

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
«КРЫМСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ФЕВЗИ ЯКУБОВА»

На правах рукописи



УМЕРОВ ЭРВИН ДЖЕВАТОВИЧ

УДК 621. 91

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ
ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т СПИРАЛЬНЫМИ
СВЕРЛАМИ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.07 – «Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки».

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Абдулгазис Умер Абдуллаевич

Симферополь – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	13
1.1. Конструктивные особенности деталей, изготавливаемых из стали 12Х18Н10Т.....	13
1.2 Технологические методы получения точных отверстий в деталях машиностроительного профиля.....	15
1.3 Точность и качество получаемых отверстий.....	19
1.4 Методы назначения режимов резания и пути их оптимизации..	24
1.5 Математическое моделирование процесса сверления.....	28
1.6 Анализ математических моделей процесса сверления описывающих аспекты обеспечения качества обработки и защиты инструмента от перегрузок.....	33
Выводы по главе, постановка цели и задач исследования.....	40
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ С МАТЕРИАЛОМ ЗАГОТОВКИ.....	42
2.1. Анализ структуры процесса сверления.....	42
2.2. Влияние деформаций рабочей части сверл на точность отверстий.....	47
2.3 Математическое моделирование процесса сверления с учетом упругих деформаций инструмента.....	56
2.4 Математическая модель силовой составляющей процесса сверления, учитывающая ее изменение во времени.....	61
2.5 Теплофизическая модель контактного взаимодействия при резании в СОТС.....	70
Выводы по главе.....	79

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МОДЕЛИ. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ.....	80
3.1 Задачи и методика экспериментальных исследований.....	80
3.2 Результаты экспериментальных исследований от технологических факторов на процесс сверления.	
Проверка адекватности математических моделей.....	102
Выводы по главе.....	122
ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ ЦИКЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ СВЕРЛЕНИЯ.....	123
4.1. Критерии оптимизации операции сверления.....	123
4.2. Моделирование изменения состояния технологической системы с течением времени.....	126
4.3. Формирование технических ограничений.....	127
4.4 Расчет циклов программного управления.....	140
4.5 Перспективы внедрение результатов исследований в промышленность.....	148
Выводы по главе.....	152
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	153
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Основной задачей машиностроения при обработке металлов резанием является совершенствование технологических процессов обеспечивающих наивысшую производительность обработки заготовок с требуемыми параметрами качества, определяемых запросами потребителя.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения выпуска машиностроительными предприятиями различных товаров народного потребления, изготовление которых требует высокую точность, производительность процесса обработки и экономическую эффективность. Значительное увеличение производства автотранспортных средств, сельскохозяйственной и бытовой техники невозможно без глубокой модернизации станкостроительной и смежных с ней отраслей.

Современное металлорежущее оборудование выполняет достаточно большое количество функций, характеризующихся быстродействием, непрерывностью рабочих циклов, сложностью, универсальностью и автоматизированностью процессов обработки.

Проблемы, связанные с обработкой заготовок на современном оборудовании целесообразно разделить на две группы.

Первая группа проблем связана изготовлением деталей из труднообрабатываемых конструкционных материалов, и тем, что окончательная обработка производится в основном без предварительных, черновых операций по снятию припуска, поскольку возросла возможность получения заготовок, максимально приближенных по форме и размерам к готовым деталям. Все это приводит к снижению точности и качества обрабатываемых поверхностей, которое в первом случае связаны с увеличением усилий и температуры в зоне резания, что ведет к повышенному износу режущего инструмента, а во втором к деформациям заготовки в процессе резания.

Вторая группа проблем связана с конструктивными особенностями обрабатываемых заготовок, которые имеют меньшую жесткость и

виброустойчивость, обусловленных стремлением к снижению металлоемкости конструкций деталей.

Сложность формы и несимметричность профиля деталей, наличие ребер жесткости и перемычек, ведет к неравномерной их жесткости, вызывая тем самым неритмичные упругие деформации в процессе обработки, сопровождающиеся высокими температурами резания, растет вероятность коробления деталей.

Обработка материалов, поверхности которых имеют пересекающиеся полости приводит к ударным нагрузкам на режущий инструмент. В случае обработки заготовок из неоднородных материалов, со значительно отличающимися физико-механическими свойствами, нестабильностью характеристик инструмента и рядом других переменных факторов, сопровождается неравномерными относительными отжатыми инструмента и детали, неконтролируемыми изменениями силовой и тепловой нагрузки, высокими динамическими воздействиями на отдельные элементы технологической системы, увеличением вибраций, снижением стойкости режущего инструмента, в особенности сверл, ведущих к нерациональному использованию их ресурса. Перечисленные конструктивные особенности деталей, сказываются на точности и качестве обработки.

Рассмотренные выше проблемы изготовления деталей машин значительно усугубляются на операциях сверления, относящийся к числу наиболее трудоемких технологических процессов, причем сверление является одной из самых распространенных среди других технологических операций, и которая не уступает по объему обработке наружных поверхностей, занимая в отдельных случаях до 40% от всего объема лезвийной обработки.

При сверлении отверстий, являющихся по функциональному назначению исполнительными поверхностями, необходимо обеспечить точность взаимного расположения их осей по отношению к наружным базовым поверхностям.

Недостаточная жесткость режущего инструмента, нестабильность протекания процесса резания из-за неоднородности физико-механических свойств обрабатываемого материала, сложные условия отвода образованной стружки,

трудности подачи СОТС непосредственно в зону резания и возрастание температуры резания с увеличением глубины сверления, приводят к возникновению большого числа дефектов, увеличению процента брака, снижению производительности обработки и стойкости инструмента.

Поэтому одним из эффективных средств автоматизации сверления отверстий является управление режимами обработки в ходе операции на основе полученных данных о действительных условиях протекания процесса.

Особенно актуальна эта задача при сверлении конструкционных материалов спиральными сверлами, которые широко распространены, так как процесс сверления является основным при получении отверстий в сплошном материале.

Как правило, период стойкости режущего инструмента определяется временем, назначаемым по справочным данным в зависимости от обрабатываемого материала. По истечении этого времени производят переточку сверла или же его замену. При этом данные приведенные в справочных источниках справедливы для однородного материала для конкретных условий протекания процесса обработки. Из этого следует, что ресурс режущего инструмента может быть использован не рационально.

В связи с вышеизложенным процесс обработки сверлением предлагается производить непрерывно до достижения инструментом величины предельного износа. Это возможно путем корректирования режимов сверления по ходу протекания операции, при которых износ инструмента будет протекать таким образом, что позволит повысить и его стойкость, и производительность обработки.

Выше оговоренное предложение особенно может показать результативность при обработке таких труднообрабатываемых материалов как коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т.

Следовательно, выявление возможностей повышения качества обработки, исследование влияния отдельных технологических факторов на характер протекания процесса, разработка и совершенствование методов и средств автоматизации и управления процессом сверления является актуальной задачей в области автоматизации технологических процессов в машиностроении.

Для повышения эффективности процесса сверления необходимо разработать комплекс математических моделей, учитывающих изменение состояния технологической системы за период стойкости режущего инструмента. Этого можно достичь применением переменных режимов обработки по мере износа сверла и подачи в зону резания разработанных новых составов СОТС.

Совокупность выше оговорённых факторов ставит на данный момент задачу, решение которой позволит улучшить качество обработанной поверхности, уменьшить время обработки и повысить стойкость сверла.

Степень разработанности темы. Большой вклад в создание фундаментальных положений обеспечения точности и качества в теории резания, разработке новых способов активации и совершенствованию СОТС, используемых при лезвийной обработке заготовок, осуществлен в исследованиях: Ю.Н. Внукова, В.Н. Латышева, А.С. Верещаки, А.Д. Макарова, Л.В. Худобина, Ф. Якубова, Е.Г. Бердичевского, В.В. Маркова, А.Н. Резникова, А.Г. Суслова, В.А. Носенко, Ю.Г. Кабалдина, Е.С. Киселева, А.Г. Наумова, В.Н. Подураева, И.Д. Ахметзянова, М.И. Клушина, С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера, Б. Ивковича, П. Барлоу, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Е. Дойла, М. Мерчанта, Е. Хорла, Р.Н. Ошера и других. Исследования динамических процессов, происходящих в технологической системе при сверлении отверстий посвящены работы В.А. Кудинова, К.М. Костюкова, М.М. Тверского, Л.С. Мурашкина и других. Раскрытию особенностей процесса сверления глубоких отверстий, а также вопросам создания специализированного оборудования посвящены известные работы В.Л. Заковоротного, В.Н. Подураева, В.А. Остафьева, В.И. Закамалдина, В.А. Полетаева, И.Д. Румянцевой и других.

Исходя из разработанных математических моделей сверления обосновано теоретическое определение собственных частот колебаний системы и ее элементов с разработкой методов их подавления. При этом представленные модели не учитывают особенностей явлений, происходящих в зоне обработки и динамических свойств процесса резания, в частности поперечные смещения сверла. Как показал анализ научно-технической литературы, известные способы и методы по активации и разработке новых эффективных СОТС могут быть

существенно доработаны. Неисследованным, незатронутым остается использование наноглинистых минералов листовой структуры в качестве присадки к масляным СОТС, с целью увеличения стойкости режущего инструмента и улучшения качества обработки поверхностей.

Известные математические модели моделирующие составляющие силы резания, температуру в зоне контакта, износ инструмента, его стойкость, производительность операции имеют ограниченную область применения, и не подходят для оптимизации построения граничных циклов сверления отверстий в деталях из стали 12Х18Н10Т.

Целью диссертационной работы является повышение производительности операции сверления отверстий на основе разработки комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных свёрл из быстрорежущих сталей с материалом заготовки в деталях из стали 12Х18Н10Т.

Основные задачи исследования:

1. Для установления взаимосвязей между входными и выходными переменными рассмотреть операцию сверления отверстий в деталях из стали 12Х18Н10Т как динамическую систему.

2. Выявить и формализовать взаимосвязи между входными технологическими факторами и выходными параметрами процесса: составляющими силы резания, температурой в зоне контакта, износом инструмента, его стойкостью, производительностью операции и показателями качества при сверлении отверстий в деталях из стали 12Х18Н10Т.

3. Разработать методики исследований и осуществить экспериментальную идентификацию разработанных моделей.

4. Разработать методику расчёта оптимальных по скорости съёма материала циклов сверления отверстий в деталях из стали 12Х18Н10Т, с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости сверла.

5. Произвести оценку эффективности полученных результатов при опытно-промышленной эксплуатации.

Объект исследования – процесс сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T.

Предмет исследования – закономерности процесса формирования отверстий в деталях из стали 12X18H10T, спиральными сверлами из быстрорежущих сталей с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости сверла.

Научная новизна полученных результатов.

1. Установлены взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T, с учетом изменения состояния технологической системы с течением времени вследствие износа инструмента, что позволяет прогнозировать поведение технологической операции, при изменении режимов резания.

