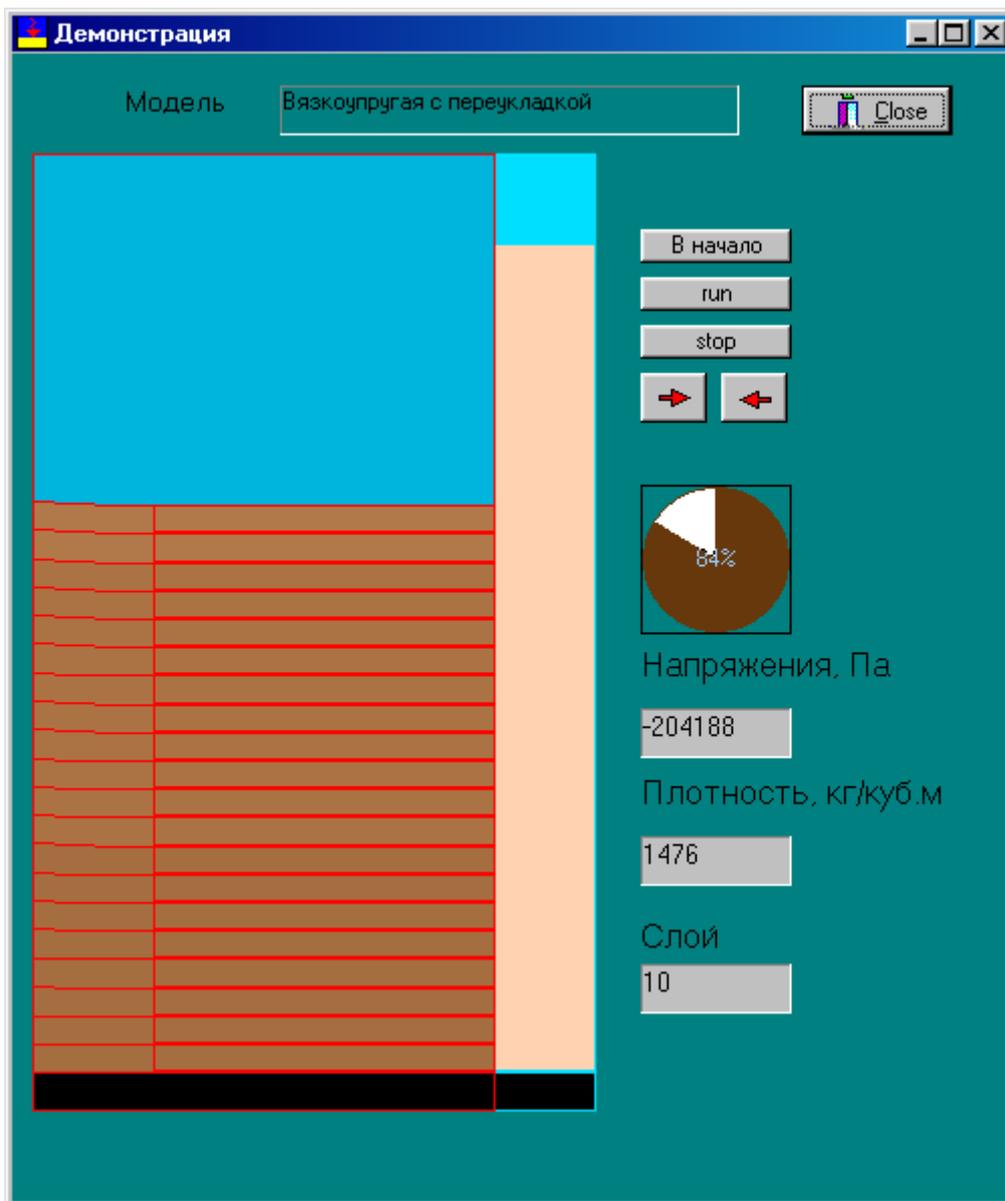


Рис. 7.4. Главная форма демонстрационной модели процесса уплотнения формовочных смесей при импульсном методе:

1 – кнопка возврата в начало процесса; 2 – кнопка пуска; 3 – кнопка остановки; 4 – кнопка пошагового изменения времени процесса уплотнения; 5 – таймер; 6 – индикаторы текущих значений напряжений, плотности в газовой камере и по слоям формовочной смеси.

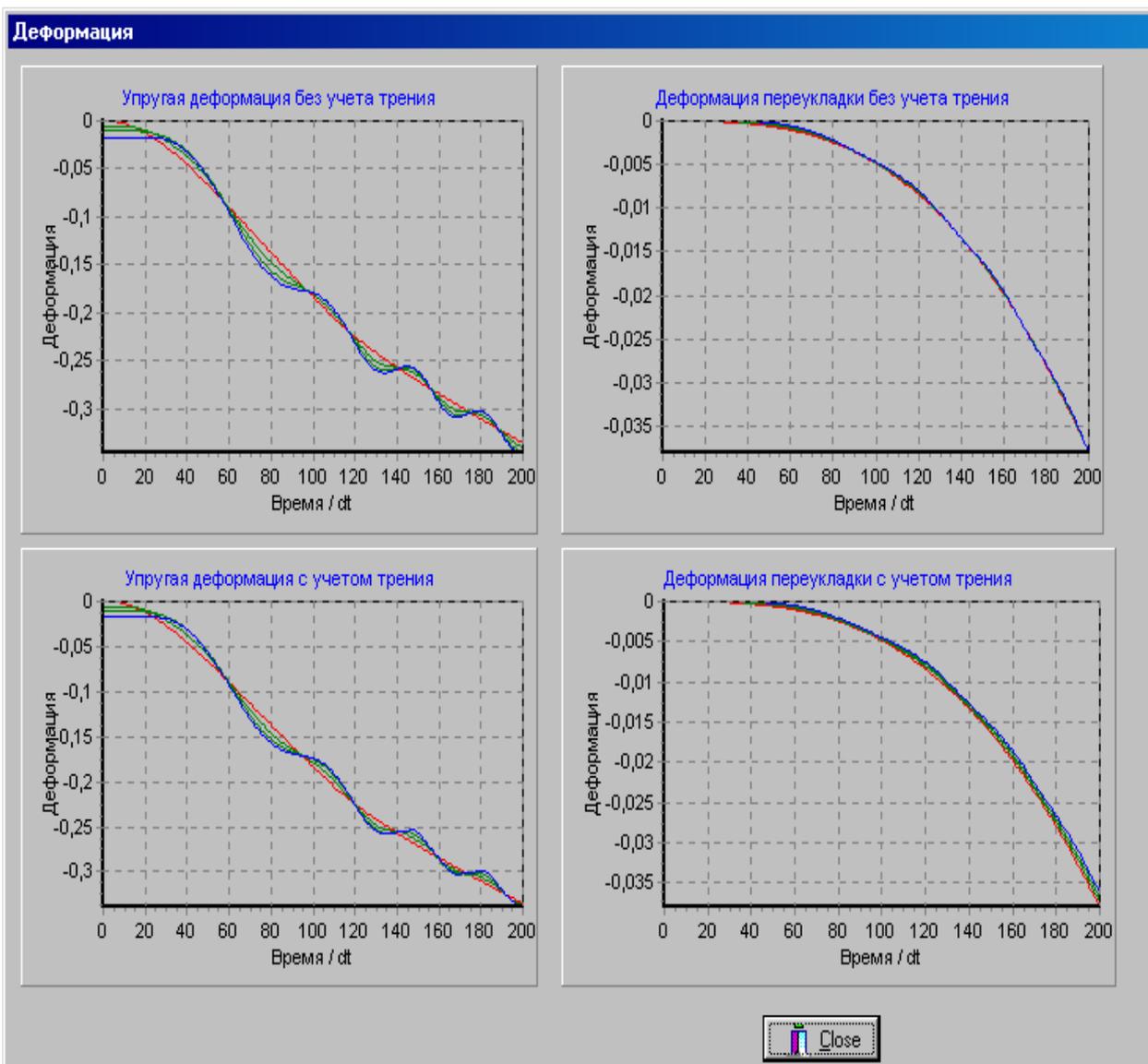


Рис. 7.5. Пример расчета изменения деформаций по слоям формовочной смеси в процессе уплотнения при значениях исследуемых параметров: Слои смеси представлены 0, 6, 12 и 20 от свободной поверхности уплотняемой формы.

Выводы:

1. Таким образом разработанная компьютерная модель процесса уплотнения формовочной смеси при импульсном нагружении достаточно адекватно описывает динамические процессы в формовочной смеси в процессе уплотнения. Об этом свидетельствуют совпадения характера кривых скоростей, ускорений и перемещений слоев формовочной смеси, полученным ранее экспериментальным данным.

2. Выбор и расчет реальных параметров требует проведения дополнительных экспериментальных исследований. Эта работа существенно облегчается наличием компьютерной модели, позволяющей планировать требуемые эксперименты.

8. ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Методы управления и регулирования САУ

В структуре современных электроэнергетических систем (ЭЭС) значительное место занимают агрегаты электрической части, выполняющие функцию непосредственной генерации электроэнергии - турбогенераторы. Качество производимой энергии напрямую связано с эффективностью автоматического и полуавтоматического управления блоками турбогенераторов. Очевидная необходимость совершенствования процессов электромеханического преобразования энергии в генераторных блоках обуславливает использование новых подходов к проектированию систем управления частотой и мощностью турбогенераторов и мобилизацию современных методов теории автоматического управления.

Следует выделить следующие основные признаки мощных энергосистем: динамичность, нелинейность, многомерность, многосвязность, наличие взаимодействующих подсистем. Динамичность проявляется в том, что автономно, или под влиянием внешних воздействий, процессы в энергосистеме протекают во времени, а характер переходных процессов зависит от внутренних характеристик и параметров системы.

Нелинейность проявляется в математических моделях объектов энергосистем, функционирующих в режимах больших отклонений и пиковых возмущений. Вид этих моделей показывает, что в них могут возникнуть явления динамического хаоса, а это весьма усложняет проблему управления.

Многомерность - высокая размерность уравнений, описывающих сложную энергосистему, Она неотъемлема от современных больших систем. Многомерность приводит к трудностям, как аналитическим, так и вычислительным,

Многосвязность - это наличие многих переменных и управляющих воздействий, связанных друг с другом сложными зависимостями. Она приводит к наличию в энергосистеме нескольких устройств управления. Классическая теория автоматического управления рассматривала системы регулирования одной величины одним регулирующим органом и из многосвязных задач с ее помощью могли быть изучены лишь те, которые удается свести к нескольким односвязным.

Наличие взаимодействующих подсистем проявляется в том, что мощная энергосистема имеет составную структуру и представляет собой объединение нескольких более простых подсистем, взаимосвязанных между собой. Учет явлений взаимосвязанности и взаимовлияния процессов в

энергоблоках становится принципиально необходимым и важным при согласованном управлении группой турбогенераторов, входящих в состав энергоблоков электростанций. Технологические процессы, протекающие в отдельных турбогенераторах, связаны между собой через общую нагрузку как в составе отдельной электростанции (близкая взаимосвязь), так и через общую энергосеть (дальняя взаимосвязь) [36]. Разрозненное рассмотрение процессов в отдельных частях энергоблока может, вообще говоря, не только не дать ожидаемого общего эффекта, а, более того, может привести к заметному ухудшению работы и даже неустойчивости ЭЭС [36]. Отсюда следует, что возникает существенная необходимость рассмотрения этих процессов как некоторой единой динамической системы со своими желаемыми свойствами.

Физическую сущность многих современных технических систем, в том числе и турбогенераторов энергосистем, составляют колебательные процессы. Колебательные режимы могут быть как полезными, так и вредными. В отношении турбогенераторов крайне нежелательными колебательными режимами являются самораскачивание и самовозбуждение, т.к. они приводят к возникновению нарастающих незатухающих колебаний, т.е. к нарушению устойчивости. Однако особенно важным случаем являются внешние низкочастотные гармонические возмущения, действующие на турбогенераторы со стороны энергосистемы. Возмущения со стороны ЭЭС способствуют появлению системных колебаний, что, в свою очередь, может привести к нарушению устойчивости ЭЭС, асинхронному ходу и вообще развитию системной аварии.

Регулируемая ЭЭС представляет собой сложную нелинейную электромеханическую колебательную систему. В [36] указывается на следующие колебательные свойства регулируемой ЭЭС:

1. Многочастотность колебаний энергосистемы определяется наличием динамических элементов с разными постоянными времени. Низкочастотные составляющие ($f \approx 0,2 \div 1,5$ Гц) характеризуют колебания ротора синхронного генератора (СГ) и зависящих от них режимных параметров (углов, токов статора, мощностей). Они называются электромеханическими колебаниями (ЭМК). Высокочастотные ($f > 1,5$ Гц) колебания проявляются в системах регулирования возбуждения СГ и называются электромагнитными колебаниями. Они, в отличие от электромеханических колебаний, обычно локализуются внутри СГ и не «выходят» в систему,

2. Зависимость характера ЭМК от величин возмущения. Существует множество возмущений (отклонений и производных угла), разделяющее ЭМК на колебательные и апериодические.

3. Зависимость параметров ЭМК от исходного режима и амплитуды колебаний. При увеличении амплитуды проявляются такие новые свойства, как агармоничность (кроме первой гармоники имеются нулевая и высшие) и потеря изохронности (собственная частота ЭМК зависит от амплитуды).

4. Для энергосистемы как нелинейной колебательной системы характерна возможность резонанса - возникновение колебаний на основной частоте или частоте, дробной основной (параметрический резонанс).

5. Зависимость колебательных свойств ЭЭС от способа регулирования возбуждением, и настройки автоматического регулятора возбуждения (АРВ). В нерегулируемой системе после всех возмущений, меньших критических, колебания являются затухающими. В регулируемой же ЭЭС возможны различные колебательные процессы: затухающие колебания при начальных возмущениях, меньших критических - устойчивость равновесия при любых начальных условиях; затухающие колебания при ограниченных начальных условиях, меньших критических, и нарастающие колебания при превышении этих ограниченных возмущений - устойчивость в ограниченной области начальных условий; расходящиеся колебания при любых начальных условиях - нарушение статической устойчивости в виде самораскачивания,

6. Свойство автоколебательности - появление устойчивых свободных периодических колебаний.

Повышение требований к качеству работы турбогенераторов: устойчивости, надежности, расширение их функциональных возможностей, да и сама логика научно-технического прогресса обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления турбогенераторами. В этой связи в данной главе предлагается взглянуть на проблему управления турбогенераторами с точки зрения современной науки об управлении, т.е, с учетом нелинейности, многомерности и многосвязности их математических моделей и использования современных методов синтеза нелинейных векторных систем взаимосвязанного управления.

Методы управления синхронными генераторами.

Все синхронные генераторы, работающие в ЭЭС, оснащаются

устройствами АРВ, которые осуществляют регулирование тока возбуждения СГ по определенному закону. Применение АРВ призвано обеспечить требуемые уровни напряжения в узлах ЭЭС, регулировать потоки мощности по линиям электропередачи, повысить статическую, динамическую и результирующую устойчивость параллельной работы генераторов и электростанций в ЭЭС. В процессе синхронизации генераторов АРВ осуществляет выравнивание ЭДС СГ с напряжением на линиях электростанции. В аварийных режимах АРВ производят форсировку (быстрое увеличение) тока возбуждения до максимального значения и быстрое снижение (расфорсировку) тока возбуждения. Это способствует ускорению восстановления напряжения до нормального значения после отключения короткого замыкания [36, 67].

В соответствии с задачами, возлагаемыми на систему автоматического управления возбуждением, типовой АРВ состоит из трех основных частей [36, 67]:

- каналов регулирования по отклонению режимных параметров от заданных значений (напряжения на зажимах генератора, тока статора); эти каналы влияют на статические и динамические характеристики регулируемой системы;
- каналов регулирования по производным режимных параметров (каналов стабилизации); эти каналы влияют только на динамические характеристики регулируемой системы, т.е. на условия устойчивости и показатели качества переходных процессов;
- устройство форсировки, действующего при больших возмущениях в системе и предназначенного для улучшения свойства динамической устойчивости.

Таким образом, выбор АРВ, эффективно выполняющего возложенные на него функции, заключается в решении трех задач:

- определения значений параметров канала регулирования по отклонению напряжения, обеспечивающих заданную точность поддержания напряжения в различных режимах работы СГ;
- определение типа и параметров канала стабилизации, обеспечивающих статическую устойчивость и заданные показатели качества переходных процессов при малых отклонениях от исходного установившегося режима;
- установления параметров устройства форсировки, улучшающих динамическую устойчивость.

Существующие АРВ можно разделить на две большие группы в зависимости от применяемого способа стабилизации: АРВ пропорционального действия (АРВ-ПД) и АРВ сильного действия (АРВ-СД).

При пропорциональном регулировании регулирующее воздействие определяется отклонением напряжения от заданного значения, током нагрузки и $\cos\phi$ генератора. Как правило, АРВ пропорционального действия используются в сочетании с системами возбуждения относительно невысокого быстродействия, такими, как электромашинная и высокочастотная, и в настоящее время мало применяются. Они не оказывают существенного влияния на статическую и динамическую устойчивость системы, поэтому ими оснащаются генераторы, условия устойчивости работы которых в системе не являются критическими.

Дальнейшее развитие применения методов нечеткой логики для управления возбуждением СГ привело к тому, что для повышения адаптивности нечетких регуляторов были использованы искусственные нейронные сети.

В [54] показано применение в качестве АРВ СГ гибридной технологии адаптивной нейро- нечеткой системы заключений (ANFIS). В этом случае к классической схеме системы нечеткого управления добавляются база знаний и адаптивная нейронная сеть прямого распространения с возможностью управляемого обучения. Для обновления параметров ИНС применяется сочетание градиентного метода и метода наименьших квадратов. Первоначально обучение сети происходит в автономном режиме, а затем в интерактивном (on-line) режиме - это означает, что ИНС распознает режим и немедленно перенастраивает параметры регулятора при получении входной и выходной информации, В качестве тестового регулятора для обучения нейронной сети принят LQG-регулятор, Разработанный метод применяется следующим образом.

1. Исходная нелинейная модель ЭЭС представляется набором линеаризованных систем для различных режимов.

2. Для каждой линеаризованной системы строится оптимальный по критерию

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + 2x^T N u + u^T R u) dt,$$

LQG-регулятор

$$u = -K\hat{x}.$$

При этом в структуру регулятора введен фильтр Калмана для вычисления оценок вектора состояния с учетом шумов входных и выходных сигналов.

3. Полученные коэффициенты управления (2,3) для разных режимов преобразуются в единую базу знаний нечеткой системы управления с ИНС - функции принадлежности,

Отметим, что в работе впервые было осуществлено аналитическое конструирование нелинейного агрегированного регулятора возбуждения с использованием нелинейной модели СГ, Для решения поставленной задачи в использован подход, основанный на оптимизационной идеологии. Критерий качества, который в должной мере отражал бы указанные выше требования к АРВ, соответствует сопровождающему оптимизирующему функционалу (СОФ) метода АКАР, Это объясняется тем, что использование критерия быстродействия для режима малых отклонений приводит к значительным колебаниям, вызванным релейным характером управления, к тому же неизвестна структура поверхности переключения для такого нелинейного объекта. В [36, 37, 38, 39] доказано, что СОФ является переменным, т.к. в режиме больших отклонений он соответствует критерию быстродействия, а в режиме малых отклонений - квадратичному критерию. Синтезированные нелинейные законы управления СГ по его нелинейной модели обеспечили асимптотическую устойчивость замкнутой системы в целом, демпфирование колебаний и требуемый статический режим.