2. Разработаны методология построения предельных граничных циклов, реализующих максимально достижимую производительность сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T спиральными сверлами из быстрорежущих сталей.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в повышении производительности процесса сверления и качества формируемых поверхностей путем использования математической модели сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающей поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе;

- в разработке комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных сверл с материалом заготовки при введении в зону обработки масляных СОТС с наноглинистыми минеральными присадками;

- в предложенном новом составе масляной СОТС с улучшенными триботехническими свойствами (патент UA №82068 U) [64], снижающем энергозатраты и шероховатость обработанных поверхностей и повышающем стойкость сверла;

- в разработанной конструкции для определения коэффициента трения смазочных материалов (патент RU №192398 U1) [62];

– в разработанном устройстве для подачи смазывающих технологических сред (патент RU №202898 U1) [63] в зону резания в виде аэрозоля, под давлением, поливом или свободно падающей струей в зависимости от требований технологической операции, одновременно позволяющий барботировать подаваемую СОТС.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследований служат фундаментальные и прикладные положения теории технологии машиностроения, сопротивления материалов, теории резания при лезвийной обработке и теории математического моделирования.

Теоретические исследования, приведенные в диссертации, базируются на основах классической механики, системного и математического анализов, методах математической статистики, а также основаны на использовании математических методов обработки результатов экспериментов, правильности проведения теоретических и экспериментальных исследований с комплексом цифровой записи сигналов. На основе теории резания и триботехнических особенностей механической обработки проведены теоретические исследования, которые были подтверждены экспериментальными испытаниями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурная модель формирования оптимальной системы процесса сверления с учетом установления взаимосвязей между входными и выходными переменными, и алгоритм повышения производительности процесса сверления.

2. Динамическая математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе, составляющие силы резания, температуру в зоне контакта, износ инструмента, его стойкость, влияние наноглинистой присадки к масляной субстанции СОТС на производительность операции и показатели качества при сверлении отверстий в деталях из стали 12X18H10T.

3. Результаты оптимизации технологической операции, позволяющие, повысить производительность сверления и увеличить стойкость инструмента в

1,4-2,9 раза в сравнении с существующими технологиями.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно или при непосредственном его участии. Работы [95, 125] выполнены без соавторства. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в публикациях [2, 1, 106] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований; в работе [78] разработана динамическая математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла; в работе [10] предложена математическая модель силовой составляющей процесса сверления; в работах [107, 108, 3] подобрана присадка обладающая триботехническим эффектом и показан механизм проявления триботехнического эффекта НГМП в составе масляной СОТС; проведены экспериментальные исследования на операциях сверления, на которых проявляется триботехнический эффект в масляных СОТС при подаче их в зону резания [94, 96, 93]; выполнено моделирование оптимального состава наноглинистых минеральных присадок в составе СОТС [92]; в патентах [62, 63, 64] авторский вклад составляет 30%.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей и обоснованностью принятых допущений. Адекватность полученных результатов подтверждена корректным использованием современных методов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами внедрения в производство. Результаты диссертационной работы, в частности, применение математической модели сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающей износ режущих кромок, граничные циклы управления процессом сверления с подачей в зону резания масляной СОТС с добавками наноглинистых минералов внедрены в производство на завод АО «Пневматика» (г. Симферополь), ФГБУН «НИИСХ Крыма» (г. Симферополь) и в учебный процесс двух кафедр – технологии машиностроения и автомобильного транспорта Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический

университет имени Февзи Якубова».

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах, а именно на: XVI-XXI научно-теоретических конференциях профессорско-преподавательского состава и студентов ГБОУВО РК КИПУ (г. Симферополь, 2010 – 2019 гг.); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта» (г. Севастополь, 2012 и 2014 гг.); Международной научно-технической конференции «Инновационные материалы и технологии: Достижения. Проблемы. Решения» Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, (г. Комсомольский-на-Амуре, 2013 г. (заочно); Седьмой конференции молодых ученых и специалистов – «Сверхтвердые, композиционные материалы и покрытия: получение, свойства, применение» (пгт. Морское, 2013 г.); Международной научно-методической конференции «Проблемы подготовки кадров автомобильной отрасли и пути их решения». (г. Харьков, 2013 г.); XXI Международной научно-техническом семинаре «Высокие технологии: тенденции развития» (г. Харьков, НТУ «ХПИ» 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2015-2020 гг.).

Публикации. Материалы диссертации отражены в 17 работах. В рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК и приравненных к ним (п.10 Постановления Правительства РФ №723 от 30.07.2014 г.), опубликовано 6 статей; 4 – в зарубежных изданиях, входящих в базу данных Scopus и получены три патента на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных литературных источников, содержащих 126 наименований, 8 приложений с патентной документации и актов внедрения результатов работы. Объем диссертации – 167 страниц, 12 таблиц и 63 рисунка.

ГЛАВА 1.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Конструктивные особенности деталей, изготавливаемых из стали 12X18H10T

Для изготовления деталей, работающих при высоких температурах и нагрузках, на машиностроительных предприятиях широкое применение получили стали и сплавы, обладающие высокой прочностью, жаро- и коррозионно-стойкостью. Наибольшее распространение из данной группы сталей получила коррозионностойкая сталь 12X18H10T. Проблема механообработки таких сталей и сплавов, не смотря на большое количество исследований в этой области, остается актуальной.

Сталь 12X18H10T относится к труднообрабатываемым материалам, ее физико-механические и химические свойства, а также теплофизические показатели усложняют процесс резания, что сравнивается с обработкой таких материалов, как титан и сплавов титана.

Однако, правильное планировании процесса резания с применением глубоких знаний в данной области и с использованием новых алгоритмов обработки, существенно позволит увеличить ресурс режущего инструмента.

Данная группа материалов широко применяются в различных отраслях промышленности, для изготовления таких ответственных деталей, как: двигатели летательных аппаратов (турбины, детали камеры сгорания, кронштейны), детали космических аппаратов (обтекатели, приводные механизмы, детали энергетических установок), детали автомобилей (шатуны, выпускные клапана, турбины), коробки перемены передач, детали работающие в морской воде, суставные протезы, детали различных соединений и др.

В таблице 1.1 представлены химический состав и механические свойства стали 12X18H10T.

Таблица 1.1

Химический состав и свойства стали 12Х18Н10Т

Химический состав (%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,12	1,00	2,00	0,045	0,030	17,00-19,00	11,50–12,50
Механические свойства						
Твердость HB 130-180.						
Предел текучести 185 Н/мм ² .						
Прочность при разрыве 490-690 Н/мм ² .						
Относительное удлинение при разрыве 45%.						

Основные типовые детали, которые изготавливаются из стали 12Х18Н10Т представлены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Типовые детали, изготавливаемые из стали 12Х18Н10Т в аэрокосмической промышленности, содержащие точные отверстия.

К ним также относятся детали авиационных двигателей и турбин, такие как диски, оболочки, кольца и валы. При этом трудоемкость операции сверления данной группы деталей занимает до 25% от всех видов обработки.

1.2 Технологические методы получения точных отверстий в деталях машиностроительного профиля

Критерием эффективности любой технологической операции является точность и качество получаемой поверхности, что в итоге сказывается на себестоимости и производительности процесса обработки. Эти показатели формируются исходя выбранных режимов обработки и типа режущего инструмента. В современном производстве сверление отверстий имеет важную роль и стремятся к повышению эффективности их обработки [74]. Процесс сверления в ответственных деталях является сложной технологической операцией, и усложняется при сверлении труднообрабатываемых материалов, что определяют их качественные характеристики.

Для получения различной точности отверстий при изготовлении деталей применяют такие операции как сверление, растачивание, фрезерование и развёртывание [100].

Выбор инструмента при сверлении отверстия зависит от таких параметров как диаметр отверстия и его глубина. Выбор режимов резания определяется в зависимости от режимов обработки. От свойств обрабатываемого материала и жесткости технологической системы зависит правильный выбор геометрии инструмента и инструментального материала.

При обработке отверстий в сплошном материале получили широкое распространение спиральные сверла, которые позволяют получить точность поверхности до 9-го качества с использованием современного оборудования.

На сегодняшний день наибольшую популярность получили сверла из быстрорежущей стали и твердого сплава, а сверла со сменными головками и пластинами [73] при получении отверстий малых и средних диаметров.

Сверла из быстрорежущей стали (рисунок 1.2, *а*) и цельного твёрдого сплава (рисунок 1.2, *б*) применяются при сверлении любых групп обрабатываемых материалов и глубиной до 7 диаметров.

Цельные твердосплавные сверла имеют ряд преимуществ, однако при сверлении данными типами сверл ведут к увеличению силы резания. Отсутствие на ленточках вспомогательных задних углов также ведет к увеличению сил трения, что неблагоприятно сказывается на качестве обработанных поверхностей [6, 105]. Такие сверла обладают высокой прочностью, однако ограничивается их применение для получения отверстий диаметром до 20 мм.

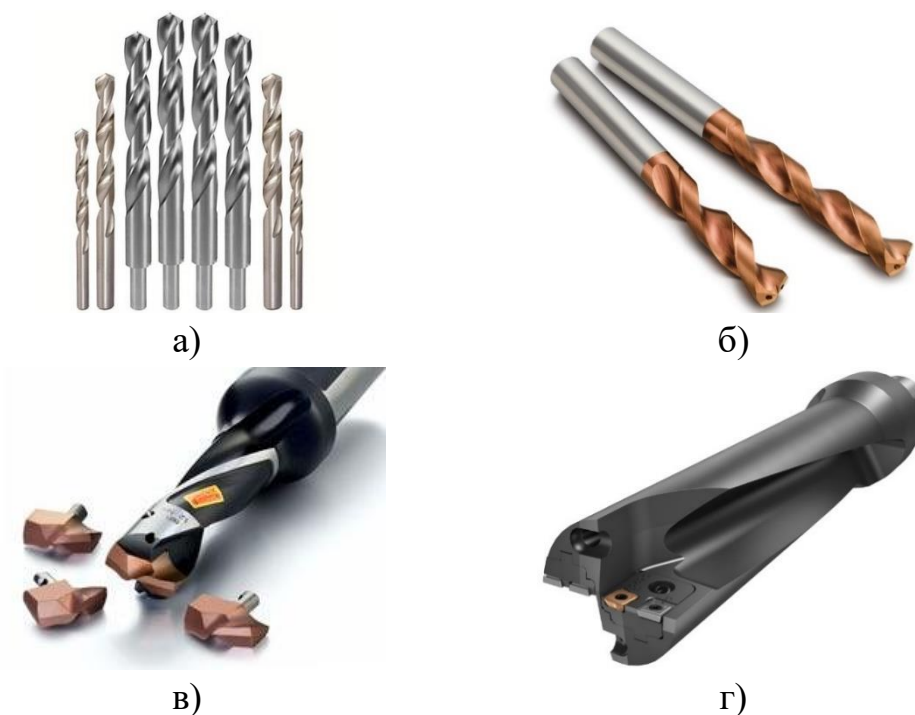


Рисунок 1.2. Типы применяемых сверл для получения отверстий

а) – сверла из быстрорежущей стали; б) – цельные твердосплавные сверла;
в) – сверло со сменными головками; г) – сверло со сменными пластинами.

Применение сверл со сменными головками (рисунок 1.2, в) для получения отверстий диаметром от 10 до 33 мм, а за счет жесткой конструкции корпуса может работать с высокими скоростями резания и подачами.

Сверла со сменными пластинами (рисунок 1.2, г) применяются для получения отверстий диаметром до 63,5 мм в любых материалах. Геометрия режущей части пластин и его инструментальный материал подбирается в зависимости от марки обрабатываемого материала. Специальной форма сменных пластин позволяет

снизить силы резания, увеличить точность и производительность получаемых отверстий.

В настоящее время к традиционным областям использования фрезы добавляется и получение отверстий. Например, использование концевой фрезы из цельного твердого сплава позволяет производить обработку любых материалов для получения отверстий на высоких скоростях резания [53], используя метод винтовой или круговой интерполяции.

При получении отверстий методом винтовой интерполяции (рисунок 1.3) фреза движется по винтовой траектории, и одной фрезой можно выполнять отверстия различных диаметров. Такой метод обработки подходит для существующих отверстий или для их исправления.

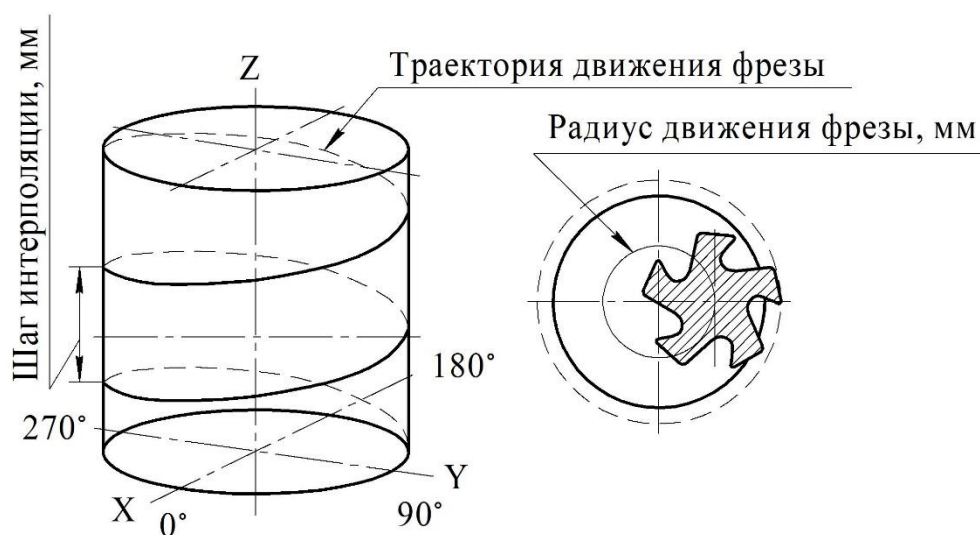


Рисунок 1.3. Применение метода винтовой интерполяции для формирования отверстия.

Применение метода круговой интерполяции (рисунок 1.4) возможна только для увеличения диаметра существующего отверстия, финишной обработки или для получения дна глухих отверстий. Принцип работы заключается в следующем. Фреза совершает одновременно вращательное движение вокруг своей оси и движение по кругу относительно неподвижной заготовки с определенной подачей.

Безусловно, получение отверстий операцией фрезерования является универсальным методом обработки по сравнению с операцией сверления, так как

отсутствует необходимость постоянной замены инструмента в зависимости от диаметра получаемого отверстия.

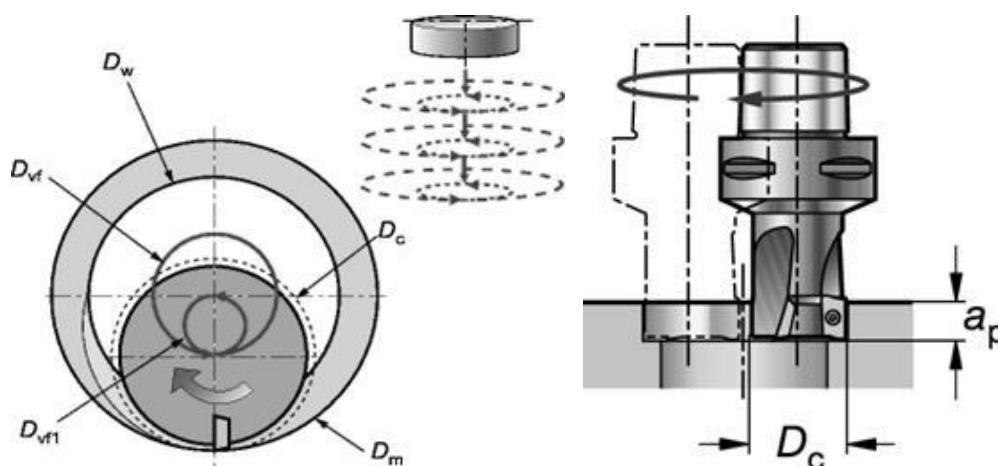


Рисунок 1.4. Формирование обрабатываемого отверстия методом круговой интерполяции

Однако, составляющие силы резания при расфрезеровании отверстий будут направлены перпендикулярно оси инструмента, когда на сверло силы действуют вдоль оси, что в результате приведет к неравномерным отжикам инструмента и повлияет на точность отверстия.

В работе [68] приводится сравнительная таблица применения режущих инструментов для получения отверстий, среди которых цельные твердосплавные сверла по сравнению с другими имеют высокое качество получаемых поверхностей и производительность. Однако стоимость таких сверл выше сверл из быстрорежущих сталей в несколько раз, а точность обработки находится в пределах 9 квалитета, следовательно, необходимость применения сверл из твердого сплава отпадает.

При необходимости окончательную обработку отверстий получают развертыванием, которая позволяет получать точность отверстия до 7 квалитета и получить шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм.

Известно, что глубина резания при операции развертывания является небольшой и поэтому предварительно полученное отверстие должно быть с достаточной точностью.

1.3 Точность и качество получаемых отверстий

1.3.1 Геометрические дефекты отверстий при обработке

Применение сверл и оснастки с недостаточной жесткостью приводит к снижению качества получаемых поверхностей, что сопровождается определенными дефектами, представленные на рисунке 1.5.

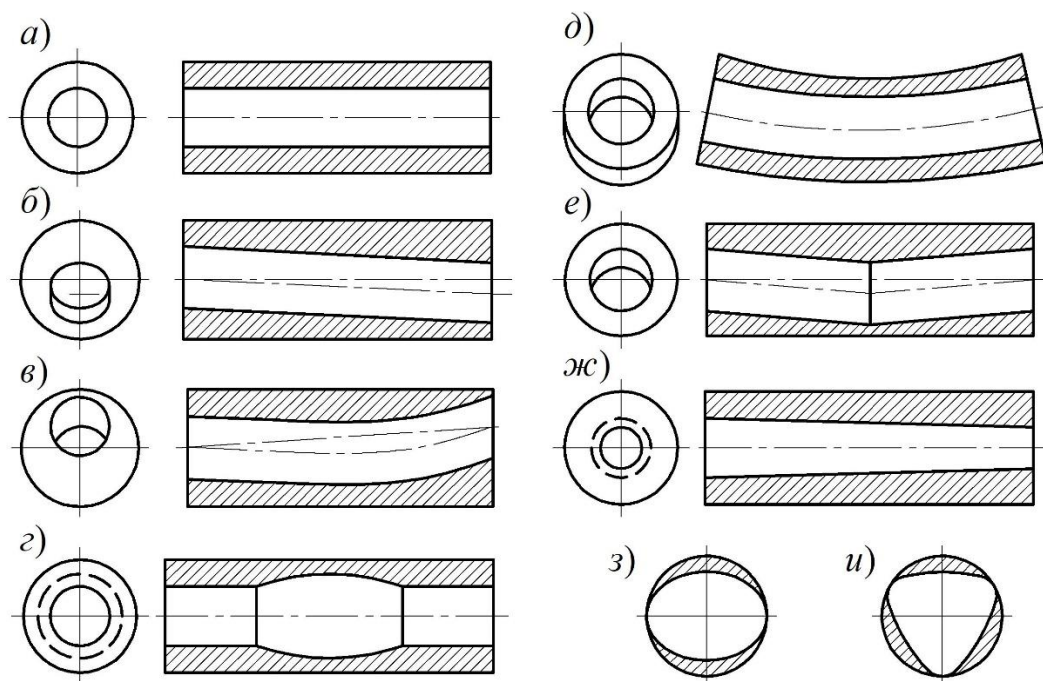


Рисунок 1.5. Возможные дефекты при сверлении отверстий:

а – просверленное отверстие без увода; *б* – увод оси отверстия; *в* – кривизна оси отверстия вызванное уводом; *г* – бочкообразность; *д* – кривизна оси отверстия, вызванная короблением; *е* – излом оси отверстия от двустороннего сверления; *ж* – конусность; *з* – овальность; *и* – огранка.

В работах [110, 117, 120, 121] авторы, занимающиеся исследованием процесса сверления, приводят виды дефектов отверстий, которые разделены на четыре группы.

Первая группа дефектов связана с некруглостью отверстий, возникающих вследствие неоднородности физико-химических свойств обрабатываемого материала.

Вторая группа дефектов характеризуется образованием огранки в поперечном сечении отверстия. Возникновение огранки связано с вибрациями

заготовки, при этом количество граней может изменяться с увеличением глубины отверстия. Совпадение частот колебаний инструмента с частотой вращения шпинделя и провоцирует появления огранки, размер которой определяется от конструктивных параметров режущего инструмента, погрешности технологической системы и частоты собственных колебаний [19].

Вибрационная составляющая процесса резания оказывает влияние и на торцевую поверхность полученного отверстия (рисунок 1.6).