Методы управления частотой и мощностью

Частота вращения энергоагрегатов определяет частоту переменных напряжения и тока, являющуюся показателем качества электроэнергии. Согласно нормативам, отклонения частоты не должны превышать значения $\Delta f = \pm 0,05$ Гц в нормальных, и $\pm 0,2$ Гц в аварийных условиях ($f_{ном} = 50$ Гц). Указанное практическое постоянство частоты переменного тока обуславливает необходимость обеспечения постоянства частоты вращения всех энергоагрегатов, работающих параллельно, что достигается автоматическим регулированием частоты вращения и связанной с нею активной мощности энергоагрегатов, В целом регулирование частоты и активной мощности в ЭЭС определяется первичным, вторичным и третичным регулированием.

При **первичном регулировании** соответствующий регулятор воздействует на впуск в турбину энергоносителя (пара, газа) и поддерживает частоту вращения генератора. Для стабилизации частоты вращения регулятор воздействует на мощность турбины, реагируя на отклонение частоты в соответствии со своей статической характеристикой. Таким образом, первичное регулирование обеспечивает стабилизацию частоты, удерживая ее отклонения в требуемых пределах при внезапных, в том числе

аварийных нарушениях баланса мощности.

Вторичное регулирование при нормальной частоте ($\Delta f=0$) обеспечивает устранение возникающих отклонений от планового баланса мощности энергоагрегата, а также необходимое сальдо перетоков мощности. При возникновении отклонения частоты за счет частотной коррекции автоматически изменяются задания всем параллельно работающим энергоагрегатам.

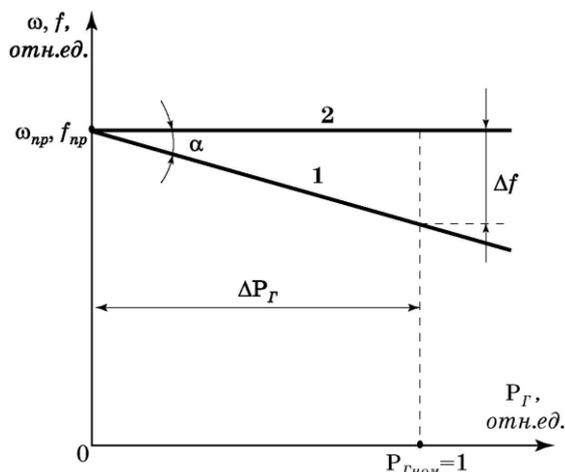


Рис. 8.1. Статическая и астатическая характеристики АРЧВ

Третичное регулирование осуществляет распределение мощности между энергоагрегатами энергосистемы в соответствии с оптимальными экономическими характеристиками.

Традиционно для регулирования частоты вращения на всех энергоагрегатах устанавливаются автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ), функции которых заключаются в первичном регулировании частоты вращения и вторичном регулировании частоты и активной мощности в ЭЭС [68]. АРЧВ на отдельном энергоагрегате обеспечивает регулирование частоты вращения агрегата по принятому закону (статическому или астатическому), а при параллельной работе — регулирование мощности турбин и распределение нагрузок между параллельно работающими энергоагрегатами по статической характеристике.

В целом отмечается необходимость перехода от гидравлических систем регулирования частотой вращения и давления пара на электрогидравлические системы с микропроцессорными регуляторами. Прежде всего это обусловлено ужесточением современных требований по первичному регулированию частоты, а также возможностью расширения функциональных возможностей систем регулирования за счет современных АСУ ТП.

Анализ и сравнение методов управления

Рассмотренные выше принципы регулирования частоты и активной мощности по статическим характеристикам обладают простотой реализации и расчета, позволяют точно распределить нагрузку между параллельно работающими энергоагрегатами, Их существенным недостатком является то, что они не могут обеспечить астатическое регулирование частоты и мощности. Повышение точности регулирования за счет увеличения статизма АРЧВ нежелательно, т. к., это угрожает опасным для турбины возрастанием частоты вращения при сбросе нагрузки.

Необходимость безошибочного поддержания частоты в энергосистемах приводит к регулированию ее по астатической характеристике. Однако при астатической настройке АРЧВ двух и более параллельно работающих турбоагрегатов возникает неопределенность в распределении мощности, хотя частота в системе остается постоянной. Это означает, что появляется возможность бесконечной «перекачки» мощности с одного агрегата на другой. Практически это невозможно, следовательно, при параллельной работе агрегатов в ЭЭС с астатической настройкой регулятора может работать только один агрегат. Для параллельной работы нескольких агрегатов необходимо использовать статическую настройку регулятора. Таким образом, в системе неизбежно будет присутствовать статическая ошибка при регулировании частоты.

Как показано выше, большое применение нашли типовые регуляторы (в рамках ПИД - законов) для регулирования частоты и мощности ЭЭС: пропорционально-интегральный регуляторы обеспечивают регулирование нормальных режимов энергоблока, поддерживая его параметры с необходимой точностью, а пропорционально-дифференциальный регулятор действует при необходимости быстрых изменений режима и при нарушениях нормального режима в ЭЭС.

Расчет параметров настройки ПИД-регуляторов, возможен либо по линеаризованной модели объекта управления, либо по переходной функции. Отсюда следует, что область применения таких регуляторов ограничивается как нормальными режимами работы ЭЭС, так и режимами, при которых действуют небольшие возмущения - область малых отклонений. При возникновении значительных отклонений от стационарных состояний (наличие больших возмущений, аварийных ситуаций) существенное влияние на поведение объекта управления оказывают нелинейности, отброшенные при линеаризации. Таким образом, настройки регулятора оказываются не адекватными исходной модели. В этой ситуации регулятор не может обеспечить сохранение асимптотической устойчивости, К тому же

турбоагрегаты характеризуются многорежимностью функционирования, связанной с существенным изменением нагрузки. Это означает, что одни и те же настройки регуляторов при разных режимах функционирования могут ухудшать качество процессов и результирующую устойчивость системы.

Для обеспечения устойчивости автоматической системы регулирования, частоты вращения и мощности коэффициенты усиления соответствующих автоматических регуляторов ограничиваются, что приводит к невозможности нейтрализовать последствия больших аварийных возмущений (короткое замыкание, отключение основного электрооборудования и т.п.).

Такие нелинейные методы синтеза систем управления частотой и мощностью ЭЭС как метод с использованием функций Ляпунова интервального типа и координирующее управление на основе принципа сравнения, так или иначе опираются на линеаризованные на интервале исходные нелинейные модели ЭЭС, Это означает, что система управления обеспечивает выполнение целей управления и устойчивость системы только в области адекватности интервальной модели, К тому же в методе, основанном на принципе сравнения, не приводятся рекомендации по выбору компонент вектора состояния модели сравнения, В этих методах управление частотой вращения и активной мощностью турбогенераторов ЭЭС осуществляется только по одному каналу - воздействием на турбину, т.е. подразумевается, что управление возбуждением СГ является неизменным и ЭДС синхронных генераторов $E_{qi} = \text{const}$. Однако исследование управляемости турбогенератора по его нелинейной модели с помощью условия общности положения показало, что использование двухканального согласованного управления турбогенератором, работающим на энергосистему большой мощности, позволяет существенно повысить динамические свойства ЭЭС и избежать вырожденных режимов движения (соответственно особых управлений).

При управлении возбуждением СГ, как правило, используются АРВ-СД (иногда используется ПИД-закон). Преодолеть основной недостаток АРВ-СД, связанный с фиксированностью параметров регуляторов для определенного режима, пытаются, преимущественно, используя методы нечеткой логики. О недостатках этих методов было сказано выше. К тому же, как отмечается в [1]. «... отечественные АРВ-СД чрезвычайно чувствительны к малым возмущениям вплоть до возникновения высокочастотных автоколебаний». Из-за нелинейности СГ одинаковые настройки АРВ для режимов больших и малых отклонений могут оказаться противоречивыми в отношении качественных свойств энергосистемы. Таким образом, предлагаемые методы управления возбуждением не позволяют

найти такую структуру АРВ, которая позволила бы удовлетворить требованиям к свойствам энергосистемы в нормальных и аварийных режимах. Рассмотренные законы управления возбуждением СГ, имеющие структуру отличную от структуры АРВ-СД, в той или иной мере опираются на линейные или линеаризованные модели СГ.

В своих работах профессор В.А. Веников [36, 67], указывал, что «... аварийное регулирование турбин дает существенный эффект лишь в том случае, если оно осуществляется в тесной взаимосвязи с регулированием возбуждения турбогенератора (форсирование возбуждения, развозбуждение, демпфирование колебаний). Поэтому необходимо одновременное согласование управления возбуждением турбогенератора и механической мощностью его турбины от одного комплексного управляющего устройства».

С учетом всего выше сказанного необходимо учитывать следующие особенности турбоагрегатов:

- структурная сложность, проявляющаяся в многомерности, многосвязности и многоконтурности;
- многорежимность функционирования, связанная с существенным изменением нагрузки;

Сильное проявление в переходных режимах нелинейных характеристик, когда применение обычных методов линеаризации (замена действительной характеристики средней секущей, линеаризация по касательной в окрестности состояния равновесия) приводит к существенным погрешностям расчетов и даже к качественным искажениям результатов.

Обобщая изложенные выше методы управления, можно сказать, что в настоящее время системы управления частотой вращения и активной мощностью энергоагрегатов, как правило, проектируются в виде отдельных линейных подсистем. Линеаризованные системы адекватны только в небольшой области отклонения от установившегося состояния, В пиковых и аварийных ситуациях, когда энергоагрегаты работают в режимах больших отклонений, значительно проявляются их нелинейные свойства. Это означает, что для эффективного управления, обеспечивающего, по крайней мере, асимптотическую устойчивость энергосистемы, необходимо рассматривать нелинейные модели объекта и проводить синтез системы управления методами, которые в полной мере позволяют учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов в энергоагрегатах.

Для синтеза векторных законов управления энергоагрегатами с учетом нелинейных моделей динамики, необходимо переходить на новые концептуальные основы. Такой концепцией является синергетическая теория

управления (СТУ), развитая в трудах профессора А.А. Колесникова [36]. Методы синергетической теории управления позволяют в аналитическом виде получить законы управления для нелинейных многомерных, многосвязных объектов, к которым, собственно, и относятся энергоагрегаты.

Следует также отметить, что использование нелинейных моделей для синтеза синергетических законов управления позволяет учесть естественно-физические свойства объекта управления, а также за счет нелинейности модели увеличить быстродействие системы управления, что невозможно в линейных системах. Немаловажным свойством замкнутой системы синергетическими законами управления является повышенная робастность. Синергетические законы управления обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы в целом. Использование методов СТУ позволяет успешно решать задачу компенсации возмущений, тогда как общепринятые алгоритмы управления не решают этой задачи.

Выводы:

1. Синтез нелинейных систем существенно усложняется, когда непосредственному измерению доступна лишь часть координат состояния объекта и имеются недоступные измерению внешние и параметрические воздействия. Эффективное решение задач управления такими объектами становится возможным с использованием асимптотических наблюдателей состояния и воздействий, построенных на основе методов СТУ.

2. Вышеприведенное описание, на наш взгляд, наглядно иллюстрирует преимущества синергетического управления энергоагрегатами и недостатки обычных методов управления.

9. КАТОДНЫЕ УЗЛЫ В ПЛАЗМОТРОНАХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КАТОДНЫХ ЯВЛЕНИЯХ

В работе показана информация о катодных явлениях, а также процесс работы катода плазмотрона с вращающимся медным электродом и его технические характеристики. В настоящее время катодные явления вызывают большой научный интерес. От изучения катодных явлений зависит долговечность работы генераторов плазмы. Приводится информация о существующих плазмотронах и их технических характеристик. В данной статье раскрывается сущность работы электродного узла плазмотрона, разработанного автором статьи и подтверждённого авторским свидетельством. В данной работе выполнены расчёты теплового потока вращающегося катода, с целью определения ресурса работы. Эрозия электродов в значительной мере определяется тепловыми потоками через пятна дуги в тело электродов. Применением известных методов моделирования катодных явлений, выявлено теоретическое описание работы вращающегося медного катода.

Ключевые слова: катод, катодные явления, электрод, плазма, плазмотрон, тепловой поток, дуга.

В настоящее время плазмотроны широко используется при заготовительных работах для обработки изделий из низколегированных и легированных сталей, сплавов и цветных металлов. Инструментом при этом является электрическая дуга. Дуга генерируется в плазмотроне и возбуждается между электродами – катодом и анодом, роль последнего в плазмотронах прямого действия выполняет обрабатываемое изделие. Мощность плазменной дуги зависит от тока и напряжения дуги. На мощность плазмотрона существенное влияние оказывают конструкционные параметры и используемая плазмообразующая среда, в качестве которой наиболее эффективной рабочей средой является сжатый воздух. Одним из основных задач обеспечения эффективности плазменной резки является повышение ресурса работы конструктивных элементов плазмотрона, в особенности катода плазмотрона [71-74]. Катодные процессы играют очень важную роль в дуговом разряде, обеспечивая перенос электронного тока в плазму. Тепловые и электрические процессы в области контакта дуги с катодом влияют на скорость их разрушения, тем самым уменьшая срок их работы. Это вызвано большими тепловыми потоками на единицу площади поверхности. Тепловые потоки в катод непосредственно связаны с физическими процессами в при катодной области дугового разряда, на поверхности катода и внутри кристаллической решетки металла [75-82].

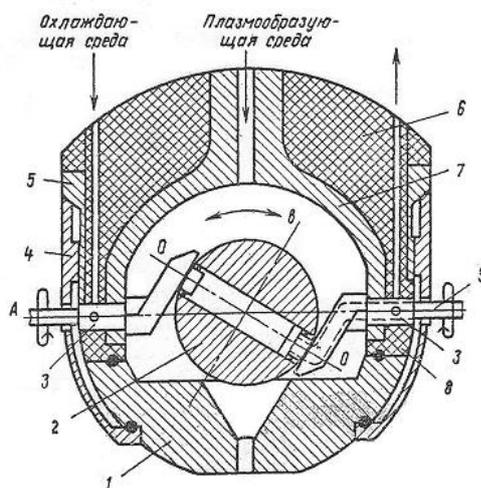
Изучению катодных процессов уделялось всегда, за время развития плазменной техники, большое внимание, что позволило установить для широкого диапазона изменений внешних условий ряд закономерностей, характеризующих катодные процессы (катодное падение потенциала, плотность тока, температура катода, тепловой поток в катод и т.п.).

В данной работе рассмотрены современные представления о катодных явлениях и их закономерностях в приложении к предложенному автором катодному узлу нового типа, предоставляющему возможности повышения ресурса работы катодного узла.

Существует большое разнообразие форм катодов, различающихся не только по конструкции, но и материалом исполнения [71, 72, 74, 83]. Наибольшее распространение получили термохимические катоды, позволившие существенно повысить рабочий ресурс катода плазмотрона, выполненные в виде медной обоймы с запрессованной вставкой из тугоплавких материалов циркония или гафния [71]. Разработка термохимических катодов, стойких в окислительной среде предопределило применение воздуха в качестве плазмообразующей среды и создание способа воздушно-плазменной обработки материалов. Однако ресурс работы термохимического катода существенно зависит от числа включений дуги, а также от множества других факторов [71-74, 76]. Другим путем повышения ресурса электрода плазмотрона явилось рассредоточение теплового потока от пятна дуги на большую площадь, путем непрерывного его перемещения по поверхности электрода. Тем самым, может быть достигнуто существенное снижение эффективного удельного теплового потока, определяемого как отношение тепла, поступающего через опорное пятно дуги к проходимой им площади [83]. С целью повышения ресурса работы электродов в современных плазмотронах марки П-23, П-24, применен принцип расщепления дуги. В катододержателе плазмотрона П-23 установлены четыре термохимические (гафниевые или циркониевые) вставки, к которым при токе свыше 200 А привязываются опорные пятна дуги. Благодаря этому происходит перераспределение токовой и тепловой нагрузок на большую поверхность, в результате чего улучшаются тепловые условия работы термохимических вставок, а, следовательно, повышается ресурс работы плазмотрона. Плазмотрон П-24 содержит медный полый электрод, разрядный канал которого выполнен ступенчатым с расширением в сторону выхода дуги, имеет резьбовую нарезку и торцевое отверстие для подачи дополнительного газа, расход которого составляет 10% от расхода основного плазмообразующего газа, для локализации катодной привязки дуги в области расширения канала. Резьбовая нарезка расщепляет

опорные пятна на несколько пятен, предотвращая тем самым локальный нагрев и увеличивая ресурс работы электрода. Наличие вставок из тугоплавких дефицитных дорогостоящих металлов сказывается существенно на стоимости таких плазмотронов [83].

Одним из путей повышения эффективности технологических процессов является применение более дешевых и доступных материалов для изготовления конструктивных элементов используемых устройств. В работе [84] дано описание, разработанного, автором настоящей статьи, плазмотрона с вращающимся медным катодом, с системой охлаждения проточной водой, который является более дешевым и доступным по сравнению с известными аналогами. Разработанный шарообразный медный полый катод вращается вокруг горизонтальной оси и тем самым снижает удельный тепловой поток через опорное пятно дуги. Катод непрерывно охлаждается водой, что обеспечивается конструкцией плазмотрона (рис. 9.1).



1 – сопло, 2 – электрод, 3 – кривошип, 4 - накидная гайка, 5 – корпус, 6 – втулка, 7 – токоподвод, 8 – кольцо, 9 – гибкий вал.

Рисунок 9.1 – Конструкция плазмотрона с медным вращающимся катодом.

Катод работает при следующих режимных условиях:

- рабочее напряжение $U = (250-350)$ В; ток $I = (300-400)$ А;
- рабочий газ воздух, подается под давлением $P = (3,5-6,0)$ Ра;
- расход воздуха $(3,2-8,0)$ л/с;
- давление охлаждающей воды $(1,5-3,0)$ Па
- диаметр канала сопла $(4.0-5.0)$ мм; диаметр электрода $(40-60)$ мм).
- частота вращения электрода $(50-70)$ об/мин $= 0,83 - 1,17$ об/с.

Основная функция при катодной области – обеспечение условий переноса заряженных частиц между катодом и столбом разряда. При этом в этой области имеет место скачок потенциала у поверхности катода и

происходит интенсивная генерация заряженных частиц. Подробно катодные процессы рассмотрены в работах [75-81].

Температура электронного газа в плазме дуги вблизи границы с прикатодной областью разряда для дуг, горящих в аргоне достигает 15000-25000К. Известно, что при катодная область разряда при давлениях больших 10^3 Па имеет протяженность менее 1 мм, исследование ее внутренней структуры затруднено. О сложности исследования катодных явлений свидетельствует существование трех теорий для их объяснения: теории термоэлектронной эмиссии, теории автоэлектронной эмиссии, в которых считается, что перенос зарядов осуществляется в основном электронами и теории ионного тока, в которой считается, что перенос осуществляется ионами. Первые две теории основываются на двух наиболее хорошо изученных механизмах освобождения электронов из металлов – под действием высоких температур и сильных электрических полей. Сторонники третьей теории считают, что одно из главных мест среди источников подводимой к катоду энергии должно отводиться положительным ионам, бомбардирующим катод со скоростями, приобретенными в области катодного падения [75-77]. В работе [76] рассмотрены подробно процессы взаимодействия плазмы с термоэмиссионными катодами.