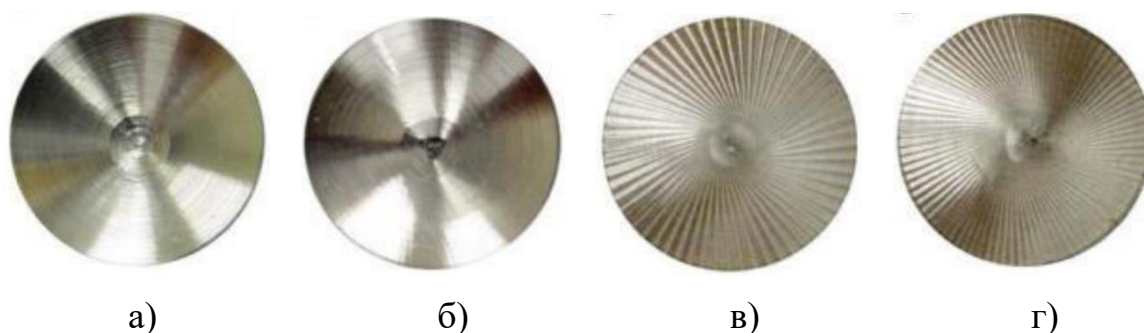


Рисунок 1.6. Качество поверхности дна отверстия после обработки:

а) приемлемая поверхность; *б)* трехгранная поверхность, образуемая вихревыми вибрациями; *в)* «солнечный узор» вызванный появлением крутильно-осевыми колебаниями; *г)* поверхность, образуемая в результате вихревых вибраций и крутильно-осевых колебаний.

Третья группа дефектов характеризуется образованием бочкообразности и конусности отверстий. Бочкообразность отверстий связана с неправильной заточкой сверла, приводящее к неправильному распределению сил резания, действующие перпендикулярно оси сверла на режущие кромки. Износ направляющих сверл или калибрующих периферийных кромок ведет к образованию конусности.

К четвертой группе относятся дефекты, образующиеся вследствие износа периферийных кромок, неудовлетворительного состояния направляющих сверл, заклинивания стружки и вывод инструмента из отверстия, что ведет к появлению царапин, высокой шероховатости и задиров.

1.3.2 Факторы, влияющие на качество обработанной поверхности

Качество поверхности отверстия неразрывно связано с процессом обработки режущим инструментом, влияющие на параметры качества обработанной поверхности, к которым относится отклонение от формы, волнистость и шероховатость.

Шероховатость обработанной поверхности обуславливаются различными факторами, которые делятся на три группы [44, 122, 104].

1. Влияние геометрии процесса резания.
2. Возникновение упругой и пластической деформации обрабатываемого материала.
3. Возникновение вибраций и автоколебаний в технологической системе.

Износ режущих кромок режущего инструмента провоцирует рост сил резания, температуры и возникают адгезионные разрушения, что снижает качество обработанной поверхности. Формирование нароста на передней поверхности инструмента, образующая адгезионным схватыванием обрабатываемого материала с материалом инструмента, под влиянием высоких давлений и температур, также участвует в процессе резания. Степень нароста зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, скорости резания, условий резания, геометрических параметров инструмента и др. Через некоторое время нарост разрушается и данный процесс повторно возобновляется.

Наличие нароста имеет и положительную сторону, которая изменяет поверхность режущей кромки, изменяя передний угол инструмента, облегчая процесс стружкообразования и защищая лезвие от повышенного нагрева и износа.

Стружкообразование происходит при пластической и упругой деформации обрабатываемого материала. При рассмотрении данного процесса принимают, что вершина режущей кромки имеет острую поверхность. Однако в действительности ее вершина имеет радиус скругления, по которой и происходит процесс стружкообразования. Упруго-пластические деформации сопровождаются высокими температурами, приводит к разрушению металла и образованию ювенильных поверхностей.

Процесс стружкообразования при сверлении усугубляется по мере увеличения глубины сверления, так как условия работы сверла усложняются.

На качество обработанной поверхности в значительной степени оказывает подача смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) в зону резания. Однако, с увеличением глубины отверстия усложняется подача свежей СОТС, увеличивается время соприкосновения стружки об стенки формируемого отверстия. По мере заглубления инструмента стружка не успевает удалиться через стружечные каналы сверла, приводящее к накоплению стружки, а иногда даже ее пакетирование в отводящих каналах сверла. Это в свою очередь ведет к возрастанию температуры в зоне резания и крутящего момента.

Качество и тип СОТС влияет на процесс удаления стружки [17], что вносит также вклад на качество шероховатости получаемого отверстия. Низкое качество СОТС провоцирует избыточную радиальную силу на режущие кромки сверла перпендикулярно его оси и формирует бочкообразность отверстия [17], ведущее к неисправимому браку.

Результаты анализа ранее выполненных работ показывают, что, несмотря на большое количество экспериментальных исследований, связанных с усовершенствованием конструкции режущего инструмента, повышением эффективности применяемых при сверлении СОТС и путем оптимизации режимов резания не удается устранить негативные явления, сопровождающее процесс сверления – это возрастание силовой нагрузки на инструмент в процессе его заглубления, влекущее за собой увод оси и нарушение геометрии отверстия.

В работах [7, 33, 35, 38, 123] приводятся исследования по влиянию автоколебаний при механической обработке на параметры шероховатости и волнистости обработанной поверхности (рисунок 1.7). Установлено, что параметры шероховатости и волнистости пропорционально зависят от амплитуд автоколебаний, и чем они выше, тем хуже данные параметры.

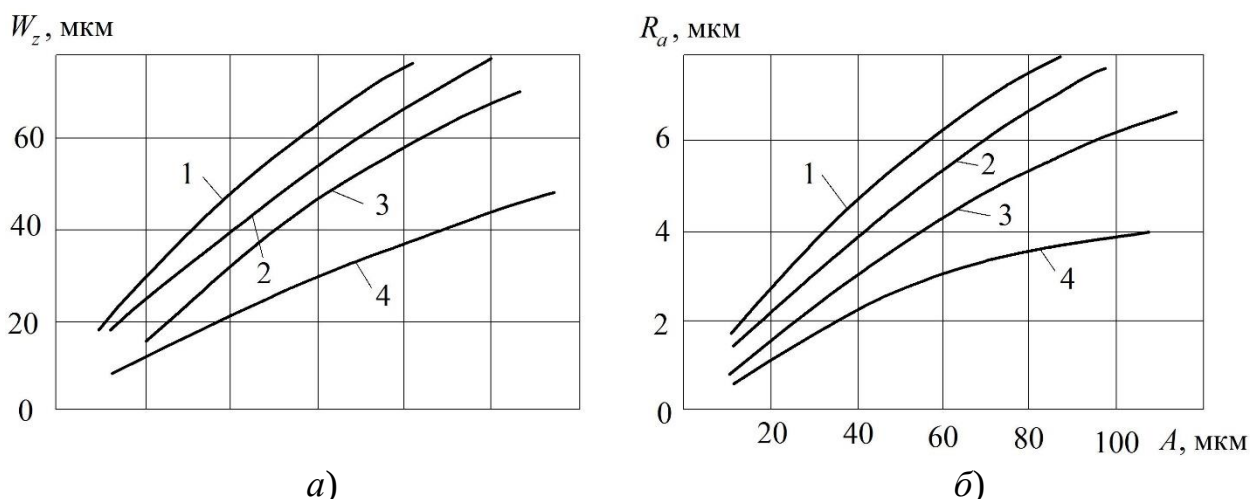


Рисунок 1.7. Графики зависимости высоты волнистости от амплитуды автоколебаний (а) и высоты микронеровностей от амплитуды автоколебаний (б):

1 – сталь 08X15H5Д2Т; 2 – сталь 12X18H9Т; 3 – титановый сплав ВТ9 (1-3 – при $f = 140 \dots 190$ Гц); 4 – сталь 08X15H5Д2Т (при $f = 500 \dots 600$ Гц).

Зависимость амплитуды автоколебаний на параметры высоты микронеровностей имеет менее четкую зависимость, но такая тенденция имеется. С увеличением амплитуды колебаний наблюдается снижение параметров шероховатости [86].

Существенное влияние на параметр шероховатости обработанной поверхности оказывают скорость резания и величина подачи. Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение скорости резания при сверлении ведет к ухудшению качества поверхности, связанное с процессом наростобразования, высоких температур и задиров вследствие выхода стружки. Аналогичная тенденция наблюдается при необоснованном увеличении величины подачи аналогично ведет к ухудшению качества обработанной поверхности.

При увеличении глубины сверления и скорости подачи сверла, как показывают экспериментальные исследования, приводит к увеличению сил резания, обуславливающих увеличение упругих деформаций технологической системы и увеличению погрешности продольного сечения и качества обработанной поверхности.

1.4 Методы назначения режимов резания и пути их оптимизации

Как правило, на сегодняшний день режимы обработки при сверлении, назначаются несколькими методами [5, 9, 21, 24, 50]:

1. Расчетно-аналитический (по эмпирическим формулам).
2. Статистический или табличный (по справочным данным).
3. По каталогам фирм производителей инструмента.
4. С помощью прикладных программ.

Расчетно-аналитический метод назначения режимов резания использует эмпирические формулы, полученные в результате однофакторного эксперимента, что не позволяет в полной степени оценить влияние переменных на процесс резания. Данные коэффициенты являются переменными и могут изменяться в несколько раз, так как зависят от физико-механических свойств материала и условий обработки. Данный метод не обеспечит предъявляемые требования к готовой детали.

Статистический или табличный метод, который позволяет назначать режимы обработки по справочным данным является очень трудоемким, требующий анализа технической литературы. При этом необходимо знать свойства обрабатываемого материала, допуск на размер, геометрию и инструментальный материал режущего инструмента, шероховатость получаемой поверхности и т.д. Такой метод на сегодняшний день не является рациональным, он также не позволит получить заявленные требования к готовой детали.

В последнее время при обработке материалов резанием широкое распространение получил метод назначения режимов резания по каталогам фирм производителей инструмента [100]. Однако, использование данного метода для обработки материалов отечественного производства не является оптимальным, так как параметры обработки указаны с большим разбросом, что не позволит назначить режимы обработки с целью получения заданного качества детали. К тому же это может привести к снижению производительности процесса [74]. Это связано с тем, что технолог должен определить зарубежный аналог обрабатываемого материала

по справочной литературе и марку режущего инструмента в зависимости от условий обработки, так как в каталогах отсутствуют материалы отечественного производства.

Определение режимов резания с помощью прикладных программ позволяет достаточно точно рассчитать режимы резания для любой марки обрабатываемого материала. Данный метод основан на использовании справочного материала и эмпирических формул с расчетно-аналитического метода, также данный метод позволяет обеспечить требуемые характеристики готовой детали, учитывая предъявляемые параметры к точности обработки и поверхностного слоя.

Однако, данный метод не учитывает жесткость инструмента, закрепление заготовки и состояние технологической системы, что влияет на заданную точность обрабатываемой детали. В процессе обработки возникают колебания и вибрации, негативно сказывающие на качество обрабатываемой поверхности и ведущие к снижению стойкости режущего инструмента. Поэтому для обеспечения заданной точности и качества получаемой поверхности с целью избежания указанных проблем, режимы резания занижают, что ведет к снижению производительности.

Как показывает мировая практика, наиболее эффективным способом обработки является максимальная производительность процесса с приемлемой экономической стойкостью инструмента. А имеющиеся рекомендации, методики по назначению режимов и выбора режущего инструмента не позволяют обеспечить максимальную производительность с одновременно получением требуемого качества и точности обрабатываемой поверхности.