Катодные процессы представляют собой цепь явлений связанных между собой: явления в самом катоде, на его поверхности, в прикатодной области и на границе с дугой. Для расчета тепловых и электрических полей в теле катода используются уравнения теплопроводности и Лапласа - для электрического потенциала. Установлено в работах [76-78], что в зоне контакта катода с дугой возможно существование расплавленной пленки с толщиной до десятых долей миллиметра.

Медный катод относится к типу “холодных” катодов. Так называют катоды из металлов, точка кипения которых ниже температуры, при которой можно рассчитывать на заметную термоэлектронную эмиссию (температура кипения меди - 2873°К, необходимая интенсивность эмиссии возможна при температурах катодов 3500 - 4000 °К) [76, 77]. Ток в дугах с «холодными» катодами через одно или много маленьких, быстро и беспорядочно перемещающихся, возникающих и исчезающих пятен на катоде. Плотность тока в пятнах достигает 10^4 - 10^7 А/см². Место нагрева на катоде нагревается до температуры испарения, но по соседству с пятном, в целом катод остается сравнительно холодным. При термоэлектронной эмиссии ионы, рожденные в катодном слое должны сообщать катоду энергию, необходимую для поддержания соответствующей температуры.

Тепловой поток к электроду из зоны дугового разряда в области

опорного пятна складывается из потока тепла, связанного с переносом заряженных частиц, теплового излучения из столба дуги, теплового потока за счет теплопроводности и тепла, выделяющегося при рекомбинации заряженных и атомарных частиц. Потеря энергии поверхностью катода происходит вследствие эмиссии электронов, излучения нагретой поверхностью, теплоотвода вглубь тела теплопроводностью, часть энергии уходит на испарение материала катода.

При теоретических исследованиях прикатодной области разряда часто используют двухслойную модель, включающая в себя слой объемного заряда и диффузионный слой. Для описания объемного разряда используют модель, предполагающую существование двух сортов заряженных частиц-электронов эмиссии и ионов прикатодной плазмы. Катодный слой выполняет свою функцию главным образом, тем, что ионы здесь рождаются в большом количестве и приобретают в поле кинетическую энергию, которую несут к катоду совместно с другими источниками: потенциальной энергии нейтрализации ионов, тепловому потоку из плазмы. Температура газа у поверхности катода совпадает с температурой металла и по крайней мере вдвое ниже, чем в столбе дуги. Для обеспечения необходимой скорости рождения в слое и создания сильного ионного тока имеет место не только термическая ионизация, но и нетермические механизмы сообщения энергии эмитированным электронам. Благодаря эффекту Шотки, у поверхности катода образуется сильное электрическое поле, которое уменьшает работу выхода и тем самым облегчает термоэлектронную эмиссию. Само поле возникает, как и катодное падение из-за повышенной скорости рождения ионов в слое и накоплению положительного пространственного заряда, вследствие различия в скоростях устранения электронов и ионов [77, 80].

Согласно существующим представлениям, вблизи катода образуется очень большой положительный пространственный заряд. Он обуславливает резкое падение поля и потенциала в тонком слое, протяженностью меньшей длины свободного пробега электронов и ионов. На этот бестолкновительный слой приходится большая часть падения катодного потенциала. Этот слой – основной источник ионов, отделен от положительного столба более протяженным промежуточным слоем, с гораздо более слабым полем, где происходит усиленная ионизация атомов электронами, которые приобрели в бестолкновительном слое энергию до потенциала ионизации. В этом слое выполняется условие квазинейтральности. Из второго слоя в первый движутся не только ионы, но и электроны, называемые «обратными». Приносимая на поверхность катода ионами и «обратными» электронами энергия затрачивается на ее нагрев до температуры, необходимой для

эмиссии. Процессы в прикатодной области существенно зависят от свойств поверхности и материала катода, его геометрии и условий охлаждения.

Плотности электронного и ионного тока в бестолчковом слое постоянны и равны

$$j_e = S \cdot j = en_e v_e, \quad j_i = (1 - S) \cdot j = en_i v_i. \quad (1)$$

где j_e, j_i - плотности электронного и ионного тока, S - доля электронного тока (у поверхности катода составляет $0,7 \div 0,9$), n_e, n_i - концентрации соответственно электронов и ионов, v_e, v_i - скорости электронов и ионов.

Энергии и скорости зарядов определяются проходимой ими разностью потенциалов:

$$v_e = (2eU/m)^{1/2}, \quad v_i = [2e(U_k - U)/M]^{1/2}, \quad (2)$$

где U_k - катодное падение потенциала.

Используя формулу Маккоуна [10], можно найти поле у катода

$$E_k^2 = \frac{16\pi j}{\sqrt{2e}} [(1 - S)\sqrt{M} - S\sqrt{m}] \sqrt{U_k}, \quad (3)$$

в которой можно пренебречь членом, учитывающим действие электронов, ввиду их малости и получить для расчетов выражение:

$$E_k = 5,7 \cdot 10^3 A^{1/4} (1 - S)^{1/2} U_k^{1/4} j^{1/2};$$

$$h = 4U_k / 3E_k, \quad (4)$$

где A - атомная масса иона; E_k - напряженность электрического поля у катода [В/см]; U_k - падение потенциала на катоде [В]; j - плотность тока [А/см²]; h - толщина рассматриваемого слоя.

Например, для дуги с холодным катодом, при параметрах: $j = 2 \cdot 10^4$ А/см²; $S = 0,8$; $U_k = 15$ В; $A = 28$ (азот), получаем -

$$E_k = 1,63 \cdot 10^6 \text{ [В/см]}; \quad h = 1,23 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

Снижение энергии связи и работы выхода по формуле Шоттки на:

$$e\Delta\phi = e^{3/2} E^{1/2} = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1,63 \cdot 10^6)^{1/2} = 0,48 \text{ эВ.}$$

Скорость термоэлектронной эмиссии в $\exp(e\Delta\phi / kT)$ возрастает при $T = 3000$ К до $\approx 4,7$ раза.

причем, следует заметить, что $E_k = 1,63 \cdot 10^6$ В/см близко по значению $E_k = 3 \cdot 10^6$ В/см, когда начинается непосредственное вырывание электронов полем.

Баланс энергии на катоде [6]

$$q_{\text{п}} = q_i - q_e + q_e^{\text{обп}} - q_{\text{изл1}} + q_{\text{изл2}}, \quad (5)$$

где $q_{\text{п}} = -\lambda \text{grad} T$ - поток тепла, отводимый теплопроводностью в катод, λ - коэффициент теплопроводности материала катода; $q_i = j(1 - S)(\beta U_k + U_i - \phi_{\text{эф}})$ - поток приносимый ионами на катод, β - коэффициент аккомодации ионов, U_i - потенциал ионизации атомов, $\phi_{\text{эф}} = \phi(eE)^{1/2}$ - работа выхода материала катода; $q_e = j_e^{\text{эм}} (\phi_{\text{эф}} + 2 kT_k / e)$ - поток, уносимый с поверхности катода электронами

эмиссии; $q_e^{обp} = (en/4)\alpha_e \langle v_e \rangle (2kT_e/e + \phi_{эф}) \exp(-eU_k/kT_e)$, α_e - вероятность поглощения электрона поверхностью, $\langle v_e \rangle = (8kT_e/\pi m_e)^{1/2}$; $q_{изл1}$ - лучистый поток с поверхности катода; $q_{изл2}$ - лучистый поток из плазмы на поверхность катода, обычно им пренебрегают при расчетах.

Температура в пятнах, по различным данным может достигать, например, на меди 2400-3300К. Размер катодных пятен $\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ см, скорости перемещения $10-10^2$ см/с, плотность тока в пятнах, согласно различным авторам, лежит в пределах $j=i/\pi r^2 \sim 10^4 - 10^7$ А/см², на меди до 10^8 А/см². Противоречивость данных объясняется крайней сложностью непосредственных измерений этих параметров. Катодные пятна подвергаются интенсивному испарению, удельная эрозия на пятнах меди может составлять $\sim 10^{-4}$ г/Кл, на ранних стадиях в единичных пятнах для меди существенно меньше $5 \cdot 10^{-7}$ г/Кл.

Медный катод имеет следующие характеристики:

- потенциал ионизации - 7,68 В; катодное падение 15-21 В;
- температура кипения – 3150 К; теплопроводность – 4,1 Вт/(см·К);
- пороговый ток пятна – 1,6 А; средний ток на пятно – 75-200 А;
- плотность тока - $10^4 - 10^8$ А/см²; удельная эрозия при токе 100-200 А - 10^{-4} г/Кл;
- умеренная летучесть- отношение работы выхода к энергии испарения =1,4;
- скорость струи $1,5 \cdot 10^4$ м/с.

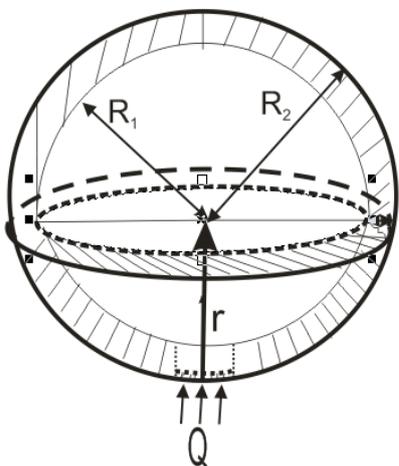
В работе Ли (1959г.) [77] приведены результаты, достаточно несложных расчетов, проведенных для катодов из меди, для исследования механизма эмиссии, которые не противоречат экспериментальным данным. Для поддержания термоэлектронной эмиссии необходимы высокие значения $j, E \sim 10^7 - 10^8$, при толщине бестолкновительного слоя порядка $\sim 10^{-8}$ см.

Следуя оценке, приведенной в работе [75] был выполнен расчет глубины проникновения температурного поля δ_t за время t , где $\delta_t = \sqrt{at}$, здесь a – коэффициент температуропроводности. Для меди $a = 112,4$ мм²/с, $t = 10^{-4}$ с получено $\delta_t = 0,3$ мм. Так же определено время, за которое поверхность медного электрода нагревается до температуры плавления. Оценка выполнена по формуле $t = 2\sqrt{3} \lambda^2 T_{пл}^2 / q^2 a$, где λ - коэффициент теплопроводности; q –интенсивность поверхностного источника тепла равняется $q = j\Delta U$, здесь j – плотность тока на поверхности электрода принимается равной $5 \cdot 10^4$ А/см², ΔU –вольтовой эквивалент теплового потока в пятне дуги принимается равным 15 В.

В результате получено, что время прогрева поверхности медного

электрода до $T_{пл}$ окажется порядка 10^{-5} с.

В данной работе выполнены расчеты теплового потока через опорное пятно дуги вращающегося катода, с целью определения ресурса его пригодности, т.к. эрозия электродов в значительной мере определяется тепловыми потоками через пятна дуги в тело электродов. Для решения



поставленной задачи рассматривается задача испарения и плавления металла катода в радиусе пятна дуги, расчетная схема показана на рис. 9.2. При этом следует отметить, что медь в качестве материала катода широко исследована экспериментально [75-78,85], что способствовало решению поставленной задачи.

Скорость расходования катодным пятном металла

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho v \delta h$$

Рис.9.2. Расчетная схема для медного пятна где $\rho - 8,3 \text{ г/см}^3$ – плотность при $T_{пл}$; $h -$ размер пятна $=10^{-2} \text{ см}$; $\delta = 0,3 \text{ мм}$ из предыдущего расчета; $v=10 \cdot 10^2 \text{ см/с}$, $\Delta t=1 \text{ с}$.

Подставляя значения получим

$$\Delta m = \rho v \delta h \Delta t = 8,3 [\text{г/см}^3] \cdot 10^2 [\text{см/с}] \cdot 0,03 [\text{см}] \cdot 10^{-2} [\text{см}] \cdot 1 [\text{с}] = 0,249 [\text{г}].$$

Выводы:

1. Медный полый катод относится к «холодным» катодам, и высокую температуру имеет только та часть поверхности, на которую опирается пятно дуги. Кроме того, скорость процесса распространения тела в телах зависит от отношения поверхности тел к их объему.

2. Известно, что чем меньше отношение поверхности тела к его объему, тем и скорость протекания процесса будет меньше. Известно, также, что для шара скорость охлаждения больше, чем для любого другого тела. Что позволяет уменьшить глубину термического воздействия.

3. Влияние нагрева теплотой дуги сказывается только в непосредственной близости от пятна в связи с высокой скоростью перемещения пятен, а также вращением электрода.

10. ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ

Упрочнение поверхностно-пластической деформацией (ППД), как основной отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), применяется для повышения усталостной прочности, износостойкости, контактной жесткости и некоторых других эксплуатационных свойств деталей машин [86, 87, 88, 90, 91, 94, 95, 96 и др.].

ППД применяется в основном путем обкатки шариковыми или роликовыми обкатчиками, выглаживанием алмазными или твердосплавными инденторами скольжения, или же стальными мерными выглаживающими протяжками (дорнирование отверстий), а также ударным воздействием металлической дроби (в основном для поверхностей неправильной формы).

Обкатыванием и выглаживанием в основном упрочняются поверхности вращения и плоскости, однако могут подвергаться этой обработке и более сложные поверхности, например, зубья зубчатых колес.

Обработка обкатыванием осуществляется свободно вращающимися от силы трения роликом или шариком при нажиме его на вращающуюся деталь (рис.10.1) или вращении раскатной головки в отверстии, а также при обкатывании плоскости. Обкатывание может осуществляться одним шариком или роликом (рис.10.1,а,б,в,г) двумя (рис.10.1,д) и тремя (рис.10.1,е). Во втором и третьем случае силы P давления роликов на деталь взаимно уравновешены, они не изгибают ее, что позволяет обкатывать не очень жесткие детали.

Обкатывание наружных поверхностей вращения производится на токарных станках. Обкатное устройства (роликовая или шариковая обкатная головка) устанавливается в резцедержателе, или взамен его. Отверстия раскатывают чаще всего мерными раскатными головками на сверлильных или расточных станках.

Плоские поверхности упрочняют торцовой обкатной головкой на фрезерных, а иногда и на строгальных станках (узкие длинные плоскости). Профиль рабочей поверхности ролика может быть трапецеидальный (рис.10.1,а) с шириной b цилиндрической части, цилиндрический с радиусом r при вершине (рис.10.1,б), конический (рис.10.1,в) и круговой (как у шарика) с переменными углами в плане для различных точек контакта (рис.10.1,з). Наклоном оси ролика на угол φ_1 (рис.10.1,б) можно изменять углы в плане его. Обкатывание обычно производится с продольной подачей (рис.10.1,а,б,в), а иногда без нее (рис.10.1,з).

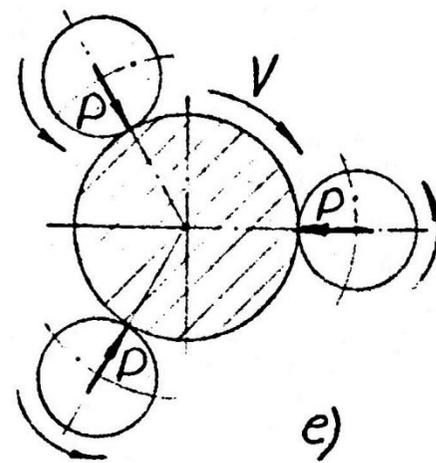
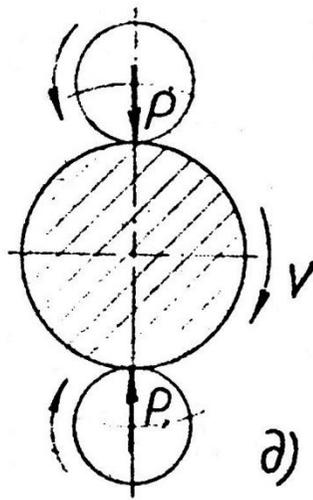
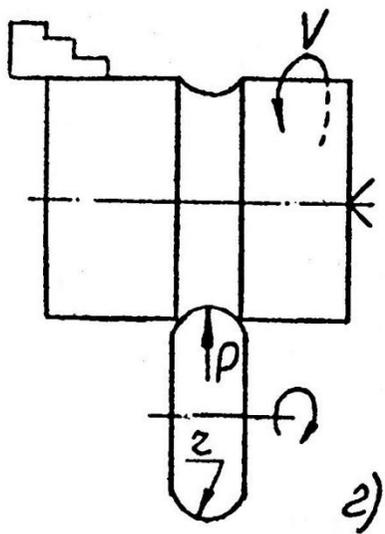
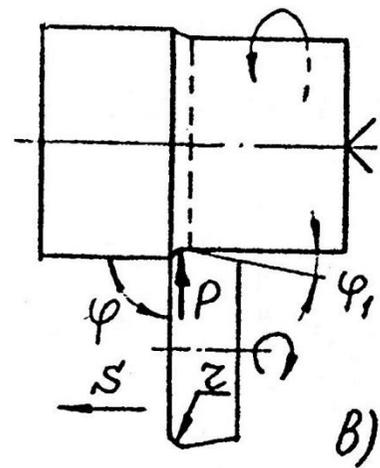
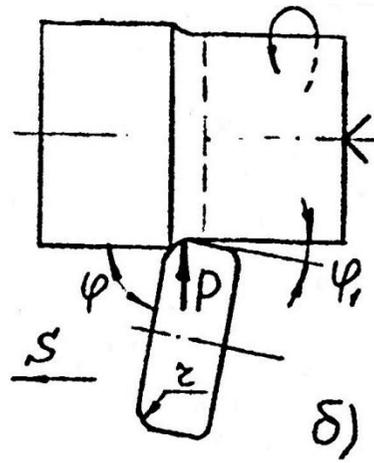
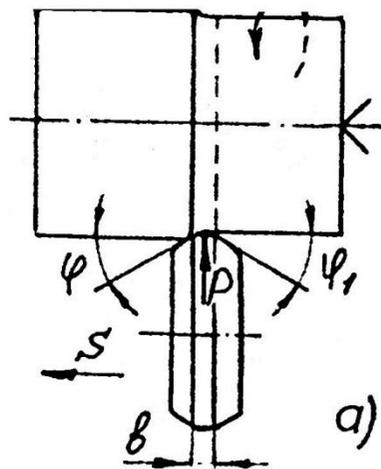


Рис. 10.1

При обкатывании поверхности ее неровности сглаживаются, выступы сминаются и заполняют впадины, ввиду чего диаметр наружной поверхности несколько уменьшается, а внутренней - увеличивается. Шероховатость поверхности при этом, как правило уменьшается, а поверхностный слой наклепывается, в нем возникают поверхностные остаточные напряжения сжатия, деталь упрочняется. Процесс упрочнения особенно эффективный при обкатывании участков поверхности, являющихся концентраторами напряжений (галтелей, канавок, выемок и т.п.), работающих в условиях знакопеременной нагрузки.

Шероховатость поверхности, глубина и степень наклепа, а также точность обкатанной поверхности зависят от режима обкатывания (усилие, подача, скорость число рабочих ходов), шероховатости и пластичности исходного поверхностного слоя (перед обкатыванием), шероховатости и твердости обкатного ролика, контура его рабочей поверхности, углов φ и φ_1 .

С увеличением силы деформирования шероховатость поверхности уменьшается (рис.10.2). При этом все большее относительное значение оказывает шероховатость поверхности инструмента, которая копируется, на обкатанной поверхности [94].

При достижении определенной величины силы обкатывания шероховатость поверхности перестает зависеть от параметров исходной шероховатости (рис.10.2,г). Однако если исходная поверхность имела большие неровности, то поверхностный слой после обкатки может не быть монолитным.

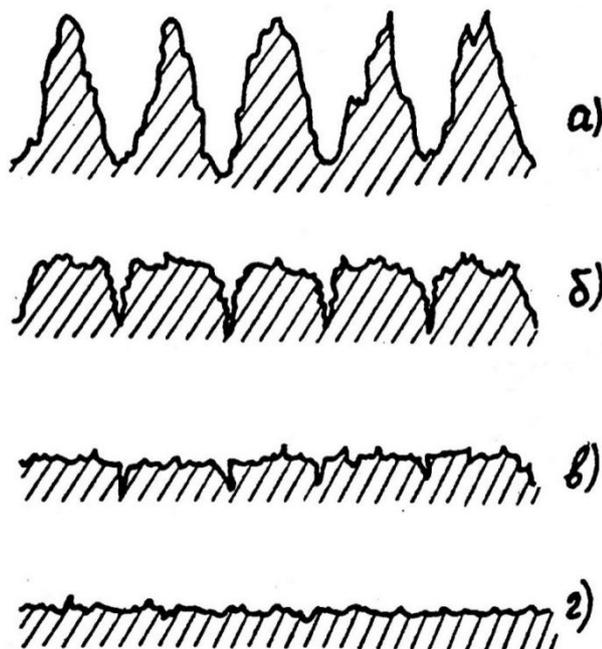


Рис. 10.2. Профилограммы изменения шероховатости строганной поверхности (а) с увеличением давления и числа рабочих ходов при обкатывании роликом с цилиндрическим пояском (б, в, г)

При перетекании выступов во впадины поверхность может стать неоднородной, аналогично получению состояния так называемой ложной приработки. Для повышения износостойкости трущихся поверхностей их перед обкатыванием целесообразно шлифовать.

С увеличением степени деформации металл упрочняется, при этом предел текучести растет быстрее предела прочности. У сильно наклепанных в холодном состоянии металлов обе эти характеристики прочности почти равны друг другу. При растяжении их происходит хрупкое разрушение с удлинением, равным нулю.

Твердость и предел прочности можно повышать в 1,5-3 раза обработкой давлением в холодном состоянии, а предел текучести в 3-7 раз. Металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее металлов ОЦК-решеткой. Сплавы с ГЦК-решеткой сильнее упрочняются т.е., у которых энергия дефектов упаковки минимальна (аустенитная сталь, алюминиевая бронза, никель). Алюминий наклепывается незначительно.

При пластической деформации поверхностного слоя закаленных сталей с мартенситно-аустенитной структурой происходит превращение значительной части остаточного аустенита в мартенсит, что дополнительно увеличивает твердость и прочность металла уменьшает его плотность и увеличивает остаточные поверхностные напряжения сжатия. При поверхностно-пластической обработке, как и при обработке металлов резанием выделяется теплота, в результате чего поверхностный слой металла испытывает не только силовое воздействие, но при этом он еще и нагревается.

Силовое воздействие осуществляет наклеп и упрочнение поверхностного слоя, а тепловое влияние приводит к противоположному эффекту, т.е. к разупрочнению (отдыху). В зависимости от того, каково из этих воздействий будет превалировать, получим упрочнение или разупрочнение поверхностного слоя. При ППД чаще силовое воздействие превосходит температурное. Тепловое влияние может иногда вызывать закалку поверхностного слоя, или же, наоборот, отпуск его. Наклеп понижает коррозионную стойкость поверхностного слоя, однако при определенном сочетании давления, скорости скольжения и температуры в тончайшем поверхностном слое, в результате сверхскоростной закалки может возникать отбеленная структура мартенсита особого рода, по своим свойствам приближающаяся к аморфному строению металла, имеющему высокие эксплуатационные свойства, в том числе и высокую коррозионную стойкость.

Исходная микроструктура влияет на эффективность упрочнения ППД. Твердость и предел выносливости наибольшее повышаются при упрочнении закаленной стали на мартенсит. Несколько меньший результат дает упрочнение ферритной (**сырой**) и полученной **закалкой** троститной структуры, а самый низкий, эффект показывает упрочнение сорбита.

Если учитывать влияние твердости указанных исходных структур на эффективность упрочнения, то зависимость получается экстремальная с большим результатом при самой высокой твердости (мартенсит) и самой малой (феррит), а наименьшим - при средних значениях твердости (сорбит).

Упрочнение металла при ППД осуществляется благодаря:

а) увеличению плотности и пересечения плоскостей скольжения дислокаций, затрудняющих движение последних, что повышает прочность и твердость металла, б) увеличению разориентировки фрагментов и блоков внутри зерен и дробления последних, что увеличивает площадь межзеренных границ, также являющихся препятствиями движению дислокаций, т.е. упрочняющих металл, в) увеличению объема металла поверхностного слоя, поскольку все выше названные дефекты кристаллической решетки увеличивают расстояния между атомами, что создает в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, нейтрализующие концентраторы напряжений и этим повышающие усталостную прочность деталей, г) превращению остаточного аустенита в мартенсит, что, во-первых увеличивает состав более прочной и твердой кристаллической структуры и во-вторых, увеличивает объем поверхностного слоя, повышая этим остаточные поверхностные напряжения сжатия.

Износостойкость трущейся поверхности зависит также от ее маслосъемности. Например, шабренная поверхность обладает хорошей маслосъемностью, так как на ней регулярна чередуются очень пологие выступы и впадины, в которых хорошо удерживается смазка, при довольно больших давлениях между сопрягаемыми трущимися деталями, так как контактная жесткость таких, поверхностей высокая. Однако процесс шабрения очень трудоемкий и при большой программе выпуска изделий экономически себя не оправдывает.

Маслосъемную поверхность с высокой контактной жесткостью можно получить вибрационным обкатыванием [86, 87]. Сущность его заключается в том, что в процессе обкатывания поверхности шариками (или круговыми роликами), во-первых, обкатная головка (или деталь) получает колебательное (вибрационное) движение K в направлении подачи, что создает волнообразное расположение выступов и впадин в направлении движения скорости V обкатывания (длина волны $t_{кр}$ и высота h) и, во-вторых, величина подачи подбирается такой, которая бы обеспечивала регулярное чередование дугообразных выступов и впадин в продольном направлении (длина волны $t_{пр}$ и высота R), т.е. в направлении подачи S (рис.10.3).

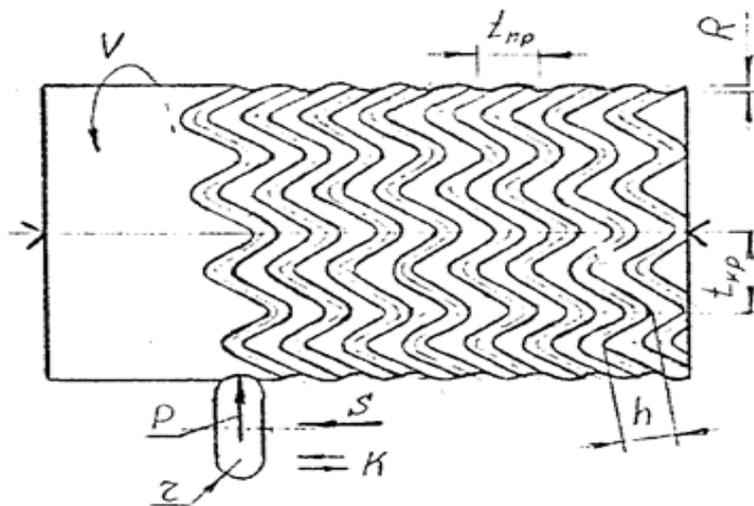


Рис.10.3. Схема виброткатывания цилиндрической поверхности

Различным сочетанием частоты и амплитуд колебательного движения K , подачи S и скорости V можно получать различные рисунки регулярно повторяющихся криволинейных выступов и впадин. А изменением силы P давления ролика, его радиуса r и подачи S можно регулировать профиль, высоту R и шаг t_{rp} выступов и впадин.

Электропластическая обработка (ЭПО) является разновидностью ОУО. Отличие ее от обработки методом ППД заключается в том, что через зону контакта ролика (или скользящего токопроводящего индентора) с деталью пропускается большой силы (до 500 ампер) электрический ток, напряжением 1,5-2 вольта. В результате этого зона контакта поверхности детали с роликом, как наименьшая по поперечному сечению проводника в электрической цепи, нагревается. Процесс ЭПО по своей физической сущности имеет сходство с высокотемпературной термопластической обработкой (ВТПО), когда пластическая деформация стали производится при температуре, которая выше рекристаллизационной. Особенностью ЭПО в сравнении с ВТПО является кратковременность нагрева, выдержки и обжата, более высокая скорость охлаждения, одновременное воздействие теплового и силового факторов, а также пластической деформации поверхностного слоя. При этом в поверхностном слое происходят фазово-структурные превращения с образованием светлого (белого) нетравящегося (или слабо травящегося) мартенсита особого рода (или так называемого бесструктурного мартенсита) с высокими эксплуатационными свойствами. После одного рабочего хода ЭПО слой бесструктурного светлого мартенсита *особого* рода располагается на круглой поверхности в виде спирали с шагом, зависящим от подачи на оборот. Это свидетельствует о том, что давление, наряду с температурным фактором, играет большую роль в создании указанного

нетравящегося слоя [85]. Для получения сплошного упрочненного слоя ЭПО следует производить в несколько рабочих ходов (2-3).

Если температура нагрева не достигает критических точек A_{c1} – A_{c3} , то пластическое деформирование производит измельчение перлитно-ферритной структуры, что также упрочняет поверхностный слой.

В результате термического и силового факторов, а также пластической деформации микротвердостью закаленных сталей 30ХГСА и 30Х2НВА после ЭПО повысилась до 900-980кгс/мм².

Высота неровностей при ЭПО более равномерная, чем при обычном обкатывании роликом, что объясняется лучшими условиями деформирования нагретого поверхностного слоя [85]. Увеличение подачи ролика вызывает повышение высоты неровностей. Возрастание давления ролика (диаметром 70 мм) уменьшает шероховатости, а при достижении 100 кгс изменение неровностей прекращается.

Зависимости влияния на шероховатость поверхности силы тока (а значит и температуры нагрева) и скорости обкатывания являются экстремальными с оптимальными значениями, соответствующими наименьшей высоте неровностей, 400 ампер и 50м/мин. ЭПО особенно эффективна как ОУО трудно обрабатываемых титановых сплавов, она может обеспечивать шероховатость до 9-10 классов с увеличением опорной поверхности до 80-90% и регулярно повторяющимися неровностями, имеющими большой радиус закругления при вершине [85].

Выводы:

1. Повышение силы тока оказывает наибольшее влияние на увеличение микротвердости. Повышение давления ролика на деталь увеличивает степень деформации, но при этом возрастает площадь контакта, что снижает плотность тока и температуру нагрева.

2. Нагрев каленой поверхности при ЭПО, во-первых способствует получению шероховатости ближе к оптимальной с более высокой несущей способностью, чем при обычном обкатывании и, во-вторых, создает условия для образования нетравящегося мартенсита особого рода.

11. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБОТАННОЙ БЫСТРОРЕЖУЩИМИ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ

Представлены научные основы и физические закономерности повышения качества отверстий обработанных стандартными быстрорежущими спиральными сверлами.

Известно, что более 60% деталей машин и механизмов имеют отверстия. Статистика показывает, что около 20% станочного парка машиностроительной и других отраслей промышленности составляют сверлильные станки, без учета выполнения операции сверления на станках типа токарных, револьверных, агрегатных и др. Сверление – единственный способ получения отверстий резанием, поэтому сверла являются одним из наиболее часто применяемых режущих инструментов. На промышленных предприятиях быстрорежущие спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8% от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес (около 30%) занимают быстрорежущие спиральные сверла.

Сверление единственный вид обработки резанием, позволяющий получить отверстие в сплошном материале. Согласно рекомендациям справочника технолога - машиностроителя [97] сверлением можно получить отверстие 13-9 качества точности и шероховатости $R_a = 25 - 0,8$ мкм. Поэтому при необходимости получения отверстий более высокого качества, после сверления следуют другие виды обработки (зенкерование, развертывание, протягивание, растачивание и др.). В настоящее время, по сравнению с советским периодом, только стоимость осевых металлорежущих инструментов возросла более чем в сто раз, не говоря об электроэнергии и т.д., что определяет большие затраты на обработку точных отверстий при необходимости зенкерования и двукратного развертывания [97]. Снизить затраты можно посредством повышения качества обработки сверлением, например зенкерование повышает точность обработки до 8 качества и шероховатость до $R_a = 0,4$ мкм, точное развертывание - до 7 качества при той же шероховатости [97]. А это значит, повышение качества обработки сверлением до 7 качества точности и шероховатости до $R_a = 0,4$ мкм позволит убрать два вида обработки, например, сразу после сверления выполнять тонкое развертывание и тем самым значительно снизить затраты на обработку отверстия.

Рекомендуемые справочникам [98] скорости резания при сверлении лежат в пределах $V = 16 - 55$ м/мин в зависимости от подачи и диаметра

сверла. Это диапазон скоростей резания активного наростообразования [99]. Нарост непостоянен по форме и величине. Отделившиеся частицы нароста внедряются в обработанную поверхность, что не позволяет получить высокое качество поверхности отверстий. Нарост отсутствует при скоростях резания больших $V > 80$ м/мин [99], но применение скоростей резания $V > 80$ м/мин, по примеру токарной обработки, при обработке быстрорежущим инструментом из которого изготавливаются стандартные спиральные сверла невозможно из-за низкой теплостойкости быстрорежущих сталей.

В работе [95] приведен график зависимости разбивки обрабатываемых отверстий от скорости резания, который показывает, что с увеличением скорости резания разбивка обрабатываемых отверстий значительно возрастает, а это значит, что с увеличением скорости резания точность обработки сверлением будет соответственно ухудшаться.

Из выше представленного следует, что повышение скорости резания, например при применении твердосплавных сверл, не приведет к повышению качества отверстий из-за снижения их точности.

Однако обработка отверстий после сверления протягиванием позволяет получить 6 квалитет точности и шероховатость $R_a = 0,2$ мкм [97]. Скорость резания, применяемая при протягивании равна $V = 3 - 6$ м/мин. Известно, что при низких скоростях резания нарост отсутствует [99], и как видно из рис. 11.1 разбивка отверстий минимальная. Таким образом, при сверлении в диапазоне скоростей резания $V = 3 - 6$ м/мин можно ожидать повышение качества обработки сверлением и в отношении точности отверстий и в отношении шероховатости поверхности.

В работе [97] приведена зависимость временной наработки до функционального отказа спиральных сверл, диаметром $d = 10,2$ мм от скорости резания (рис.11.1, а). Отмечено, что такая зависимость при обработке углеродистых конструкционных сталей получена впервые, так как общепринято при проведении экспериментальных исследований строить зависимости периода стойкости от скорости резания при достижении определенной величины износа задней поверхности.

Такой подход к оценке стойкости является оправданным и подтверждается практикой, когда стойкость инструмента зависит только от износа задней поверхности. Однако для инструмента сложной конструкции, каким является спиральное сверло, имеющее несколько конструктивных элементов, износ каждого из них при определенной скорости резания может быть причиной потери работоспособности инструмента. В этом случае прекращение испытаний при достижении принятой величины износа задней поверхности не будет характеризовать реальную стойкость инструмента, так

как конструктивный элемент, износ которого оказывает преобладающее влияние на стойкость, не контролировался. Этого можно избежать при испытании до функционального отказа с фиксацией состояния каждого из конструктивных элементов. Метод испытаний до функционального отказа позволяет определить не только реальную стойкость инструмента, но и конструктивный элемент, износ которого преобладает в потере его работоспособности при варьировании определенными параметрами или факторами (например, скоростью резания). Иллюстрируют сказанное результаты лабораторных исследований, представленные на рис. 11.1.

T, час L, час, м

M, Н·м P_o, Н

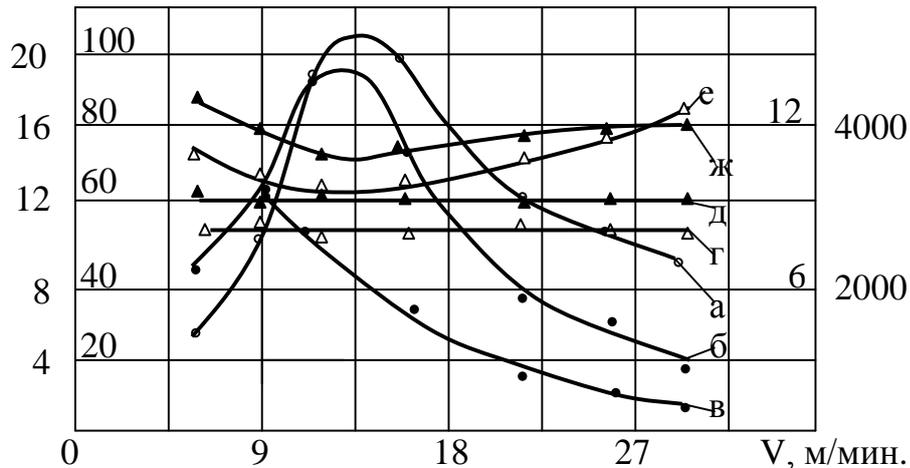


Рис. 11.1. Влияние скорости резания на характеристики процесса сверления быстрорежущими спиральными сверлами диаметром $d = 10,2$ мм, где а) – наработка до функционального отказа в метрах, б) – наработка до функционального отказа в часах, в) – период стойкости в часах, г) – осевая сила острых сверл, д) – момент резания острых сверл, е) – осевая сила изношенных сверл, ж) – момент резания изношенных сверл.

Из рис. 11.1 видно, что в диапазоне низких и средних скоростей резания ($V = 9 - 18$ м/мин) график зависимости наработки до функционального отказа от скорости резания (рис. 11.1, а) существенно отличается от графика зависимости периода стойкости от скорости резания (рис. 11.1, в) [97], а это значит, что при работе со скоростями резания $V = 9 - 18$ м/мин износ задних поверхностей не является преобладающим в потере работоспособности спиральных сверл.

Наработка до отказа может быть выражена временем резания или общей длиной просверленных отверстий. В обоих случаях графики зависимостей наработки до функционального отказа от скорости резания имеют явно выраженный экстремальный характер с точкой максимума, в диапазоне скоростей резания $V = 12 - 16$ м/мин (рис. 11.1).