Это связано с тем, что ими не учитываются состояние элементов технологической системы, в особенности станок на котором производится обработка и материал заготовки. Все это приводит к интенсивному износу инструмента и потери его работоспособности.

Обзор литературы, посвященных обработке материалов сверлением показал, что имеется достаточно большое количество методов, позволяющих повысить производительность процесса.

В работе [9] приводятся критерии, обеспечивающие оптимальный режим обработки такие как: точность и качество обработанной поверхности, соответствующих технической документации, высокая производительность операции и минимальная себестоимость обработки.

Также в настоящее время применяются различные методы математического моделирования по оптимизации процесса резания [102].

Это численные методы, основанные на вариационных принципах Журдена (принцип полной деформации) и Лагранжа (принцип минимальной энергии). Суть данных методик основывается на определении класса возможных кинематических движений в рассматриваемый момент времени с дальнейшим определением экстремума функций. Более подробно механика деформируемого твердого тела представлена в работе [59], где рассматривается решение краевых задач механики.

Метод линий скольжения, основан на пластической деформации цилиндрического образца. Данный метод используется для моделирования врезания режущего клина инструмента в обрабатываемый материал и снятие стружки. Это позволяет определить напряжения в теле при его деформации, на контактной поверхности и определить усилие деформации [18]. Однако данный метод решения не способствует в полной мере описать протекание процесса резания.

В настоящее время для решения математических и инженерных моделей получи метод конечных элементов [58], суть которого заключается в аппроксимации исследуемых функций дискретной модели и разложение ее на множество кусочно-элементных функций, называемые конечными элементами [37].

Реализация данного метода осуществляется с помощью прикладных программ на ПК, позволяющие моделировать процесс резания и определять такие физические величины как напряжения, действующие на режущий инструмент и заготовку, силы резания (осевая сила и крутящий момент), температуру резания, количественную оценку пластической деформации при резании и т.д.

Такие прикладные программы позволяют смоделировать процесс резания, однако полученные результаты не будут универсальными для всех режимов механической обработки. Это связано с тем, что математическая модель процесса резания строится для стандартизованного материала, который выбирается из базы программы, не соответствующий марке реального материала обрабатываемой заготовки и как следствие это ведет к расхождению с результатами, полученными экспериментально.

В последнее время для моделирования процессов механической обработки используются аппаратно-программные комплексы, например, CutPro, позволяющий на основе деформационной модели резания рассчитать область устойчивого резания. Данным программным обеспечением учитываются физические процессы резания материалов, обладает достаточно высокой точностью расчетов, что подтверждается экспериментально. Задаваемыми данными являются материал режущего инструмента, его геометрия, параметры технологической системы и материал заготовки.

Основным недостатком вышеуказанной программы является расчет режимов резания при операции сверления для предварительно просверленных отверстий, что ограничивает ее применение для достижения максимальной производительности процесса.

Самыми прогрессивными технологиями для моделирования процессов резания являются высокоуровневые языки программирования как Delphi, C++, Fortran, Java, описание которых является трудоемким процессом.

Если в моделируемом процессе известны количественные характеристики и все функциональные зависимости, возможно использование такой прикладной программы как MatLab, содержащая большое количество различных программных библиотек. Конечно же при математическом описании процесса резания необходимо учитывать такие параметры как коэффициент трения, угол среза, напряжение при сдвиге и т.д., зависящие от величины подачи, скорости резания, геометрии режущего инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

1.5 Математическое моделирование процесса сверления

Исследования направленные на моделирование динамики процесса сверления посвящены ряд работ как отечественных, так и зарубежных авторов, которые обусловлены двумя факторами: 1) повышение качества и точности обработанных поверхностей путем назначение благоприятных режимов резания, не приводящих к вибрациям в процессе резания; 2) обработка глубоких отверстий за счет применения вибрационного дробления стружки [37].

Известны подходы для изучения процесса сверления, в которых моделирование процесса резания происходит путем произведения силы резания на площадь слоя срезаемой стружки. Однако при одинаковой величине подаче и частоте вращения шпинделя, на сверло, имеющую различную геометрию, действуют различные силы резания при одинаковой толщине слоя стружки, что влияет на производительность процесса.

В других методах предлагается режущие кромки сверла разделить на определенное количество сегментов, рассматривая их отдельно и определяя силы резания на каждом участке, что является эффективным методом по сравнению с вышерассмотренным. Полученные результаты будут действительны для рассматриваемой геометрии сверла и не требуют проведения экспериментов. Это в свою очередь позволяет исследовать различные геометрии сверла на силы резания, а также сверление отверстий в деталях с наклонной плоскостью.

Главные режущие кромки сверла воспринимают большую часть тангенциальной силы и в меньшей радиальную и осевую составляющие. Поперечная режущая кромка оказывает влияние на точность центрирования, на которую приходится основная нагрузка осевой силы. При моделировании процесса сверления поперечную кромку учитывают только для расчета осевой силы, а наибольший интерес представляют главные режущие кромки.

При моделировании необходимо также учитывать влияние ленточек сверла, которые формируют качество обработанной поверхности и оказывающие незначительное влияние на величину крутящего момента.

Наличие вибраций в процессе сверления приводит к крутильно-осевым колебаниям сверла, что оказывает негативное влияние на качество поверхности отверстия.

В работе [115] приводятся исследования, посвященные изучению отклонения формы отверстий от влияния асимметрии режущих кромок сверла. При удалении объема материала на операциях сверления, форма отверстия может иметь отклонение от округлости, увеличенный диаметр, отклоняться от оси вращения шпинделя, которые зависят от действующих на сверло сил резания [116].

Разработанная математическая модель, приведенная Lee в работе [118] описывает формирование отверстия сверлом, имеющую многоугольную форму (огранку), примеры которых представлены на рисунке 1.8.

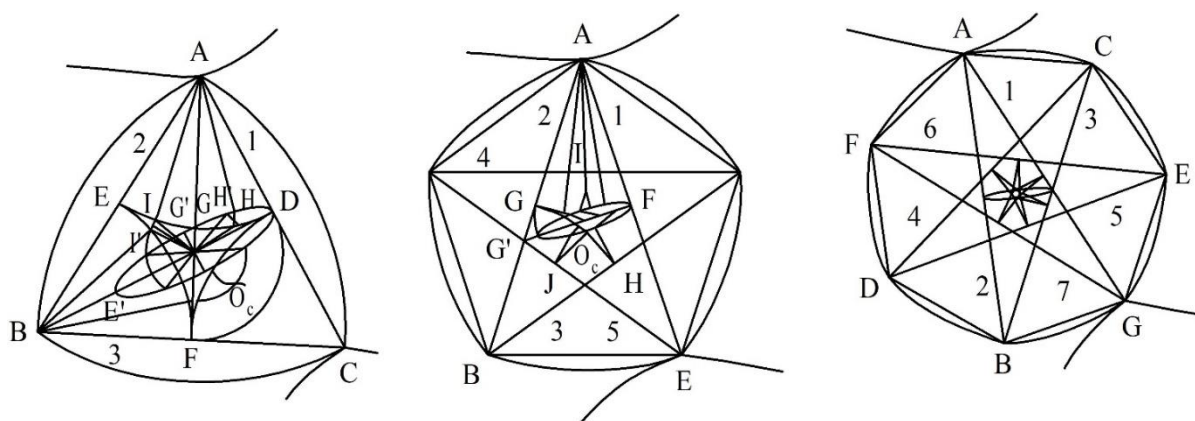


Рисунок 1.8. Формы полученных отверстий при сверлении [115]:
a – треугольная форма; *б* – пятиугольная форма; *в* – семиугольная форма.

Автором предлагается определять радиус отверстия по зависимости:

$$R_h(t) = [X_1^2(t) + Y_1^2(t)]^{1/2} = \left\{ e^2(t) + r^2(t) + 2e(t)r(t) \cos \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_s} + 1 \right) \omega_s t + (\varepsilon + \psi) \right] \right\}^{1/2}. \quad (1.1)$$

Количество сторон многоугольника определится уравнением:

$$N_p = \frac{\omega_r}{\omega_s} + 1. \quad (1.2)$$

На увеличение числа сторон многоугольника оказывает влияние глубина просверленного отверстия, а также максимальная частота радиального смещения сверла [115]. При этом не учитывается поведение технологической системы.

В работе [119] предложен метод по определению коэффициента резания на основе калибровочных тестов и разработаны аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать радиальное смещение сверла и силы резания при сверлении.

В дискретной форме передаточная функция шпинделя станка и режущего инструмента запишется как:

$$G(z) = \sum_{k=1}^n R_k \left(\frac{z}{z - e^{S_{1,k}T}} - \frac{z}{z - e^{S_{2,k}T}} \right) \quad (1.3)$$

где $S_{1,k}$ и $S_{2,k}$ – комплексные сопряженные корни рассматриваемой передаточной функции k -ой гармоники.

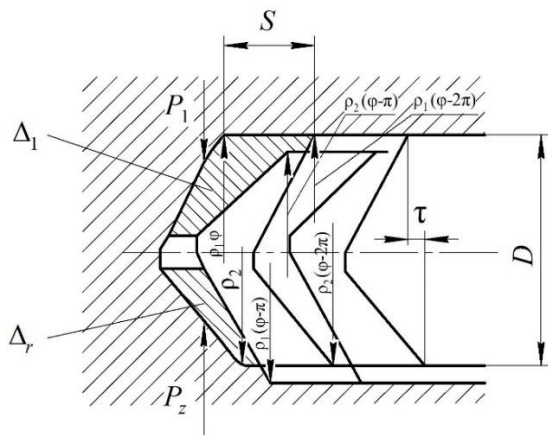
Полученная передаточная функция позволяет рассчитывать силы резания P_x и P_y на каждый угол поворота сверла при перемещении инструмента в направлении X и Y , исходя из сил резания, полученных экспериментальным путем.

Следовательно, радиальные смещения сверла определяются по зависимости:

$$X(z) = G_X(z) \cdot P_X(z) \quad Y(z) = G_Y(z) \cdot P_Y(z) \quad (1.4)$$

Аналитические зависимости (1.3) и (1.4) позволяют предсказать качество обработанных поверхностей и радиальные смещения инструмента на основе сил резания, геометрии сверла и состояние технологической системы.