В существующих литературных источниках зависимости наработки до

функционального отказа спиральных сверл от скорости резания практически не описаны и анализ причин и факторов, приводящих к их экстремальному характеру, отсутствует. Исходя из этого, возникла необходимость определить основные причины и сопутствующие им факторы, приводящие к экстремальному характеру зависимостей наработки до функционального отказа от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл при обработке углеродистых конструкционных сталей. Для чего проведены лабораторные исследования со сверлами диаметром $d = 10,2$ мм по ГОСТ 10903-77, изготовленными из стали Р6М5. Сверлились сквозные отверстия глубиной $3d$ в стали 45 (НВ190) при скоростях резания $V = 6; 9; 12; 16; 21; 26; 30$ м/мин и подаче $S_0 = 0,23$ мм/об, СОЖ – 5 % раствор эмульсола Укринол 1. Износ конструктивных элементов сверл контролировался через каждые 50 – 100 отверстий. Измерялись: износ задних поверхностей h_3 , износ перемычки $h_{\text{П}}$, износ ленточек $K_{\text{Л}}$, износ уголков Δd . Износ ленточек приводил к образованию прямой конусности и оценивался линейной величиной измеряемой вдоль оси сверла от уголков до точки перегиба – перехода прямой конусности в обратную. Износ уголков оценивался величиной уменьшения диаметра сверла у уголков: $\Delta d = d - d_{\text{и}}$, где $d_{\text{и}}$ – диаметр изношенного сверла. Ленточки, помимо направляющих, выполняют функции вспомогательных задних поверхностей на участках примерно равных половине осевой подачи, уголки по аналогии с резцом являются вершинами зубьев сверл. Но в отличие от резца у спирального сверла вспомогательный задний угол равен нулю, поэтому уголок с поверхностью резания имеет не точечный контакт, как вершина резца, а линейный по линии пересечения задней поверхности с поверхностью ленточки. Таким образом, у спирального сверла вершина зуба является не точкой, а дугообразной линией, примыкающей к поверхности резания и находящейся с ней в постоянном контакте в процессе обработки. Все это значительно ухудшает условия работы уголков и ленточек сверл и способствует их интенсивному износу.

В работе [98] показано, что в результате износа перемычки на оси сверла постепенно образуется конус, в основании которого формируется канавка. После того, как такая форма перемычки образовалась, дальнейшее ее формоизменение существенно не происходит вплоть до отказа сверла. Таким образом, износ перемычки не влияет на потерю работоспособности сверл не зависимо от скорости резания.

На рис. 11.1 приведено влияние скорости резания на динамические характеристики процесса сверления. Из рисунка видно, что при сверлении острыми сверлами графики зависимостей осевой силы и момента резания от скорости резания имеют линейный вид и параллельны оси абсцисс, т.е.

влияние скорости резания практически отсутствует (рис. 11.1, г, д). По мере нарастания износа сверл вид данных графиков меняется, на них появляется область минимума, диапазон скоростей резания которой совпадает с диапазоном скоростей резания экстремума стойкостных зависимостей (рис. 11.1, е, ж) [98].

Минимальные осевые силы при работе сверл с износом конструктивных элементов являются результатом наличия нароста на лезвиях сверл, который увеличивает передний угол γ и тем самым уменьшает все составляющие силы резания. При работе изношенными сверлами со скоростями резания $V = 12 - 16$ м/мин имел место хорошо развитый нарост (рис. 11.2), который в таком виде не наблюдался при работе сверл, как с меньшими, так и с большими скоростями резания. При работе острыми сверлами нарост отсутствовал [99, что подтверждается линейным характером динамических зависимостей. Экспериментально установлено, что нарост имеет максимальную высоту при такой скорости резания, при которой температура резания имеет значение $\theta \approx 300^\circ\text{C}$ [5].

В работе [101] показано, что при сверлении быстрорежущими сверлами диаметром $d = 9,8$ мм стали 45 (HB180) со скоростью $V = 16$ м/мин, температура резания составляет $\theta \approx 300^\circ\text{C}$. Нарост, являясь режущим клином, защищает главные режущие кромки от разрушения в результате износа, поэтому они оставались работоспособными при ширине фаски износа задних поверхностей $h_3 = 1,3$ мм (табл. 11.1).



Рис. 11.2. Срез зуба сверла перпендикулярно главной режущей кромке,
 $V = 16$ м/мин

Сохранение работоспособности главных режущих кромок при такой величине износа задних поверхностей является только результатом воздействия нароста, который увеличивает задний угол α и тем самым

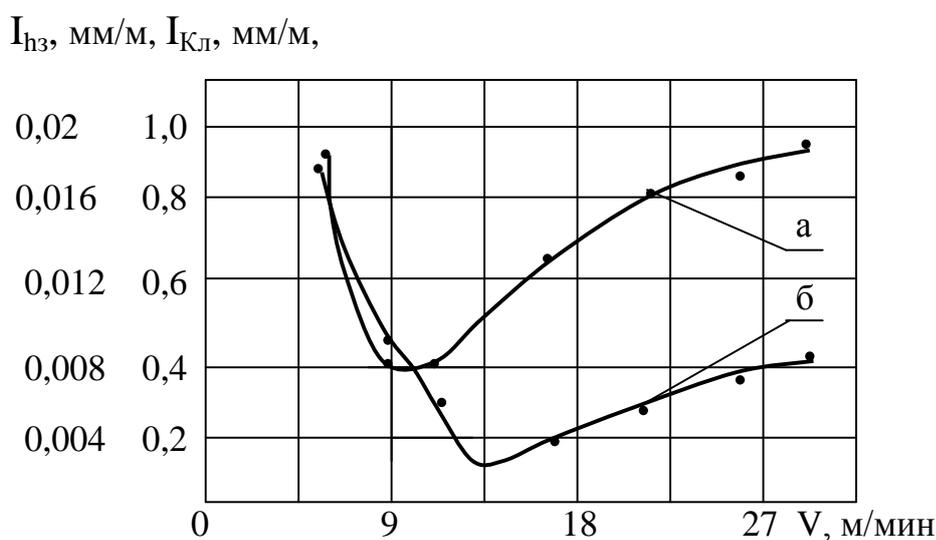
уменьшает площадь контакта изношенных участков задних поверхностей с поверхностью резания.

Таблица 11.1

Величина износа при отказе сверл диаметром $d = 10,2$ мм

V м/мин	6	9	12	16	21	26	30
h_3 , мм	0,43	0,5	1,0	1,3	0,9	0,9	0,8
K_L , мм	17	19	20	16	13	12	11

На рис. 11.3. представлены графики зависимостей интенсивности износа задних поверхностей и ленточек сверл диаметром $d = 10,2$ мм от скорости резания, полученные в результате лабораторных исследований. Из представленного рисунка видно, что интенсивность износа задних поверхностей имеет значительную величину при скорости резания $V = 6$ м/мин, что можно объяснить абразивным воздействием твердых микрокомпонентов обрабатываемого материала, таких как цементит и сложные карбиды, твердость которых соизмерима с твердостью быстрорежущей стали. С увеличением температуры резания абразивное воздействие обрабатываемого материала снижается. При скорости резания V



$V = 9$ м/мин интенсивность износа задних поверхностей минимальная.

Рис. 11.3. Зависимости интенсивности износа от скорости резания, где а) зависимость интенсивности износа задних поверхностей $I_{H3} = f(V)$, б) зависимость интенсивности износа ленточек $I_{KL} = f(V)$

При дальнейшем увеличении скорости резания и температуры в пределах $\theta \approx 300^\circ\text{C}$, возникают наиболее благоприятные условия для наростообразования. Но нарост не постояен по форме и высоте. Отделившиеся частицы нароста царапают задние поверхности инструмента. По этой причине интенсивность износа задних поверхностей сверл резко

возрастает с увеличением скорости резания (рис. 11.3, а), что противоречит столь же резкому увеличению наработки до функционального отказа сверл (рис. 11.1, а, б левые ветви). При работе со скоростями резания $V = 21 - 30$ м/мин в результате дальнейшего увеличения температуры резания высота нароста уменьшается, а затем он полностью исчезает, вместе с тем увеличение температуры резания приводит к потере режущих свойств инструментального материала и, соответственно, к увеличению интенсивности износа задних поверхностей (рис. 11.3, а). В этом диапазоне скоростей резания сверла теряют работоспособность по причине износа задних поверхностей, что приводит к резкому повышению температуры резания. Непосредственно перед отказом появляются цвета побежалости на стружке. Сверла выходят из строя в результате разупрочнения деформирования и интенсивного схватывания обрабатываемого материала с изношенной задней поверхностью [98].

Вид износа ленточек и уголков сверл представлен на рис. 11.4. Как было отмечено выше, уголок находится в постоянном контакте с поверхностью резания. Износ уголка приводит к образованию уступа по линии соединения задней поверхности с поверхностью ленточки (рис. 11.4, 2), что приводит к уменьшению диаметра сверла. На ленточках, в результате износа образуется два участка с прямой конусностью. Первый с большим углом на участке вспомогательной задней поверхности (рис. 11.4, 3) второй, с меньшим углом, но значительно большей величины (табл. 11.1) на участке ленточки выполняющем направляющую функцию (рис. 11.4, 4). Работоспособность сверл зависит от величины второго участка износа ленточек.

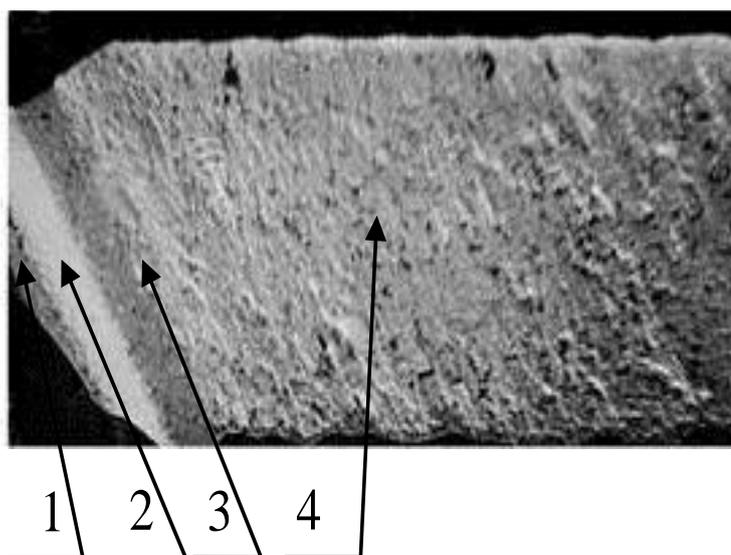


Рис. 11.4. Вид износа конструктивных элементов при отказе сверл $V = 12$ м/мин, где 1 – износ задней поверхности, 2 - износ уголка, 3 – износ

вспомогательной задней поверхности, 4 – износ ленточки

Высокую интенсивность износа ленточек при работе низкими скоростями резания можно объяснить абразивным воздействием твердых микрокомпонентов обрабатываемого материала, малой величиной разбивки обрабатываемых отверстий и высокой интенсивностью уменьшения разбивки в процессе износа сверл (рис. 11.5). С увеличением скорости резания разбивка возрастает, а интенсивность уменьшения разбивки падает, что уменьшает степень контакта направляющей части ленточек с обработанной поверхностью, а значит и интенсивность их износа (рис. 11.3). Минимальная интенсивность износа ленточек (рис. 11.3, б) совпадает с максимальной наработкой до функционального отказа сверл (рис. 11.1).

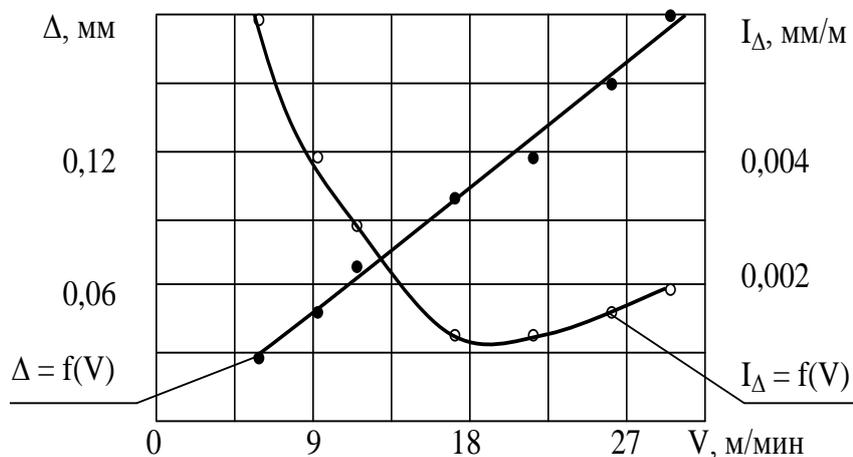


Рис. 11.5. Влияние скорости резания на разбивку обрабатываемых отверстий Δ острыми сверлами, и на интенсивность уменьшения разбивки I_{Δ} в процессе износа сверл

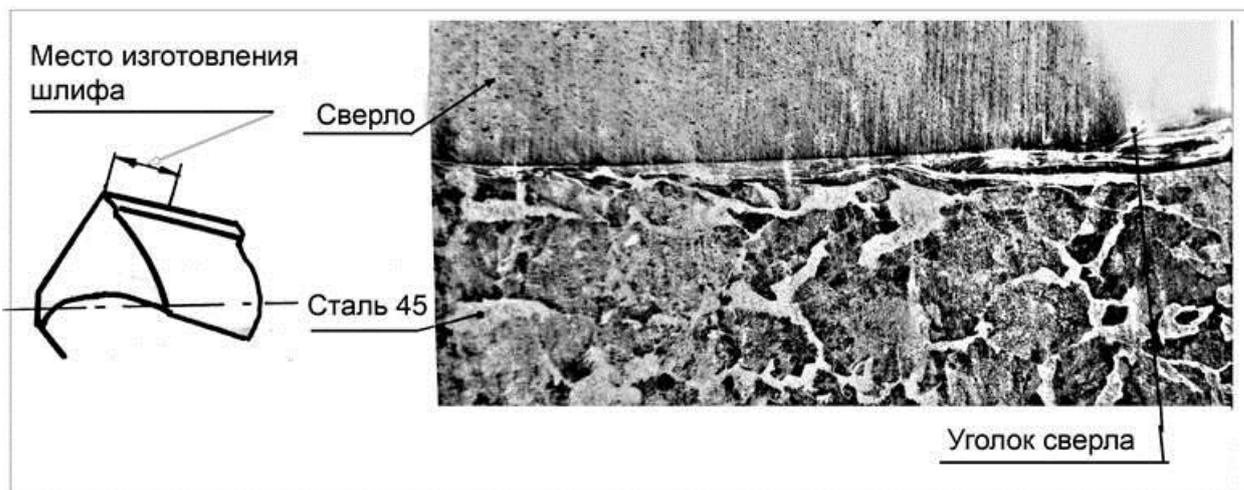


Рис. 11.6. Контакт изношенного участка ленточки в момент разрушения сверла при $V = 9$ м/мин

В работе [98] показано, что при скоростях резания $V \leq 16$ м/мин разбивка имеет положительные значения приблизительно в пределах 1/3 от наработки до отказа инструмента. Далее разбивка становится отрицательной, то есть изношенные участки ленточек находятся в сплошном контакте с поверхностью обрабатываемого отверстия. В этот момент появляется “скрип”. При работе со скоростями резания $V = 6 - 9$ м/мин “скрип” сопровождает работу сверл вплоть до поломки, которая происходит в результате защемления изношенных участков ленточек в обрабатываемом отверстии (рис. 11.6). Непосредственно перед поломкой возникают характерные “щелчки”, являющиеся результатом защемления и появляются налипы обрабатываемого материала на изношенных участках ленточек.

Увеличение скорости резания и износа сверл сопровождается ростом температуры резания. Это приводит к размягчению обрабатываемого материала и облегчению относительного скольжения изношенных участков ленточек по обработанной поверхности. При работе со скоростями резания $V = 12 - 16$ м/мин, соответствующих области экстремума стойкостных зависимостей, “скрип” появляется на стадии перехода положительной разбивки в отрицательную, но в дальнейшем прекращается, сверла «переживают» “скрип”. В этом диапазоне скоростей резания интенсивность износа ленточек минимальная (рис. 11.3, б), а величина износа ленточек максимальная (табл. 11.1), налипы обрабатываемого материала на изношенных участках ленточек не наблюдаются, как и характерные для меньших скоростей резания “щелчки”.

При дальнейшем увеличении скорости резания интенсивность износа ленточек растет (рис. 11.3, б), вследствие увеличения температуры резания, сопровождающейся уменьшением твердости и прочности быстрорежущей стали. Однако, большая величина разбивки отверстия и небольшая интенсивность ее уменьшения (рис. 11.5) исключает защемление изношенных участков ленточек в обрабатываемом отверстии.

На основании вышеизложенного можно предположить, примерно равноценное влияние износов задних поверхностей и ленточек на потерю работоспособности сверл в диапазоне скоростей резания, соответствующих области экстремума стойкостных зависимостей. Вполне вероятно, что потеря работоспособности сверл в этом диапазоне скоростей резания происходит по причине износа уголков.

Основным признаком потери работоспособности сверл при работе со скоростями резания $V = 12 - 16$ м/мин, являются значительные заусенцы на выходной стороне отверстия, которые отсутствуют при работе сверл с

другими скоростями резания [102]. Причиной появления заусенцев может быть только потеря режущих свойств уголков. Они не срезают определенный слой металла, а выдавливают его наружу, при этом немаловажную роль играет возрастание температуры резания, которая размягчает обрабатываемый материал.

На основании вышеизложенного можно выделить две основные причины и сопутствующие им факторы, приводящие к экстремальному характеру стойкостных зависимостей. Первой причиной является закономерность влияния скорости резания на интенсивность износа ленточек и наработку до функционального отказа сверл в диапазоне скоростей резания $V = 6 - 16$ м/мин. Этот диапазон можно разделить на два участка:

первый - участок скоростей резания $V = 6 - 9$ м/мин, где интенсивность износа ленточек сверл высокая, а наработка до функционального отказа относительно низкая. Сверла выходят из строя в результате защемления изношенных участков ленточек в обрабатываемом отверстии, и превалирующим в потере работоспособности сверл является износ ленточек; второй – участок скоростей резания $V = 12 - 16$ м/мин, где интенсивность износа ленточек минимальная, а наработка до функционального отказа сверл максимальная. На этом участке скоростей резания принять однозначный вывод о превалирующем влиянии износа ленточек на потерю работоспособности спиральных сверл не представляется возможным.

Второй причиной является закономерность влияния скорости резания на работоспособность задних поверхностей и наработку до функционального отказа сверл в диапазоне скоростей резания $V = 12 - 30$ м/мин. Этот диапазон также можно разделить на два участка: первый – участок скоростей резания $V = 12 - 16$ м/мин, где наблюдается активное наростообразование в результате чего главные режущие кромки сохраняют режущие свойства при большой величине износа задних поверхностей вплоть до потери работоспособности сверл. На этом участке скоростей резания принять однозначный вывод о превалирующем влиянии износа задних поверхностей на потерю работоспособности сверл не представляется возможным;

второй - участок скоростей резания $V = 21 - 30$ м/мин, где наработка до функционального отказа относительно небольшая, а превалирующим в потере работоспособности сверл является износ задних поверхностей. Сверла выходят из строя по причине разупрочнения и полной потери режущих свойств главных режущих кромок в результате резкого возрастания температуры резания.

Таким образом, общим для обоих случаев является участок скоростей резания $V = 12 - 16$ м/мин, где интенсивность износа ленточек минимальная,

а главные режущие кромки защищает от разрушения нарост. Эти конструктивные элементы продолжают выполнять свои функции вплоть до потери работоспособности инструмента. Потеря работоспособности сверл в этом диапазоне скоростей резания происходит по причине износа уголков. Максимальная работоспособность ленточек и задних поверхностей обуславливает максимальную стойкость спиральных сверл, а значит и экстремальный характер зависимостей наработки до функционального отказа от скорости резания.

В настоящее время сверление является предварительным, черновым, переходом операции обработки отверстий, за которым, при необходимости, следуют зенкерование и развертывание, или растачивание. Такое использование спиральных сверл обусловлено их эксплуатацией в диапазоне скоростей резания активного наростообразования, а нарост, как известно, отрицательно влияет на качество обработки. В тоже время нарост оказывает существенное влияние на процесс резания. Он увеличивает передний угол резца, что облегчает процесс резания и защищает режущую кромку от истирающего действия со стороны стружки и со стороны поверхности резания, а также защищает ее от воздействия температуры резания, что благоприятно сказывается на стойкости инструмента [97]. Поэтому представляется целесообразным для повышения стойкости сверл в тех случаях, когда сверление не лимитирует производительность обработки, использовать скорости резания, при которых нарост имеет максимальную величину.

В работе [97] показано, что при точении максимальную высоту нарост имеет при скоростях резания 15–30 м/мин. В частности отмечено, что при наиболее распространенных условиях резания углеродистых конструкционных сталей нарост имеет максимальную высоту при такой скорости резания, когда температура в зоне резания близка к 300°C и исчезает при такой скорости резания, когда температура в зоне резания превышает 600°C. Однако процесс сверления, геометрия и конструкция спиральных сверл имеют свои особенности, присущие только этому виду инструмента [98], поэтому следует ожидать, что характеристики наростообразования при сверлении будут существенно отличаться от обработки резцами.

Для проверки этого предположения были поставлены и проведены экспериментальные исследования сотрудниками кафедры «Технология машиностроения» КГТУ им. И. Раззакова.

Выводы:

1. Повышение качества обработки сверлением посредством увеличения скорости резания, по примеру обработки точением, не представляется возможным из-за низкой теплостойкости быстрорежущих сталей и увеличения разбивки отверстий.

2. Представляется возможным проведение исследований, направленных на повышение качества обработки сверлением с применением низких скоростей резания $V = 3 - 6$ м/мин, по примеру обработки протягиванием, где следует ожидать повышение качества обработки сверлением и в отношении точности отверстий и в отношении шероховатости поверхности

3. Стойкость спиральных сверл зависит от работоспособности трех конструктивных элементов: задних поверхностей, ленточек и уголков. Больше влияние на стойкость в зависимости от скорости резания оказывают износ задних поверхностей и износ ленточек.

4. Работоспособность ленточек зависит от интенсивности их износа, величины разбивки обрабатываемого отверстия и абразивных свойств обрабатываемого материала.

5. Работоспособность задних поверхностей в основном зависит от температуры резания. В диапазоне скоростей резания активного наростообразования интенсивность износа задних поверхностей не является определяющим фактором потери их работоспособности.

6. Условием максимальной стойкости спиральных сверл (точка перегиба стойкостной зависимости) является равноценное влияние износов задних поверхностей и ленточек на потерю работоспособности сверл. При этом интенсивность износа задних поверхностей не определяет максимальную стойкость спиральных сверл, тогда как минимальная интенсивность износа ленточек является обязательным условием экстремума стойкостной зависимости.

12. ТЕХНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МАРКИ 6082Т6 (AL-MG-SI)

Сделан обзор технологии и особенностей сварки алюминия и его сплавов. Проведены сварочные работы по новейшему методу сварки СМТ. Показаны результаты работ на примере алюминиевых сплавов (Al-Mg-Si) марки 6082Т6 в среде с двумя разными сварочными газами и разными сварочными проволоками.

Самый распространённый в земной коре металл это алюминий. Алюминий-лёгкий парамагнитный металл серебристо-белого цвета, легко поддающийся формовке, литью, механической обработке [116]. Также этот материал обладает стойкостью от коррозии за счет быстрого образования прочных оксидных пленок, защищающих поверхность от дальнейшего взаимодействия. В связи с этим, область использования алюминия расширяется. Он широко применяется в самолетостроении, в машиностроении, в изготовлении ювелирных изделий, столовых приборов, в пищевой промышленности, военной промышленности и т.д. Алюминий имеет высокую теплопроводность (примерно в 5 раз выше, чем у рядовых сталей), поэтому тепло от места сварки интенсивно отводится в свариваемые детали [117]. В основном при сварке алюминия сварщик встречается с такими трудностями как: кристаллизационные (горячие) трещины, непровар, поры. В источнике [118] представлено вероятности появления дефектов:

- Технология сварки и квалификация сварщика
- Присадочный материал и свариваемый материал
- Подготовка поверхности под сварку и защитный газ
- Режимы и применение сварочного оборудование

1. Технология сварки и квалификация сварщика. Хотелось бы отметить все четыре отмеченные вероятности появления дефектов при сварке алюминиевых сплавов играют очень важную роль. К примеру, при выборе технологии сварки, сварщик обращает внимания на основной материал, на его свойства, на толщину свариваемого материала. Очень важно квалификация сварщика, так как сварщик не изучив материал и методики сварки он может привести отбраковку множество свариваемых листов или изделий. А это нежелательно для производства. Поэтому при начале любой специалист в области сварки должен работать с более опытными сварщиками. Пройти и посмотреть процесс сварки, изучить свойство материалов который он будет сваривать. Так как, если он теоретически не будет подготовлен, на практике он не может отличит технологию сварки

алюминия и стали.

2. Присадочный материал и свариваемый материал. В начале работы определяется основной сварочный материал, после присадочный материал. Присадочный материал выбирается исходя из химических свойств основного материала. В основном выбираются схожие по химическим составам материалы. Так как, при соединении легче будут происходить кристаллизационные процессы. При выборе нужно обращать внимание, чтобы расходный материал и основной металл имели примерно одинаковую температуру плавления. Из-за дополнительных элементов в составе сплава значения могут достигнуть критических значений, так что шов либо не сможет создать нормальное крепкое соединение, либо же основной металл переплавится, а проволока так и не достигнет нужного состояния для сваривания [121]. Также при выборе присадочного металла следует учитывать возможность появления в структуре металла швов различных химических соединений. При сварке сплавов алюминия, содержащих магний, с применением присадочной проволоки, содержащей кремний, в металле швов и особенно в зоне сплавления появляются иглообразные выделения Mg_2Si , снижающие пластические свойства сварных соединений. Неблагоприятно влияют на свойства соединений из сплавов системы $Al-Mg$ ничтожно малые добавки натрия, которые могут попадать в металл шва через флюсы [122].

3. Подготовка поверхности под сварку и защитный газ. Поверхность алюминия покрывается оксидной пленкой (Al_2O_3), плавящаяся при температуре свыше $2060^\circ C$, а алюминий плавится при $600^\circ C$, что создает проблему при сварке. Чтобы устранить эту проблему, перед сваркой поверхность алюминия необходимо подвергать предварительной обработке [123]. В наших работах мы провели следующие виды работ:

- Обезжиривание растворителем (спиртом)
- Химическая обработка по следующему режиму:
- обезжиривание в 10%-ном водном растворе едкого натра ($NaOH$) при температуре $60-65^\circ C$ в течение 2 минут
- промывка в тепловой воде (не ниже температуры $45^\circ C$), а затем в холодной проточной воде
- сушка при температуре $60^\circ C$ до окончательного удаления влаги

Защитные газы влияют на режим переноса металла, свойства и геометрию сварочного шва, задымленность и многие другие характеристики сварочного шва. Правильный выбор защитного газа для процессов дуговой сварки металла, таких как аргонодуговая *TIG* сварка и полуавтоматическая сварка *MIG MAG* могут резко повысить скорость, качество сварки и глубину

проплавления [124]. В нашей работе мы применяли чистый аргон и аргон с гелием. Аргон и гелий не растворяются в металле сварочной ванны и не образуют химических соединений с элементами, входящими в его состав. Для защиты зоны сварки применяется преимущественно аргон и реже гелий. Аргон обеспечивает высокоэффективную защиту расплавленного металла и хорошее формирование шва. Характеристики дуги в аргоне и гелии различны. Для соединения цветных металлов и специальных сплавов наиболее эффективна аргоногелиевая сварка. Соотношение между аргоном и гелием в смеси может быть различным. Так, при сварке в смеси 65 % аргона и 35 % гелия обеспечивается глубокое проплавление основного металла, хорошее формирование шва и снижение разбрызгивания.

4. Режимы и применение сварочного оборудования. Один из значительных пунктов получения высококачественного соединения алюминия и его сплавов является правильный выбор режимов и сварочного оборудования. Цифровая техника сварочных оборудований намного облегчило сварку металлов. На данный момент много производители сварочных оборудований предлагают большой выбор сварочных оборудований. Главный вопрос именно какое оборудование нужно приобрести чтобы он отвечал качеством и количеством. В данной работе будет описываться методика *СМТ* (холодный перенос металла) компании Фрониус. Фрониус один из производителей сварочных оборудований, который пользуется большим спросом по всему миру. История компании началось в 1945 году. Компанию основал Гюнтер Фрониус Петтенбах в Австрии производством зарядных устройств и сварочных трансформаторов [125]. В 2005 году компания внедрило на рынок процесса *СМТ* (*Cold Metal Transfer*). Этот процесс очень удобен для сварки тонких листов алюминиевых сплавов. Так как в традиционных способах сварки сопровождающиеся расплавлением соединяемых заготовок, не всегда позволяют сваривать конструкции из новых высокопрочных, коррозионно-стойких, магнитных и других специальных материалов в машиностроительной, электротехнической, электронной и других отраслях промышленности. Это объясняется тем, что расплавление металла, развитие рекристаллизационных процессов и фазовые превращение, обусловленные термическим циклом сварки, приводят к необратимым изменениям структуры и потере свойств таких материалов. Чем больше тепловлажнение, тем шире интерметаллическая фаза и тем хуже механические свойства соединения. Если взять процесс *СМТ* то он, делает возможным управляемый, почти без тока переход материала. Основной алюминий расплавляется вместе с присадочным алюминием. Впервые напрямую был использован процесс

движения проволоки. Цифровое управление процессом обнаруживает короткое замыкание, потом помогает отделить каплю с помощью обратного хода проволоки назад. Перенос металла сам по себе происходит практически при нулевом токе. Когда дуга горит, проволока движется вперед и потом опять назад при коротком замыкании автоматически. Сама дуга потребляет тепло в течение короткого времени, затем, сразу же, это потребление снижается. Тепло, холод. Таким образом, контролируется короткое замыкание, и так происходит отделение капли [120]. Такой процесс влияет на качество формирования шва, при этом зона термического влияния намного меньше чем при традиционной сварки алюминия и его сплавов.

Материалы и методика экспериментов. Сварочные работы на сплаве *AlSi1MgMn 6082T6* были выполнены на установке Института сварки и технологии металлов (*ISAF TU Clausthal, Germany*) с использованием сварочной установки *Fronius* (рис.1), которая позволяет провести сварку/наплавку металлических материалов. В данной работе были использованы в качестве основного свариваемого материала листы алюминиевого сплава (*Al-Mg-Si*) марки 6082T6 аналог российского сплава (АД35) с толщиной 6 мм и в качестве сварочной проволоки *ALMg 4,5* марки 5183 с диаметром 1,6 мм. В таблице 12.1 приведены химические составы основного материала и сварочной проволоки.

Табл. 12.1. Химический состав основного металла и сварочной проволоки (масс %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
<i>AlSi1MgMn 6082T6</i>	0,7-1,3	0,5	0,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1
<i>ALMg4,5Mn0,7 5183</i>	0,40	0,40	0,10	0,50-1,0	4,3-5,2	0,05-0,25	0,25	0,15
<i>ALMg 4,5 5087</i>	0,25	0,40	0,05	0,9	4-4,9	0,15	0,25	0,15

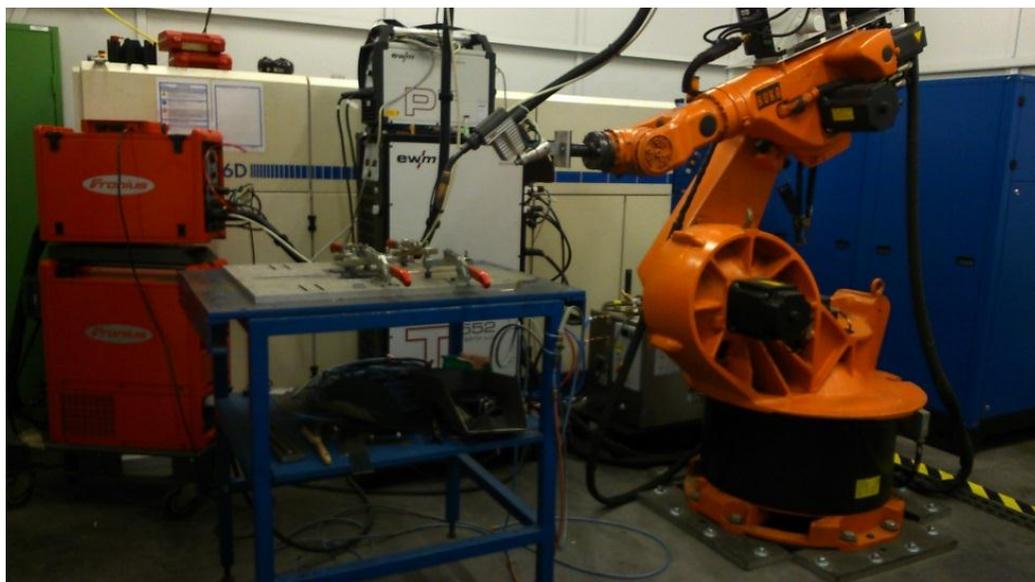


Рис.1. Сварочная установка ISAFc техникой *Fronius*

В качестве защитного газа для сварки первого образца был применен *Varigon HE 30 (He 30%+Ar 70%)* с объемом потребления 20 л/мин. Для второго образца чистый Аргон с объемом потребления 20 л/мин. Способ сварки *СМТ*. Параметры процесса сварки приведены в таблице 2, для обеих образцов. Как видно из таблицы 12.2, режимы сварки для обеих образцов были одинаковы, отличия было в газе и сварочной проволоке.

Табл. 12.2. Параметры сварки и технологии для сварочных работ.

№	Напряжение [V]	Сила тока [A]	Скорость подачи проволоки [м/мин]	Скорость сварки [м/мин]
1	12	90	6	0,4
2	12	90	6	0,4

На рис. 12.2 показаны сварочные работы, полученные в соответствии со сварочно-технологическими параметрами из табл 12.2.

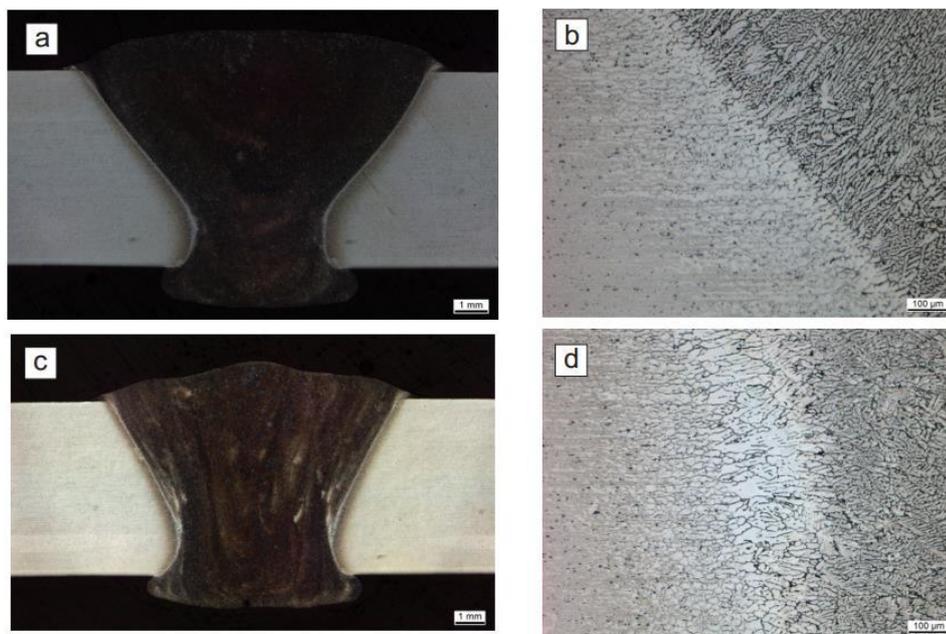


Рис. 12.2. Микроанализ сплава *AlSi1MgMn 6082T6* после сварки
 а,b-сварка сделанная с проволокой *AlMg4,5Mn0,7 5183*
 с,d- сварка сделанная с проволокой *ALMg 4,5 5087*

Из рис. 12.2 следует что микроструктура в рис. 12.2 *a,b*- имеет более мелкую структуру чем структура рис.2 *c,d*. С увеличением содержания магния в сплаве ветки дендрита становятся мельче. Наибольшее измельчение наблюдается при 1% *Mg*. Увеличение *Mg* до 1,4% не уменьшает размера зерна, а увеличивает количество фазы *Mg₂Si* [125]. Структура зоны сплавления изменяется аналогично структуре основного металла при содержании 2% *Si*. Наиболее тонкая структура столбчатых кристаллов (дендритов) наблюдается при содержании в сплаве 1% *Mg*. Более крупное зерно отмечается у сплава с 0,4% *Mg*. В структуре зоны термического влияния сварного соединения (как и в случае литой структуры этого сплава) видны выделения свободного кремния. Наибольший избыток свободного кремния у малолегированного магнием сплава. Количество фазы *Mg₂Si* увеличивается с увеличением в сплавах магния. Самые крупные частицы *Mg₂Si*, которые имеют кубическую форму и из-за своих больших размеров не дают никакого вклада в повышение прочностных свойств.

Выводы:

1. Рекомендуется для дальнейшего исследования образец №1, который имеет в зоне термического влияния более мелкую структуру. Мелкие частицы *Mg₂Si* вносят основной вклад в прочностные свойства.
2. Рекомендуется работать с режимом сварки образца №1.
3. При толщине свариваемого материала 6 мм рекомендуется сваривать встык.
4. Для сварки алюминия и его сплавов толщиной 6 мм рекомендуется использовать процесс *CMT Impuls*.

13. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Одной из основных проблем машиностроения является проблема качества и надежности.

Для современных машин характерны такие направления развития: увеличение степени автоматизации; повышение рабочих параметров - нагрузок, скоростей, температур; ужесточение требований к точности функционирования, к эффективности их работы (производительности, мощности, КПД) и т.д. Все это привело к необходимости повышения требований к их надежности и долговечности.

В настоящее время промышленность даже передовых стран несет огромные потери из-за недостаточной надежности и долговечности выпускаемых изделий.

С особенно большими затратами времени и средств связан выход из строя уникальных машин и агрегатов. Так, ненадежная работа технологического оборудования может привести к выпуску некачественной и ненадежной продукции.

В общей системе обеспечения качества уникальных машин и агрегатов на стадии производства одно из первых мест занимает качество процесса обработки резанием, которое непосредственно связано с надежностью эксплуатации режущих инструментов, поэтому проблема обеспечения надежности режущих инструментов является актуальной.

Показатели качества объекта исследований

Качество - это совокупность свойств объекта исследований, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. При этом надежность является одним из основных показателей качества. В общем случае используют следующие виды показателей качества:

- показатели назначения, характеризующие полезный эффект от использования объекта по назначению;
- показатели технологичности, характеризующие эффективность конструктивно-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда;
- эргономические показатели, характеризующие систему «человек - изделие - среда» и учитывающие комплекс свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых процессах;

- эстетические показатели, характеризующие внешние свойства продукции;
- патентно-правовые показатели, характеризующие степень патентной защиты объекта;
- экономические показатели, отражающие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию объекта, а также экономическую эффективность эксплуатации.