В работе [27] приведены математические модели процесса сверления на основе изменения величины подачи, разработанные Дерябиным И.П. Им же в работе [28] приводится расчетная схема и математическая модель процесса обработки, при сверлении с большими величинами подачи инструмента, представленная на рисунке 1.9.



$$\rho(\varphi) = \frac{A + 2 \cdot h \cdot O_s \cdot (K_2 - K_1) \cdot \cos(\varphi_n)}{C} - \frac{B \cdot \rho(\varphi - \pi)}{C},$$

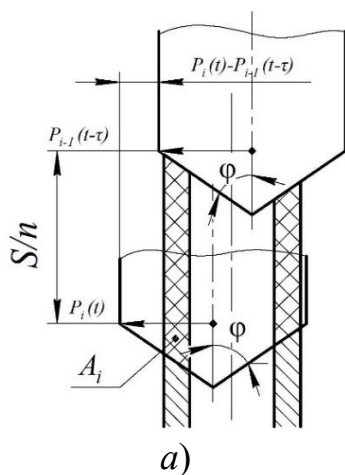
$$A = h \frac{S}{2} \cdot (K_2 - K_1) + h \cdot \tau \cdot (K_2 + K_1) + \frac{D \cdot h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{D \cdot J}{2};$$

$$B = \frac{h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad C = J + \frac{h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad h = \frac{D - D_0}{2}.$$

Рисунок 1.9. Расчетная схема и математическая модель процесса сверления [28].

В работе [75] Салабаев Д.Е. приводит разработанную математическую модель и структурную схему процесса сверления с учетом продольного смещения инструмента, резания по следу, с изменяемой жесткостью технологической системы и коэффициентов координатных связей. Проведенные исследования способствуют снижению шероховатости обработанной поверхности, достигаемая за счет регулирования крутильных колебаний, снижения сил резания и амплитуды колебаний.

В работе [77] Сергеев С.В. приводит математическую модель механической обработки отверстий, учитывающая динамику продольных и кинематику поперечных колебаний сверла, схема которой представлена на рисунке 1.10.



$$\begin{cases} \ddot{X}(t) + k \cdot X(t) = K_1 \frac{\sin(2\omega_{\text{ин}} \cdot t)}{2} \cdot X(t) + \\ + K_1 \cos^2(\omega_{\text{ин}} \cdot t) \cdot Y(t); \\ \ddot{Y}(t) + k \cdot Y(t) = K_1 \frac{\sin(2\omega_{\text{ин}} \cdot t)}{2} \cdot Y(t) - \\ - K_1 \cos^2(\omega_{\text{ин}} \cdot t) \cdot X(t); \end{cases}$$

$$\text{где } K_1 = \frac{K_r}{m} \cdot S$$

б)

Рисунок 1.10. Расчетная схема движения сверла (а) и ее динамическая модель поперечных движений (б) [77].

В работах [109, 111] автора Altintas Y. приводятся модели динамики процесса сверления, учитывающие четыре степени свободы сверла (осевое перемещение, два поперечных смещения и вращение инструмента), расчетная схема которой представлена на рисунке 1.11.

Предложенная модель является наиболее полной из рассмотренных в литературных источниках, позволяющая построить диаграммы с границами устойчивого резания от технологических параметров.

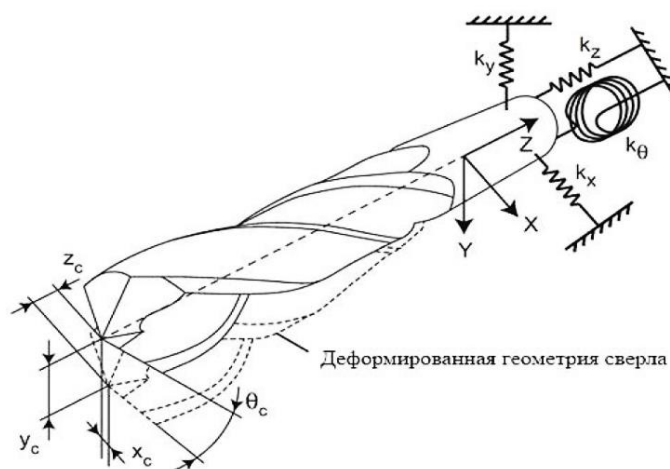


Рисунок 1.11. Расчетная модель динамики спирального сверла.

В работе [120] приводится динамическая модель устойчивого резания, учитывающая нелинейные системы, крутильные, поперечные и осевые вибрации инструмента, которые можно представить в векторно-матричном виде:

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c(t) \\ \ddot{y}_c(t) \\ \ddot{z}_c(t) \\ \ddot{\theta}_c(t) \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{y}_c(t) \\ \dot{z}_c(t) \\ \dot{\theta}_c(t) \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x_c(t) \\ y_c(t) \\ z_c(t) \\ \theta_c(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_x(t) \\ P_y(t) \\ P_z(t) \\ M_{кр}(t) \end{Bmatrix} \quad (1.5)$$

где $[M]$ – матрица масс;

$[C]$ – матрица демпфирования;

$[K]$ – матрица жесткости системы;

$x_c(t)$ – перемещение сверла в направлении оси x ;

$y_c(t)$ – перемещение сверла в направлении оси y ;

$z_c(t)$ – осевое перемещение сверла;

$\theta_c(t)$ – угол закручивания сверла;

$F_x(t)$ – боковая сила, действующая на сверло по оси x ;

$F_y(t)$ – боковая сила, действующая на сверло по оси y ;

$F_z(t)$ – осевая сила, действующая на сверло;

$T_c(t)$ – крутящий момент, действующее на сверло.

Силы резания в правой части уравнения (1.5) зависят от толщины срезаемого слоя и эффекта запаздывания.

Можно сказать, что данная модель является наиболее полно отражающей законы частичной устойчивости, по сравнению с другими моделями.

В работе [114] на основе экспериментальных исследований процесса глубокого сверления было обнаружено, что вибрации возникаемые в процессе резания возможно подавить за счет применения динамического демпфера и геометрии режущей части сверла, где последняя не всегда эффективна.

1.6 Анализ математических моделей процесса сверления описывающих аспекты обеспечения качества обработки и защиты инструмента от перегрузок

Повышение точности обработки и стойкости инструмента в процессе сверления достигается путем создания и использования точных математических моделей процесса, с учетом специфики явлений, протекающих в зоне обработки и упругих деформаций технологической системы.

Специфика операции сверления, в особенности глубокого, заключается в том, что инструмент прокладывает себе путь в сплошном материале, не имея жесткого направления. Процесс усугубляется еще и неоднородностью качества обрабатываемого материала. К тому же стружкообразование протекает в условиях сложного стружкоудаления.

Чем больше глубина сверления, тем тяжелее условия работы сверла. Это

усугубляется еще и спецификой подачи свежей СОТС в зону резания при сверлении, а также несоизмеримо большим, чем при токарной обработке временем соприкосновения стружки с инструментом и обрабатываемой заготовкой, и как следствие значительным ростом температуры в зоне резания. С увеличением глубины обработки имеет место скопление стружки в стружкоотводящих каналах, что способствует росту силовых параметров процесса.

Вибрация инструмента, крутильные колебания инструмента ведут к формированию огранки отверстия, а специфичный характер износа направляющих сверла вызывает образование конусности и повышенной шероховатости поверхности. Царапины на стенках получаемого отверстия являются как правило следствием накопления и пакетирования стружки в стружкоотводящих каналах сверла. Выкрашивание режущих кромок и направляющих, заклинивание частиц стружки между формируемым отверстием и направляющими сверла создают задиры на поверхности формирования отверстия.

Производственный и исследовательский опыт показывает, что несмотря на большое количество разработок по оптимизации режимов резания, совершенствованию инструмента и СОТС, устранить нарастание силовой нагрузки на сверло в процессе его заглубления не удастся.

Изложенное выше указывает на целесообразность наряду с совершенствованием используемых СОТС создания систем управления процессом сверления, с целью повышения качества обработки отверстий и повышения стойкости стержневого инструмента.

Решение задачи повышения качества обработки и защиты инструмента от перегрузок с целью повышения его стойкости, может быть осуществимо использованием методов совершенствования технологических характеристик станков и инструмента, подаваемой СОТС, а также управлением режимами резания.

Определяющее влияние на точность получаемого диаметрального размера, геометрическую форму отверстия в продольном и поперечном направлениях, точность направления оси отверстия и параметры шероховатости получаемых

поверхностей при сверлении оказывают:

- значительные адгезионные связи между инструментом и стружкой;
- неравномерная твердость материала заготовки;
- несимметричность заточки лезвий сверла;
- несимметричный износ лезвий сверла.

Большой вылет сверла, в сочетании с малым его диаметром, способствует возникновению еще и радиальных составляющих сил резания.

Проанализируем математические модели процесса сверления описывающих разные аспекты обеспечения качества получения отверстий.

В работе [81] предложен расчетно-аналитический метод определения погрешности, приобретаемой деталью в результате обработки. Суть метода заключается в определении и суммировании отдельных составляющих погрешности. Он учитывает нижеследующие систематические погрешности: геометрическую неточность станка (Δ_1); износ режущего инструмента (Δ_2); тепловые деформации технологической системы (Δ_3); упругие деформации технологической системы (Δ_4); неточность настройки станка (Δ_5); случайные погрешности, зависящие от неравномерной твердости обрабатываемой заготовки ($\Delta_{сл\ 1}$); погрешности измерений ($\Delta_{сл\ 2}$).

Таким образом, суммарную погрешность можно представить как:

$$\Delta_{сумм} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_{сл\ 1} + \Delta_{сл\ 2} \quad (1.6)$$

В единичном и мелкосерийном производстве, вынужденно, берутся во внимание только систематические погрешности.

Выражение (1.6) определяет погрешность размера обрабатываемой поверхности, а для того, чтобы оценить погрешность геометрической формы, необходимо определить разность полученных соответствующих размеров детали с размерами по чертежу. Упругие деформации, вызванные нежесткостью инструмента (в нашем случае это сверло, являющееся наименее жестким из всего перечня лезвийного инструмента), входят в составляющую Δ_4 , учитывающую упругие деформации технологической системы.

В работе [97] влияние радиальной составляющей силы резания на упругую линию инструмента представлено выражением:

$$y = \frac{F_p}{3EJ}(x-l)^3, \quad (1.7)$$

где F_p – радиальная сила, действующая на сверло;

E – модуль упругости материала сверла;

J – момент инерции поперечного сечения сверла;

x – координата поперечного сечения;

l – длина рабочей части сверла.

Начальное смещение оси сверла в той же работе предложено определять из уравнения

$$e = \frac{F_p l^3}{3EJ}, \quad (1.8)$$

а величину угла наклона оси у его вершины из уравнения

$$\phi_l = \frac{F_p l^2}{2EJ}, \quad (1.9)$$

Величину увода сверла к моменту завершения процесса сверления предложено [97] определять как:

$$y_k = (e_y + e) + (\operatorname{tg}\alpha_y + \operatorname{tg}\varphi) \cdot L \quad (1.10)$$

где e_y – величина смещения сверления от центра заготовки;

α_y – угловая погрешность из-за неверной установки базы заготовки относительно оси шпинделя станка.

Считают [97], что погрешности e_y и α_y относительно невелики и устранимы в наладочном процессе.

Второй и четвертый члены уравнения (1.10) показывают соответственно начальное смещение (l) и угловую погрешность оси отверстия при врезании сверла.

В работе [91], по результатам обширного анализа причин увода при глубоком сверлении, величину увода оси в любом поперечном сечении в результате неоднородности материала заготовки предложено определять по зависимости:

$$Y_{ci} = \sqrt{y_i^2 - z_i^2}, \quad (1.11)$$

где y_i и z_i – составляющие увода, определяемые зависимостями

$$y = y_0 + l_c \operatorname{tg} \alpha_y + \int_0^l B_y dx, \quad (1.12)$$

$$z = z_0 + l_c \operatorname{tg} \alpha_z + \int_0^l B_z dz. \quad (1.13)$$

В зависимостях (1.12) и (1.13) принято:

y_0 и z_0 – координаты входа инструмента в заготовку;

α_y и α_z – угловые погрешности при врезании инструмента в заготовку;

B_y и B_z – безразмерные функции, определяющие поперечные отклонения сверла под влиянием разнотвердости материала заготовки.

Приведенные модели не учитывают упругие свойства технологической системы, оказывающие существенное влияние на точность обработки и силовые параметры.

В работе [57] задача управления станочной системой при сверлении глубоких отверстий ставилась с целью оптимизации заглублений. Модель станочной системы представлена следующим образом.

$$\frac{dx}{dt} = a\vec{x} + b\vec{f} + c\vec{u}, \quad (1.14)$$

где $\vec{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}^T$ – вектор состояния управляемой системы;

$\vec{f}$ – вектор внешних возмущений;

$\vec{u}$ – вектор управления;

a, b, c – матрицы постоянных коэффициентов.

Ряд исследований [34, 36, 43, 54] направлены на установление причин зарождения и развития колебаний сравнительно небольшой амплитуды, сопровождающих процессы обработки резанием. Характер колебаний при механической обработке концевым инструментом считают зависящим от числа и расположения режущих кромок, длины инструмента, формы его поперечного сечения, режима резания, состава подаваемой СОТС, однородности

обрабатываемого материала.

В работе [54] математическая модель колебательной системы рассмотрена в виде дифференциального уравнения:

$$M\ddot{x} = jx + F_f, \quad (1.15)$$

где M – приведенная масса системы;

j – жесткость системы;

F_f – сила подачи.

Рассматривая уравнение (1.15) применительно к сверлению, можно констатировать, что она не учитывает вероятных радиальных сил. Последние, как известно, существенно определяют точность обработки и качество поверхностей полученных отверстий. В работе [97] избыточная неуравновешенная радиальная составляющая оценивается как оказывающая доминирующее влияние на геометрическую форму создаваемого отверстия.

Дифференциальное уравнение движения под действием упругой реакции инструмента в работе [54] представлено в виде:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + F = F_p, \quad (1.16)$$

где F – упругая реакция инструмента;

m – приведенная масса;

F_p – проекция радиальной силы;

c – коэффициент демпфирования.

Математические модели накопленных уводов спиральных сверл по длине отверстия в работе [55] представлены в виде:

$$y(x) = (x / x_0)^{1,5}$$

$$z(x) = \frac{q}{120EJ} x^4 + \left(z_0 x_0^{-1,5} - \frac{q}{120EJ} x^{2,5} \right) x^{1,5}, \quad (1.17)$$

где x – вылет сверла из патрона;

$y(x)$, $z(x)$ – проекции вектора увода $r(x)$ на горизонтальную и вертикальную плоскости;

z_0 – линейные погрешности в первоначальном направлении сверла в

вертикальной плоскости;

x_0 – расстояние от места крепления сверла до заготовки;

q – распределенная нагрузка от массы сверла;

s – площадь сечения сверла;

EJ – изгибная жесткость сверла.

Далее рассмотрим имеющиеся мехатронные конструктивные разработки по защите стержневого инструмента (сверл) от перегрузок, с целью повышения его стойкости.

Основными силовыми параметрами процесса сверления, определяющими условия работы инструмента, являются осевая сила и крутящий момент, прикладываемые к сверлу.

Ограничение по прочности сверла [55] записано в виде

$$\sigma_{\text{экв}} < [\sigma], \quad (1.18)$$

при условии, что

$$\sigma_{\text{экв}} < a (cM - F_f), \quad (1.19)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – максимальное значение эквивалентного напряжения, возникающего от совместного действия осевой силы и крутящего момента прикладываемых к сверлу;

$[\sigma]$ – предельное значение разрушающего напряжения;

a и c – коэффициенты подбираемые в зависимости от используемого материала сверла;

F_f – осевая составляющая силы резания;

Ограничение по прочности можно выразить более упрощенно

$$M < [M]. \quad (1.20)$$

Поскольку при достижении некоторой величины заглубления ограничение осевой силы утрачивает существенную значимость. Доминирующим становится крутящий момент, который и необходимо стабилизировать с помощью системы управления процессом сверления.

Ряд исследований [55, 76] показал, что ограничение по крутящему моменту особенно важно на начальном этапе операции сверления, когда свободная часть

стержня сверла еще достаточно большая. Выполнение такого ограничения на начальном этапе не позволяет развиваться неисправимому уводу сверла.

Таким образом, приведенные исследования в области моделирования процесса резания спиральными сверлами показывает, что разработанные математические модели имеют как достоинства, так и недостатки, что не приводит к существенному эффекту повышения точности обработки.

Выводы по главе, постановка цели и задач исследования:

1. Процесс формирования поверхности отверстия является сложным физическим процессом, на который оказывает существенное влияние режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, деформационные процессы и вибрационная составляющая процесса резания.

2. Повышение производительности процесса сверления может достигнута путем совершенствования существующих методов назначения режимов резания или же разработке новых, позволяющих уменьшить время обработки детали и повысить качество обработанной поверхности.

Также повышение производительности может быть достигнута за счет повышения стойкости режущего инструмента, снижением времени на обработку детали, а также снижением количества геометрических дефектов, что в последующем появляются затраты на исправление данных дефектов.

3. Проведенный анализ методов назначения режимов резания показывает, что для обеспечения заданной точности и качества обработанной поверхности не всегда эффективными, не учитывающие влияние технологической системы, геометрические параметры режущего инструмента и материал обрабатываемой заготовки.

4. Приведенный выше анализ известных математических моделей показывает, что имеющиеся зависимости охватывают только часть проблемы повышения точности, выдержки формы отверстия и качества ее поверхности. Целесообразна разработка математических моделей, более широко охватывающих

технологические системы сверления отверстий, с учетом особенностей подачи СОТС и их состава.

В связи с вышеизложенным, **целью данной работы** является повышение производительности операции сверления отверстий на основе разработки комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных свёрл из быстрорежущих сталей с материалом заготовки в деталях из стали 12X18H10T.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

6. Для установления взаимосвязей между входными и выходными переменными рассмотреть операцию сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T как динамическую систему.

7. Выявить и формализовать взаимосвязи между входными технологическими факторами и выходными параметрами процесса: с составляющими силы резания, температурой в зоне контакта, износом инструмента, его стойкостью, производительностью операции и показателями качества при сверлении отверстий в деталях из стали 12X18H10T.

8. Разработать методики исследований и осуществить экспериментальную идентификацию разработанных моделей.

9. Разработать методику расчёта оптимальных по скорости съёма материала циклов сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T, с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости сверла.

10. Произвести оценку эффективности полученных результатов при опытно-промышленной эксплуатации.

ГЛАВА 2.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ С МАТЕРИАЛОМ ЗАГОТОВКИ

2.1. Анализ структуры процесса сверления

Основными задачами обработки отверстий спиральными сверлами на металлорежущих станках являются обеспечение заданной траектории относительного движения инструмента и заготовки [17], непрерывное управление параметрами режима обработки в зависимости от изменяющихся условий с целью достижения заданных технико-экономических показателей при максимальной эффективности производства.

Для реализации управления процессом обработки требуется информация об элементах технологической системы и условиях выполнения операции, закономерностях протекания процесса резания, позволяющих получить математическую модель процесса [55].

Системы управления технологическими процессами в мелкосерийном и серийном производствах дают значительный технико-экономический эффект. Современное производство ставит задачу перед производителем в несколько раз повысить точность обработки, сократить основное время (в 2-2,5 раза), обеспечить заданное качество обработанных поверхностей.

Так как процесс сверления является сложным многокомпонентным объектом, на который оказывает влияние большое количество изменяющихся воздействий, то необходимо рассмотреть его как систему [56].

На рисунке 2.1. приведена структурная схема процесса сверления, имеющая в своей структуре отдельные элементы, взаимодействующие между собой через функциональные связи. Процесс разбит на подсистемы станка, приспособления, инструмента, заготовки, СОТС, зоны контакта. Каждая из подсистем: СП – станок-

приспособление, И – инструмент, З – заготовка; ЗК – зона контакта, СОТС – смазочно-охлаждающая технологическая среда математически представляются наборами (векторами) параметров состояний.

Например, для подсистемы «станок-приспособление $Z_{СП}$ »: вектор входных переменных, поступающих из среды – $X_{СП}^C$; векторы входных переменных, поступающие из других подсистем – $Y_{И}^{СП}, Y_{СОЖ}^{СП}, Y_{Д}^{СП}, Y_{ЗК}^{СП}$; вектор выходных переменных $Y_{СП}$.