Уровень качества - это относительная характеристика качества объекта, основанная на сравнении совокупности показателей его качества с соответствующей совокупностью базовых показателей ГОСТ. Таким образом, качество объекта оценивается сравнением с показателями качества того объекта, которое принято за исходное (базовое) или с показателями стандарта. Показателем качества обязательно является количественная характеристика определенных свойств объекта. Для оценки уровня качества данного объекта по сравнению с базовым применяется два основных метода. Дифференциальный метод, при котором сопоставляются единичные показатели качества данного объекта и образца или стандарта. При этом определяется, по каким показателям достигнут требуемый уровень качества. В этом случае должны быть выделены основные показатели, которые являются выходными параметрами объекта и для которых достижение требуемого уровня является обязательным условием.

Комплексный метод оценки уровня качества применяется, когда для сравнения объектов желательно характеризовать их качество одним числом.

Основные определения и понятия теории надежности

Особенностью проблемы качества и надежности является их связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования машины, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея создания новой машины и кончая принятием решения о ее списании. Каждый из этапов вносит свою лепту в решение трудной задачи создания машины требуемого уровня качества с наименьшими затратами времени и средств. При проектировании и расчете машин ее качество и надежность закладываются.

При изготовлении (производстве) машины указанные свойства обеспечиваются. Надежность готового изделия зависит от качества изготовления деталей, сборки машины и ее узлов, методов контроля и испытания готовой продукции, а также других показателей технологического процесса.

При эксплуатации машины характеристики ее качества и надежности

реализуются. Показатели безотказности и долговечности проявляются только в процессе использования машины и зависят от методов и условий ее эксплуатации, принятой системы ремонта, методов технического обслуживания и других факторов.

Известная в настоящее время наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества технических устройств и систем и на основании этого разрабатывает методы, обеспечивающие с наименьшими затратами времени и средств необходимую продолжительность и безотказность их работы.

При изучении надежности технических устройств рассматриваются самые разнообразные объекты - машины, сооружения, аппаратура и др. Для машиностроения объект рассмотрения будем называть изделием. Каждое изделие характеризуется определенными выходными параметрами - величинами, определяющими показатели качества данного изделия. Это могут быть показатели точности функционирования, механические и прочностные характеристики, экономические показатели и др. Значения каждого выходного параметра зависит от выходных параметров узлов и отдельных частей, составляющих данное изделие. Термины и определения по надежности стандартизованы. Ниже приведены основные из них.

Работоспособность - это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Работоспособность изделия связана не только со «способностью работать», т.е. выполнять необходимые функции, но и с тем, чтобы при этом выходные параметры изделия находились в допустимых пределах.

Отказ - это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Для большинства машин и их механизмов основное значение для оценки потери работоспособности имеет продолжительность работы изделия. Время работы изделия до отказа, выраженное в часах, называется в этом случае наработкой до отказа. Нарботка изделия до отказа это время достижения предельного значения любым из его выходных параметров.

Нарботка до предельного регламентированного состояния называется ресурсом.

Качество и надежность изделия - обобщенные свойства, которые включают в себя понятия безотказности и долговечности. Безотказность это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого периода времени.

Долговечность это свойство изделия сохранять работоспособность до

наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Основным показателем безотказности изделия является вероятность безотказной работы $P(t)$ (коэффициент надежности) - вероятность того, что в заданном интервале времени $t = T$ не возникнет отказа изделия. Значение $P(t)$ может находиться в пределах $0 < P(t) < 1$. Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ образуют полную группу событий. Допустимое значение $P(t)$ выбирается в зависимости от степени опасности отказа. Например, для ответственных изделий авиационной техники допустимые значения коэффициента надежности доходят до $P(t) = 0,9999$ и выше.

Если последствия отказа связаны с незначительными экономическими потерями, допустимое значение $P(t)$ может быть существенно ниже. Следует иметь в виду, что применение $P(t)$ без указания периода времени, в течение которого рассматривается работа изделия, не имеет смысла. Показатели долговечности оценивают потерю работоспособности изделия за весь период его эксплуатации. Основным показателем долговечности элемента изделия является его срок службы (наработка) до отказа T . Значение T определяется предельно допустимой величиной выходного параметра.

Предельное состояние машины, т.е. прекращение ее эксплуатации, определяется экономическими факторами - ее моральным износом или затратами, связанными с физическим износом машины. Для оценки долговечности сложного изделия применяют две категории показателей. Во-первых, это показатели, характеризующие выход за допустимые пределы выходных параметров изделия в целом. В этом случае основным показателем долговечности является ресурс, связанный с выходом за допустимые пределы основных технических характеристик изделия и наступление его предельного состояния. Во-вторых, долговечность всей машины должна характеризовать ее способность выполнять свои рабочие функции с минимальными затратами на замену износившихся деталей, наладку, ремонт и обслуживание.

Методология построения моделей надежности инструментов

Результатом любого эксперимента являются модели объекта исследования в том или ином виде отражающие реальную действительность.

Любая модель должна давать информацию о качественных или количественных изменениях выходных параметров объекта исследования

при воздействии на него определенных входных параметров.

Различают физические и математические модели. Физические модели показывают характер изменения качественных характеристик объекта исследования в условиях воздействия входных параметров на определенные физические закономерности процесса резания. Основой математических моделей являются математические зависимости, показывающие количественные изменения выходных параметров объекта исследования от воздействия определенных входных параметров, величины которых варьируются.

От правильного выбора методики исследования зависит эффективность полученной модели, отражающая степень соответствия расчетных и фактических выходных параметров, т.е. экономическая значимость результатов исследований для реального производства.

Стабильность производства в большой степени зависит от надежности инструментов, преждевременный выход из строя которых ведет к остановке процесса производства, а поломка инструментов может привести к получению бракованных изделий.

На основании изложенного выше проблема построения моделей надежности инструментов является достаточно актуальной для любого производства.

Стадии исследований при построении математических моделей надежности инструментов

Предлагается система методов исследований, включающая лабораторные и производственные испытания инструментов, состоящая из семи стадий:

- обоснование цели исследований и актуальности проблемы;
- анализ проблемы и разработка задач исследований;
- методика получения эмпирических стойких моделей в детерминированной форме в лабораторных условиях;
- методика получения эмпирических статистических стойких зависимостей в производственных условиях;
- методика получения обобщенной статистической стойкой зависимости для автоматизированного массового производства;
- методика получения статистической стойкой модели для типа производства;
- методика построения модели надежности инструментов и проверки ее экономической эффективности.

Проведены исследования по предложенной системе с быстрорежущими

спиральными сверлами.

Обоснование цели исследований и актуальности проблемы

Около 20% станков промышленного оборудования являются сверлильными, без учета обработки сверлением на станках других типов, т.к. более 60 % деталей машин, механизмов, приборов и систем имеют отверстия. Сверление, единственный способ получения отверстий резанием в сплошном материале, поэтому сверла являются одним из наиболее часто применяемых режущих инструментов. На промышленных предприятиях спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8 % от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес занимают спиральные сверла (около 30%). Отказ сверла в виде поломки, приводит к остановке оборудования и, как правило, к браку при обработке изделия. Это особенно характерно для автоматизированного массового производства, в котором одновременно работает большое количество инструментов, когда невозможно проконтролировать текущее состояние каждого из них. Вместе с тем быстрорежущие спиральные сверла широко используются и в других типах производства, где их безотказная эксплуатация не менее важна. Отказ сверла можно предупредить при наличии обоснованных моделей надежности, разработка методов построения которых, для быстрорежущих спиральных сверл является достаточно актуальной проблемой.

Анализ проблемы и разработка задач исследований

В работе [127] приведены результаты анализа проблемы, показано, что существующие стойкостные модели получены в лабораторных условиях методом однофакторного эксперимента на интенсивных скоростях резания, больших точки перегиба правой ветви графиков стойкостных зависимостей [128], стойкость в них представлена в детерминированной форме и не учитывает случайный характер процессов изнашивания инструментов. Эти стойкостные модели используются для расчета допустимых скоростей резания, максимально возможных при рекомендуемых глубинах резания, подачах и заданных периодах стойкости [129]. Справочником технолога-машиностроителя [130] предложена зависимость для расчета допустимых скоростей резания при сверлении, имеющая вид:

$$V = \frac{9,8d^{0,4}}{T^{0,2}S^{0,5}}, \quad (1)$$

где V - скорость резания, d - диаметр сверла, S - подача на оборот сверла, T - период стойкости. Рассчитанная по зависимости (1) скорость резания для

сверл диаметром 11 мм равна 24 м/мин при рекомендуемой подаче 0,25 мм/об и периоде стойкости 45 мин. Однако, обширные статистические материалы, собранные сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана на предприятиях автоматизированного массового производства, позволили установить, что быстрорежущие спиральные сверла диаметрами от 6 до 45 мм при обработке углеродистых конструкционных сталей наиболее часто эксплуатируются в диапазоне скоростей резания от 9 до 16 м/мин [131]. Использование сравнительно невысоких скоростей резания обусловлено тем, что в автоматизированном массовом производстве время обработки сверлением не лимитирует производительность оборудования. В этих условиях более актуальной является задача обеспечения максимальной стойкости сверл. Стойкостные модели на скоростях резания автоматизированного массового производства отсутствуют. Рассчитанный по зависимости (1) период стойкости для сверл диаметром 10 мм на скорости резания 14 м/мин составил 8,9 ч. Это значение периода стойкости сравнимо со средними стойкостями, представленными в работе [132] по результатам производственных испытаний в условиях автоматизированного массового производства (табл. 1). У сверл диаметром 9,8 мм средняя стойкость равна 8,0 ч, что на 10 % отличается от рассчитанного по зависимости (1) периода стойкости. Период стойкости близкий к средней стойкости сверл работавших в аналогичных производственных условиях указывает на то, что почти половина сверл выйдет из строя по его окончании. Вместе с тем зависимость (1) не учитывает твердость обрабатываемого материала, которая существенно влияет на среднюю стойкость (табл. 13.1).

Таблица 13.1 - Условия и результаты производственных испытаний

Диаметр сверла d , мм	9,8	10,5	11,5	12,0	13,8	17,5	21,0	35,0
Скорость V , м/мин	13,8	12,6	12,6	12,0	12,6	13,8	13,2	11,4
Подача S , мм/об	0,22	0,14	0,18	0,14	0,22	0,2	0,25	0,25
Твердость заготовок НВ	200	300	200	180	200	190	300	300
Средняя стойкость \bar{T} , ч	8,0	1,87	8,7	8,56	10,2	11,95	2	2,4
Коэффициент вариации ϑ_T	0,33	0,15	0,16	0,23	0,22	0,14	0,3	0,3

Это указывает на необходимость получения стойкостных моделей на скоростях резания автоматизированного массового производства и других типов производства (крупносерийного, серийного и т.д.), учитывающих случайный характер процессов изнашивания инструментов и условия

эксплуатации сверл. Вместе с тем, в табл. 13.1 разброс скоростей резания незначительный, что не позволит получить статистические зависимости стойкости от скорости резания по результатам производственных испытаний.

Анализ проблемы позволил определить задачи исследований:

- разработка методов построения стойкостных моделей, на скоростях резания всех типов производства в лабораторных условиях;
- разработка методов построения зависимостей и моделей, учитывающих случайный характер процессов изнашивания инструментов и условия эксплуатации сверл в производственных условиях;
- разработка методов построения моделей надежности инструментов для типов производства на основании лабораторных и производственных исследований.

Выбор плана лабораторных экспериментов

В лабораторных условиях получают эмпирические зависимости стойкости режущих инструментов от основных факторов процесса резания в детерминированной форме. Для этого проводят однофакторные эксперименты, когда определяется влияние одного фактора при строгой фиксации остальных. Как правило, такие исследования связаны с большой трудоемкостью и материалоемкостью. Например, при исследовании влияния параметров режима резания на стойкость инструментов минимальное количество экспериментальных точек на кривой зависимости стойкости от одного параметра равно семи. При этом для подтверждения адекватности эксперимента в каждой точке необходимо трехкратное его повторение. А так как параметров режима резания три (скорость резания, подача и глубина резания [133]), общее количество экспериментов утраивается. Поэтому проблема снижения трудоемкости и материалоемкости таких исследований достаточно актуальна.

Одним из путей снижения трудоемкости и материалоемкости исследований стойкости может быть планирование эксперимента.

В работе [134] приведены результаты анализа возможности снижения трудоемкости и материалоемкости планированием эксперимента.

Планирование эксперимента дает возможность в каждом опыте одновременно варьировать несколькими независимыми переменными (факторами) на нескольких уровнях по специальному плану.

На математическом языке задача планирования эксперимента формируется следующим образом: нужно выбрать оптимальное расположение точек в факторном пространстве, чтобы получить некоторое представление о поверхности отклика [135].

Важным этапом планирования является выбор области, в которой необходимо начинать эксперимент. Для этого необходимо иметь априорную информацию - результат анализа проблемы из научно-технических источников. Например, в определенных диапазонах скоростей резания, подач и глубин резания известны зависимости стойкости инструмента отдельно от каждого из них, в свое время полученные при проведении однофакторных экспериментов и позволяющие определить характер их влияния на стойкость. В этом случае результатом планирования эксперимента будет математическая модель в рамках этих диапазонов. Но такую модель можно получить без проведения дополнительных экспериментов.

Проблема стойкости режущего инструмента актуальна именно при отсутствии априорной информации [136]. В этом случае для выбора экспериментальной области факторного пространства необходимо предварительно провести однофакторные эксперименты в количестве, равном количеству факторов, что связано с показанными выше трудоемкостью и материалоемкостью. Поэтому планирование эксперимента при решении актуальной проблемы стойкости режущих инструментов не исключает однофакторных экспериментов и не снижает трудоемкости и материалоемкости лабораторных исследований.

Вместе с тем высокая трудоемкость лабораторных исследований требует максимально ограничить число исследуемых факторов, остановиться лишь на тех, характер влияния которых иным путем исследовать невозможно. Например, в нашем случае, как показано в табл. 13.1, узкий диапазон варьирования скоростью резания не позволяет определить характер влияния ее на выходные характеристики процесса сверления производственными испытаниями сверл.

Вывод.

1. Разработана методология построения моделей надежности инструментов, учитывающая случайный характер изнашивания инструментов, условия их эксплуатации и тип производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных кафедрой аналитических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующее:

1. Трехмерное моделирование изделий дает массу преимуществ перед традиционным двумерным проектированием, позволяя обеспечить высокое качество печатных изделий, оперативно вносить корректировки в конструкцию изделия и изменять дизайн регулятора.
2. Технология 3D-прототипирования позволяет сократить время научно-исследовательских и опытно – конструкторских работ, более чем в 3раза, по сравнению с традиционными методиками.
3. Разработаны критерии функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства в виде износа уголков.
4. Научно обосновано, что износ уголков спиральных сверл тесно взаимосвязан с износом ленточек на скоростях резания 9 - 30 м/мин, и с износом задних поверхностей на скоростях 21 - 30 м/мин.
5. Разработаны критериальные зависимости для расчета критериев функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства, учитывающие случайный характер процессов изнашивания.
6. Естественно, что практический интерес представляют прежде всего результаты, полученные на образцах, характерные размеры которых приближены к размерам конкретных деталей. При этом сопоставление разных материалов по трещиностойкости целесообразно проводить, корректируя экспериментальные значения с учетом конструкционных и прочностных параметров.
7. Анализ по первой части АПТС и построение модели существенно проясняют задачу и во многих случаях позволяют увидеть стандартные черты в нестандартных задачах. Это открывает возможность более эффективного использования стандартов, чем при применении их в исходной формулировке задачи.
8. Таким образом разработанная компьютерная модель процесса уплотнения формовочной смеси при импульсном нагружении достаточно адекватно описывает динамические процессы в формовочной смеси в процессе уплотнения. Об этом свидетельствуют совпадения характера кривых скоростей, ускорений и перемещений слоев формовочной смеси, полученным ранее экспериментальным данным.
9. Выбор и расчет реальных параметров требует проведения дополнительных экспериментальных исследований. Эта работа существенно облегчается

наличием компьютерной модели, позволяющей планировать требуемые эксперименты.

10. Медный полый катод относится к «холодным» катодам, и высокую температуру имеет только та часть поверхности, на которую опирается пятно дуги. Кроме того, скорость процесса распространения тела в телах зависит от отношения поверхности тел к их объему.

11. Известно, что чем меньше отношение поверхности тела к его объему, тем и скорость протекания процесса будет меньше. Известно, также, что для шара скорость охлаждения больше, чем для любого другого тела. Что позволяет уменьшить глубину термического воздействия.

12. Влияние нагрева теплотой дуги сказывается только в непосредственной близости от пятна в связи с высокой скоростью перемещения пятен, а также вращением электрода.

13. Использование нелинейных моделей для синтеза синергетических законов управления позволяет учесть естественно-физические свойства объекта управления, а также за счет нелинейности модели увеличить быстродействие системы управления, что невозможно в линейных системах.

14. Синтез нелинейных систем существенно усложняется, когда непосредственному измерению доступна лишь часть координат состояния объекта и имеются недоступные измерению внешние и параметрические воздействия.

15. Вышеприведенное описание, на наш взгляд, наглядно иллюстрирует преимущества синергетического управления энергоагрегатами и недостатки обычных методов управления.

16. Медный полый катод относится к «холодным» катодам, и высокую температуру имеет только та часть поверхности, на которую опирается пятно дуги. Кроме того, скорость процесса распространения тела в телах зависит от отношения поверхности тел к их объему.

17. Чем меньше отношение поверхности тела к его объему, тем и скорость протекания процесса будет меньше. Известно, также, что для шара скорость охлаждения больше, чем для любого другого тела. Что позволяет уменьшить глубину термического воздействия.

18. Влияние нагрева теплотой дуги сказывается только в непосредственной близости от пятна в связи с высокой скоростью перемещения пятен, а также вращением электрода.

19. Повышение силы тока оказывает наибольшее влияние на увеличение микротвердости. Повышение давления ролика на деталь увеличивает степень деформации, но при этом возрастает площадь контакта, что снижает плотность тока и температуру нагрева.

20. Нагрев каленой поверхности при ЭПО, во-первых способствует получению шероховатости ближе к оптимальной с более высокой несущей способностью, чем

при обычном обкатывании и, во-вторых, создает условия для образования не травящегося мартенсита особого рода.

21. Повышение качества обработки сверлением посредством увеличения скорости резания, по примеру обработки точением, не представляется возможным из-за низкой теплостойкости быстрорежущих сталей и увеличения разбивки отверстий.

22. Представляется возможным проведение исследований, направленных на повышение качества обработки сверлением с применением низких скоростей резания $V = 3 - 6$ м/мин, по примеру обработки протягиванием, где следует ожидать повышение качества обработки сверлением и в отношении точности отверстий и в отношении шероховатости поверхности

23. Стойкость спиральных сверл зависит от работоспособности трех конструктивных элементов: задних поверхностей, ленточек и уголков. Большое влияние на стойкость в зависимости от скорости резания оказывают износ задних поверхностей и износ ленточек.

24. Работоспособность ленточек зависит от интенсивности их износа, величины разбивки обрабатываемого отверстия и абразивных свойств обрабатываемого материала.

25. Работоспособность задних поверхностей в основном зависит от температуры резания. В диапазоне скоростей резания активного наростообразования интенсивность износа задних поверхностей не является определяющим фактором потери их работоспособности.

26. Условием максимальной стойкости спиральных сверл (точка перегиба стойкостной зависимости) является равноценное влияние износов задних поверхностей и ленточек на потерю работоспособности сверл. При этом интенсивность износа задних поверхностей не определяет максимальную стойкость спиральных сверл, тогда как минимальная интенсивность износа ленточек является обязательным условием экстремума стойкостной зависимости.

27. Рекомендуется для дальнейшего исследования образец №1, который имеет в зоне термического влияния более мелкую структуру. Мелкие частицы Mg_2Si вносят основной вклад в прочностные свойства.

28. Рекомендуется работать с режимом сварки образца №1.

29. При толщине свариваемого материала 6 мм рекомендуется сваривать встык.

30. Для сварки алюминия и его сплавов толщиной 6 мм рекомендуется использовать процесс *CMT Impuls*.

31. Разработана методология построения моделей надежности инструментов, учитывающая случайный характер изнашивания инструментов, условия их эксплуатации и тип производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по НИР «Разработка технологической системы регулирования режимами работы камнеобрабатывающего оборудования». Бишкек, 2015г.
2. Учебное пособие по работе с SolidWorks 2013г.
3. Руководство по эксплуатации 3D принтер Replicator 2X ,2015 г.
4. ГОСТ 2575-83 Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. - М.: Машиностроение, 1975. - С. 315-316.
6. Методика экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки. - М.: НИИМАШ, 1982. - 159 с.
7. Общемашиностроительные нормативы по износу, стойкости и расходу спиральных сверл. - М. : НИИМАШ, 1980. - 40 с.
8. Даниелян А.М. Резание металлов и инструмент. - М.:Машгиз, 1950. - 250 с.
9. Рагрин Н. А. Физическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. – М., 2012. - № 11. - С. 11–17.
10. Рагрин Н.А. Влияние износа отдельных рабочих элементов на характер формирования отказа быстрорежущих спиральных сверл// Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2009. - № 19. – С. 19-24.
11. Рагрин Н.А. Признаки потери работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства. Материалы III Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития». - М., 2011. - С. 55-58.
12. Рагрин Н.А. Обеспечение безотказности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Машиностроитель. - М., 2012. - № 7. - С. 37-39.
13. Самсонов В.А. Рагрин Н.А., Стародубов И.И. Особенности износа ленточек и уголков быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2013. - № 29 - С. 160-163
14. Рагрин Н.А. Особенности процесса резания и износа при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Машиностроитель. – М., 2012. - № 10. - С. 48-51
15. Рагрин Н.А. Критерий оптимального износа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2010. - № 21. – С. 43-45.
16. Рагрин Н.А. Обеспечение максимальной стойкости и срока службы спиральных сверл // Научное обозрение. - М., 2015. - № 6. - С.
17. Рагрин Н.А. Применение теории корреляции для получения зависимостей

- наработки от условий обработки сверлением // Машиностроение и инженерное образование. – М., 2013. - С. 21-29.
18. Рагрин Н. А. Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. – М., 2014. - № 1. - С. 49-54.
19. Рагрин Н.А. Анализ способов определения скорости резания при максимальной стойкости спиральных сверл // Технология машиностроения. – М., 2014. - № 7. - С. 20 – 24.
20. Рагрин Н.А. Способы эксплуатации и восстановления работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. – М., 2011. - № 10. - С. 35-37.
21. Рагрин Н.А. Критерий функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2012. – № 26. - С. 18-20.
22. Рагрин Н.А. Критерий технологического износа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2010. - № 21. – С. 55-59.
23. Рагрин Н.А. Применение теории корреляции для получения зависимостей наработки от условий обработки сверлением // Машиностроение и инженерное образование. – М., 2013. - № 3. - С. 21-29.
24. Солнцева Т.Е. Анализ методов заточки и их влияние на режущие свойства спиральных сверл. Диссертация. МВТУ им.Н.Э.Баумана, М.:1958
25. Дибнер Л.Г., Шкурин Ю.П. Заточка спиральных сверл, М.: Машиностроение, 1967
26. Балков В.П. Спиральные сверла для станков с программным управлением // Станки и инструмент, №3, 1974
27. Бечин Г.В. Влияние погрешностей заточки спиральных сверл на стойкость и качество отверстий. Материалы Всесоюзного Совещания по спиральным сверлам, Вильнюс, 1964
28. Глухов Н.А. Влияние на точность сверления отверстий отклонений в равенстве углов наклона режущих кромок к оси сверла, М.: МВТУ, Технология машиностроения, 1955
29. Денисенко В.И. Выбор и применение режущего инструмента. Сверла. Учебное пособие, Рязань, 1976
30. Сапрыкин Ю.В. О корректности определения предела трещиностойкости при совмещённом осевом и внецентренном растяжении. Изв.КГТУ, №21.2010.
31. Сапрыкин Ю.В. Рентгеноструктурный анализ критических параметров трещиностойкости в точке бифуркации. ФХММ. №3. 1990.
32. ГОСТ 25.506-85. Определение характеристик трещиностойкости при

- статическом нагружении. М.: Изд. Стандартов. 1985.
33. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения. Пер. с немец. М.: Металлургия, 1974.
34. Автоматизация проектирования конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении. Т.1, 2. /Под. ред. О.И. Семенкова;- Минск, «Вышэйшая школа», 1976.
35. Омуралиев У.К., Сартов Т.Э., Тутлис В.П., Основы технологии машиностроения: Учебн. пособие/КГТУ им. И. Раззакова;-Б.: ИЦ «Текник», 2013.
36. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость/–М.: Энергия, 1980. –568с.
37. Баландин Д.В. Использование LMI toolbox пакета Matlab в синтезе законов управления [Текст]:учеб./ Д.В. Баландин, М.М. Коган //Информационные технологии и компьютерная математика - Нижний Новгород, 2006. – 135 с.
38. Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления / – М.: Энергоатомиздат, 1990.
39. Беллман Р. Введение в теорию матриц [Текст]/ Р.Беллман–М.: Наука, 1976. -352с.
40. В.А. Бесекаерский, Е.П. Попов. Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
41. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст]/ В.А. Веников – М.: Высшая школа, 1985–с.
42. Глебов И.А. Научные основы проектирования турбогенераторов. [Текст]/ И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич –Л.: Энергия, 1986.
43. Д’Анжело. Линейные системы с переменными параметрами. Анализ, синтез [Текст]/ Д’Анжело – М.: Машиностроение, 1974. – 287 с.
44. Джолдошев Б.О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. – Бишкек: «Илим», 2011. –166 с.
45. Джолдошев Б.О. К синтезу управляющих устройств для одного класса нелинейных систем /Б.О. Джолдошев, Р.Н. Курманалиева, Т.Т. Оморов// Проблемы автоматики и управления, -Бишкек, 2009, №2 – С.11–20.
46. Джолдошев Б.О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества/ Б.О. Джолдошев– Бишкек: «Илим», 2011. –166 с.
47. Джолдошев Б.О. Синтез регулятора для нестационарной линейной системы в условиях неопределённости/ Б.О. Джолдошев // Материалы межд.

- н.-т. конф. «Проблемы управления и информ. технологий» - Бишкек: Илим, 2010.–С. 105 – 109.
48. Козлов В.Н. Управление энергетическими системами. Электромеханические процессы / СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. Колесников А.А. Синергетическая теория управления/ –М.: Энергоатомиздат, 1994. –344 с.
49. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – Высш. шк., 1987. – 248 с.
50. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем [Текст]/ И.В. Литкенс , М.: Энергоатомиздат, 1988.
51. Лурье З.Я. и др. Система управления частотой вращения ротора гидротурбины, пути ее развития [Текст]/ Лурье, З.Я. и др. // Проблемы
52. Михневич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. - М.: Наука, 1964.
53. Оморов Т.Т. Новые алгоритмы адаптивного управления и идентификации систем[Текст]/ Т.Т. Оморов, Г.А. Кожекова,Б.О. Джолдошев // Информационные технологии и управление. Труды научной конф. - Бишкек: 2008; –С. 46 – 52.
54. Оморов Т.Т. Принцип гарантируемой динамики в теории систем управления. – Бишкек: Илим, 2001. – 130 с.
55. Оморов Т.Т. Синтез контуров адаптации линейных многомерных автоматических систем [Текст]/ Т.Т. Оморов, Г.А. Кожекова,Б.О. Джолдошев // Известия НАН КР – Бишкек: 2010. № 4. – С.
56. Оморов Т.Т. Синтез адаптивного нестационарного регулятора в условиях параметрической неопределенности[Текст]/ Т.Т. Оморов, Б.О. Джолдошев, У.Б. Джунушалиев // Проблемы автоматики и управления, - Бишкек: 2009, №2. – С. 3 – 10.
57. Оморов Т.Т. Синтез адаптивной системы управления в условиях неконтролируемых внешних воздействий [Текст]/ Т.Т. Оморов, Б.О. Джолдошев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: 2008. – №13.
58. Под ред. А.А. Колесникова. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы / –М.: Едиториал, УРСС, 2005. – 222 с.
59. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5x: В 2-х т. [Текст]/ В.Г. Потемкин– М.: Диалог–МИФИ, 1999.– Т.1.– 366 с.; Т.2. – 304 с.
60. Справочник по теории автоматического управления [Текст]/ Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
61. Справочник по электротехническим машинам [Текст]/ Под ред. И.П. Копылова, Б.К.Клокова. - М.: Т.1, 1988 -с.

62. Структурный синтез управляющего устройства для линейного многомерного объекта управления [Текст]/ [Т.М. Жолдошов, Б.О. Джолдошев, У.Б. Джунушалиев и др.] // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». №3(39), 2011-с.53-57.
63. Тимофеев А.В. Построение адаптивных систем управления программным движением [Текст]/ А.В. Тимофеев. – Л.: Энергия, 1988. – 88 с.
64. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах [Текст]/ А.Л. Фрадков – М.: Наука, 1990.
65. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем / Под ред. В.А. Веникова. Э.Н. Зуева и М.Г. Портного. - М.: Высшая школа, 1982.
66. Яковлев О.С. Метод структурного синтеза нелинейных регуляторов // Проблемы управления и информатики. –1996.– № 1–2. С. 211–223.
67. Kosut R.L. Special issue on system identification for robust control design [Text] / R.L. Kosut, G.C. Goodwin, M.P. (Eds) Polis // IEEE Trans. Automat. Control. 1992. V. AC – 37. No. 7.
68. Krstic M., Kanellakopoulos, P.V. Kokotovich M. Adaptive nonlinear control without over-parametrization// Syst. Control Lett., 1992. V. 19. – P. 177 – 185.
69. Narendra K.S. Stable Adaptive Systems. [Text] / K.S. Narendra, A.M. Annaswamy // Englewood Cliffs. N.J.: Prentice-Hall, 1989.
70. Rosenbrock H.H. The stability of multivariable control systems using the inverse Nyquist array [Text] / H.H. Rosenbrock // Proc. IEE. 1969. – V. 116, № 11. – P.1929–1936.
71. Эсибян Э.М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы.// Автоматическая сварка, № 12, 2000г., стр. 6-16.
72. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. – М.: Машиностроение, 1974. – 110с.
73. Быховский Д.Г. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1972. – 168с. Ширшов И.Г., Котиков В.И. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987-192 с.
74. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М., Изд-во «Наука», 1968, 244с.
75. При электродные процессы в дуговых разрядах. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., 6. Пустогаров А.В. и др. - Новосибирск: Наука, 1982. - 157.
76. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток.- М.:Наука,1971.-543с
77. Бейлис И.И. К теории эрозионных процессов катодной области дугового разряда. //Докл. АН СССР, 1982 – 262, №6, стр. 1356-1361.

78. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М. ИЛ, 1961.-369 с.
79. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание-3-е изд. – Долгопрудный: Изд. дом. «Интеллект», 2009.- 736 с.
80. Лесков Г.И., Электрическая сварочная дуга. М., Машиностроение, 1970, 335с.
81. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1975. - 293.
82. WWW.energotechnika.ru
83. Жумалиев Ж..М. Разработка плазмотрона с вращающимся медным шаровым катодом.//Вестник КГТУ, №, 2006, с.
84. Болотов А.В., Борисова Т.В. Эрозия легкоплавких электродов. – В кн. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы. Алма-Ата, 1970, с. 298 – 300.
85. Ящерицин П.И., Рыжов Э.В., Аверчиков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск.: Наука и техника, 1977.
86. Шнейдер Ю.Г. Холодная бесштамповая обработка металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1967.
87. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение 1972.
88. Рыжов Э.В. Технологическое управление геометрическими параметрами контактирующих поверхностей. В кн. - Расчетные методы оценки трения и износа. Брянск: Приокское книжное издательство, Брянское отделение, 1975.
89. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. М.:Машиностроение, 1975.
90. Папшев Д.Д. Отделочно-управляющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978.
91. Проскуряков Ю.Г. Дорнование цилиндрических отверстий. М.: Машгиз, 1958.
92. Проскуряков Ю.Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки. М.: Машиностроение, 1965.
93. Проскуряков Ю.Г. и др. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием. Барнаул: Алтайкнигиздат. 1969.
94. Рыжов Э.В., Суслов А.Р., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979.
95. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971.
96. Рыжов Э.В., Андрейчиков О.С., Шешков А.Е. Раскатывание резьб. М.: Машиностроение, 1974.

97. Справочник технолога-машиностроителя. Т - 2. /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986.
98. Режимы резания металлов. Справочник./ Под ред. Ю.В. Барановского. Изд.3-е, переработанное и дополненное. - М.: Машиностроение, 1972. - 409 с.
99. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
100. Древаль А.Е. Рагрин Н.А. Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства: Электронное научно-техническое издание// МГТУ им. Баумана. – Москва. №10.2011.
101. Рагрин Н.А. Определение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. – 2012. - №3. - С.31-33.
102. Рагрин Н.А. Влияние скорости резания и износа рабочих элементов быстрорежущих спиральных сверл на динамические характеристики процесса сверления. // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек. - 2008.- №14. – С. 51-53.
103. Рагрин Н.А. Особенности процесса наростообразования при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами. // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек. - 2009.- №15. – С.126-129.
104. Самсонов В.А. Влияние химического состава быстрорежущей стали на температурное состояние рабочей части сверла. Вестник машиностроения. Машиностроение. – 1973. - № 2. – С. 53 – 55.
105. Рагрин Н.А. Признаки потери работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства: Материалы III Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития».- Москва: Изд-во Спутник, 2011. С. 55-58
106. Рагрин Н.А. Обработка материалов и инструменты: Учебник. / КГТУ им. И. Раззакова. – Б.: ИЦ «Текник», 2012. – 156 с.
107. Рагрин Н.А. Особенности процесса резания и износа при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Машиностроитель. – 2012. - №10 С. 48-51
108. Рагрин Н.А., Айнабекова А.А. Пути повышения качества обработки сверлением // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек,2012. - № 27.- С.42-43.
109. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. - С 176-279.
110. Рагрин Н.А. Анализ способов определения скорости резания при

максимальной стойкости спиральных сверл // Технология машиностроения. – М., 2014. - № 7. - С. 20 – 24.

111. Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Нарыжный С.В. Влияние скорости резания на наличие и высоту нароста при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2013. - № 29. - С.158-160.

112. МелисбекуулуСыймык, Чалгынбаев С., Айнабекова А. Определение закономерностей повышение качества обработки сверлением // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2014. - № 31. - С.157-161.

113. Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Обоснование температуры резания максимального нароста // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2014. - № 32 (Часть 1). - С.227-229.

114. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.

115. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с.

116. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>

117. <http://www.kisar.ru/>

118. <http://www.smart2tech.ru/vidy-defektov-svarnykh-shvov-i-metody-ikh-ustraneniya>

119. Prof. Dr.-Ing. habil. T. Ryspaev, Doz. Dipl.-Ing. H. Reichstein, Doktorandin J. Belekova, Doktorand A. Orozbaev

120. Die Bedeutung der digitalen Schweißtechnik im allgemeinen Maschinenbau

121. <http://www.fronius.com/>

122. <http://svarkaipayka.ru/material/svarochnaya-provoloka/dlya-svarki-alyuminiya-poluavtomatom.html>

123. <http://svarkainfo.ru/rus/lib/tech/tsal/>

124. <http://www.smart2tech.ru/vybor-svarochnogo-zashchitnogo-gaza>

125. http://www.welding.su/articles/arch/arch_226.html

126. <http://svarka.pstu.ru/plasma/info-A1.htm>

127. Рагрин Н.А. Разработка статистической стойкостной модели спиральных сверл при различных типах производства // Технология машиностроения. – М., 2015. - № 11. - С. 156-159.

128. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М. : Высшая школа, 1985. - С. 143-144.

129. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. - М.: Машиностроение, 1975. – С. 315-316.

130. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. / Под ред. А.М.

- Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – С. 176-279.
131. Древаль А.Е. Рагрин Н.А. Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание МГТУ им. Баумана. – М., 2011. - № 10. – 14 с. Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/index.html>.
132. Рагрин Н.А. Обеспечение безотказности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Машиностроитель. – М., 2012. - № 7. - С. 37-39.
133. Рагрин Н.А. Обработка материалов и инструменты: Учебник для вузов / КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: Текник, 2012. – 156 с.
134. Ragrin N.A. Features of planning of experiment in researches of firmness of the cutting tools // Modern problem of theory of machines / SEC “MS”. – North Charleston: CreateSpace, 2016. - № 4(1). - С. 12 -13.
135. Боярский М.В., Анисимов. Э.А. Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2007. – 144 с.
136. Рагрин Н.А. Исследование экстремума стойкостной зависимости при сверлении отверстий быстрорежущими спиральными сверлами: Монография / КГТУ им. И. Раззакова. - Бишкек: Текник, 2013. - 90 с.
137. Рагрин Н.А. — Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. – 2014. № 1. - С.49-54.
138. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алма-Ата: Наука, 1981.-116 с.
139. Рагрин Н.А. Исследование экспериментальных данных методами теории корреляции // Техника машиностроения. – 2013. - № 3(86). - С. 25-29.
140. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968.- 288 с.
141. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М., 1961.- 375 с.
142. Рагрин Н.А. Признаки потери работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства. Материалы III Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития». - Москва, 2011. С. 55-58.
143. Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Особенности влияния подачи на стойкость и наработку спиральных свёрл // Техника машиностроения. – М., 2013. - № 4(88). - С. 18-19.
144. Муслимов А.П. Рагрин Н.А. Методы аппроксимации зависимости

стойкости от скорости резания при сверлении // Интернет-журнал ВАК Кыргызской Республики. - Бишкек, 2013. - № 2. – 10 с. - Режим доступа: <http://www.nakkr.kg/jurnalVAK/>

145. Муслимой А.П., Рагрин Н.А., Стародубов И.И. Расчет стойкости быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: Техник, 2013. - № 30. - С. 13 - 16.

146. Рагрин Н.А. Способы эксплуатации и восстановления работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. –М., 2011. - № 10. - С. 35-37.

147. Общемашиностроительные типовые нормы времени на заточку режущего инструмента. М.: ЦБНТ, 1972. – 115 с.