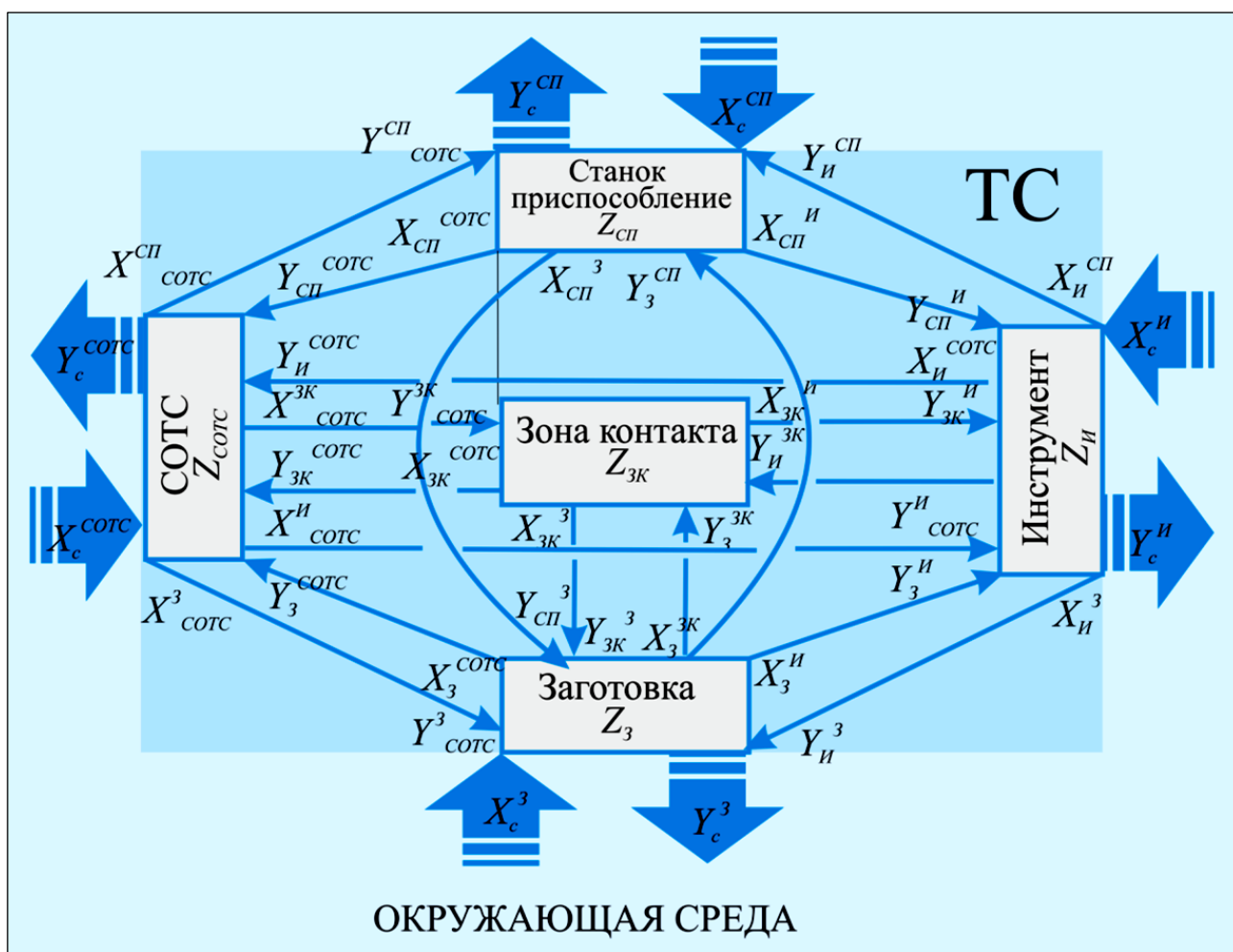


Рисунок 2.1. Структурная модель процесса сверления.

Поведение подсистем, участвующих в процессе формирования отверстия, характеризуется системой уравнений, описывающей состояние процесса сверления:

$$\begin{cases} Z_{СП} = \Phi_{СП} \left(X_{СП}^C(\tau), Y_{II}^{СП}(\tau), Y_{COTC}^{СП}(\tau), Y_3^{СП}(\tau), Y_{3K}^{СП}(\tau) \right); \\ Z_{II} = \Phi_{II} \left(X_{II}^C(\tau), Y_{СП}^{II}(\tau), Y_{3K}^{II}(\tau), Y_{COTC}^{II}(\tau) \right); \\ Z_3 = \Phi_3 \left(X_3^C(\tau), Y_{3K}^3(\tau), Y_{СП}^3(\tau), Y_{COTC}^3(\tau) \right); \\ Z_{COTC} = \Phi_{COTC} \left(X_{COTC}^C(\tau), Y_{СП}^{COTC}(\tau), Y_3^{COTC}(\tau), Y_{II}^{COTC}(\tau), Y_{3K}^{COTC}(\tau) \right); \\ Z_{3K} = \Phi_{3K} \left(Y_3^{3K}(\tau), Y_{II}^{3K}(\tau), Y_{COTC}^{3K}(\tau) \right), \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} Y_{СП}(\tau) = F_{СП} \left(Z_{СП}, X_{СП}^*(\tau) \right) \\ Y_{II}(\tau) = F_{II} \left(Z_{II}, X_{II}^*(\tau) \right) \\ Y_3(\tau) = F_3 \left(Z_3, X_3^*(\tau) \right) \\ Y_{COTC}(\tau) = F_{COTC} \left(Z_{COTC}, X_{COTC}^*(\tau) \right) \\ Y_{3K}(\tau) = F_{3K} \left(Z_{3K}, X_{3K}^*(\tau) \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

где $X_{СП}^*(\tau)$ – вектор входных переменных, оказывающий на выходные параметры непосредственное влияние;

$\Phi_{СП}$ – оператор, отображающий множество входных переменных и параметров исходного состояния на множество параметров состояния подсистем СП в момент времени τ ;

$F_{СП}$ – оператор, отображающий множество значений входных переменных и параметров состояния на множество выходных переменных в момент времени τ .

На поведение технологических подсистем оказывают влияние не только текущие значения параметров, но и значения, существовавшие в предыдущие моменты времени $\tau - \Delta\tau$:

$$\begin{cases} Z(\tau) = F[Z(\tau - \Delta\tau), X^n(\tau)] = F[Z(\tau - \Delta\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)], \\ Y(\tau) = \Phi[Z(\tau), X^n(\tau)] = \Phi[Z(\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)] \end{cases} \quad (2.3)$$

где $Z(\tau)$ – вектор параметров состояния соответствующей подсистемы;

$Y(\tau)$ – вектор выходных параметров;

$X^n(\tau)$ – вектор входных сигналов соответствующей подсистемы;

F – закон отображения состояния;

Φ – закон отображения параметров выхода;

F_j – сила резания на j -м обороте;

T_m – стойкость сверла;

h_{3j} – износ режущей кромки.

Для обеспечения качества изделий вектор параметров состояния Z_{ij} должен находиться в допустимой области: $Z_{\min(i)} \leq Z_{i(j)} \leq Z_{\text{кри}(j)}$ (связи типа неравенств).

Критическое значение вектора $Z_{\text{кри}(j)}$ на любом обороте сверла определяет ограничения, которые состоят из технических требований к параметрам отверстия и инструменту, условиями протекания обработки и допустимыми режимами работы оборудования:

$$Z_{\text{кри}(j)} = F[Z_{\text{дон}}, u_{\text{дон}}^n] \quad (2.6)$$

Для характеристики критического значения вектора $Z_{\text{кри}(j)}$ при сверлении могут быть использованы следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{кр}j} \leq M_{\text{кр дон}} \\ F_j \leq F_{\text{дон}} \\ T_{mj} \leq T_{m \text{ дон}} \\ \dots \\ D_{\text{отв}j} \leq D_{\text{отв.дон}} \\ h_3 \leq h_{3.\text{дон}} \\ \dots \\ V_j \leq V_{\text{дон}} \end{array} \right. , \quad (2.7)$$

Повышение производительности обработки однозначно связано с интенсификацией режимов (подачи и скорости резания). Аналогичный путь может быть выбран и для снижения себестоимости обработки, что подтверждается целым рядом исследований. Однако увеличение режимов обработки сопряжено с ростом износа сверл, приводящего к частой их смене и, как следствие, к снижению производительности и повышению себестоимости обработки. В зависимости от критерия оптимизации (износ инструмента, стойкость, производительность, себестоимость) оптимальные режимы обработки принимают различные значения

[97]. При этом существуют значения режимов обработки, для которых отношение производительности к себестоимости принимает наибольшее значение.

Точность, качество, производительность обработки, расход инструментального материала, затраты на изготовление деталей в значительной степени определяются режимом обработки. Несовершенство существующих методов расчета режимов обработки [83], нестабильность характеристик инструмента и их изменение в процессе резания при обработке с заранее запрограммированным режимом приводят к изменениям тепловой, силовой нагрузки на инструмент и к его нерациональному использованию. Влияние указанных недостатков возрастает при использовании инструмента, параметры которого ограничены условиями обработки (прочность, жесткость, износостойкость и т.д.). Особенно четко эти недостатки проявляются на операциях обработки отверстий спиральными сверлами.

Для реализации поставленных целей необходимо полное математическое описание процесса сверления, требуется разработка комплекса математических моделей, устанавливающих взаимосвязи между всеми элементами технологической системы.

2.2. Влияние деформаций рабочей части сверл на точность отверстий

Для получения отверстий в сплошном материале наиболее широкое распространение получили операции сверления спиральными сверлами, которые осуществляются на универсальных сверлильных станках и станках с ЧПУ. При этом решаются одновременно несколько задач: обеспечение точности диаметральных размеров отверстий и точности расположения их осей.

Задача обеспечения точности диаметральных размеров отверстий решается путём назначения благоприятных режимов резания, выбором инструмента с рекомендуемыми величинами геометрических параметров для конкретного материала заготовки и технологической оснастки, применения дополнительных

технологических операций зенкерования, развёртывания, растачивания и др. При их различных сочетаниях могут быть получены отверстия от 14 до 9-го квалитетов точности.

Обеспечение точности координатных размеров отверстий решается сверлением по кондуктору на универсальных станках или применением станков с ЧПУ. Анализ образования погрешностей положения осей отверстий при их обработке по кондуктору показывает, что при сверлении имеют место погрешности геометрического смещения оси инструмента, упругого смещения оси инструмента и упругое смещение кондукторной плиты. При обработке на станках с ЧПУ первая и последняя составляющие отсутствуют.

При сверлении отверстий важно учитывать влияние крутящего момента на положение режущих зубьев сверла, которые испытывают значительные тангенциальные усилия в процессе резания. При этом крутящий момент может оказывать влияние не только на устойчивость инструмента, но и на его поперечные смещения, что приводит к снижению точности обработки отверстия.

Традиционно для определения поперечных смещений одноосных элементов используют уравнение изогнутой оси стержня в универсальной форме [4, 26, 88].

В отличие от деформации стержня, процесс сверления отверстий характеризуется изогнутым сжато-закрученным состоянием, при котором поперечные смещения будут происходить одновременно в двух главных центральных плоскостях. Совокупность выше рассмотренных вопросов представляют собой нерешенную до настоящего времени задачу.

Цель разработанных математических моделей сверления являлось теоретическое определение собственных частот колебаний системы и ее элементов с разработкой методов их подавления. При этом представленные модели не учитывают особенностей явлений, происходящих в зоне обработки и динамических свойств процесса резания, в частности поперечные смещения сверла.

Для решения вышеуказанной задачи необходимо построить уравнение изогнутой оси одноосного элемента в условиях нагружения, соответствующих

условиям работы сверла.

Конструкции спиральных сверл имеют пять режущих кромок и при сверлении все центральные оси в поперечном сечении инструмента являются главными с равными изгибными жесткостями $EJ_y = EJ_z$ в постоянном по длине поперечном сечении. При сверлении на поверхности зубьев со стороны обрабатываемого материала действуют силы сопротивления резанию. В результате поперечные сечения рабочей части сверла закручиваются относительно поперечного сечения хвостовика, расположенного в плоскости его защемления. Учитывая, что внешнее силовое воздействие на осевой многолезвийный инструмент является результатом комплексного воздействия тангенциальной, осевой и радиальной силы резания на каждую главную режущую кромку инструмента, будем рассматривать только результирующее воздействие на инструмент в виде полного комплекса внешних изгибных (поперечная сила и изгибающий момент), закручивающих (крутящий момент) и сжимающих (продольная сила) нагрузок (рисунок 2.2).

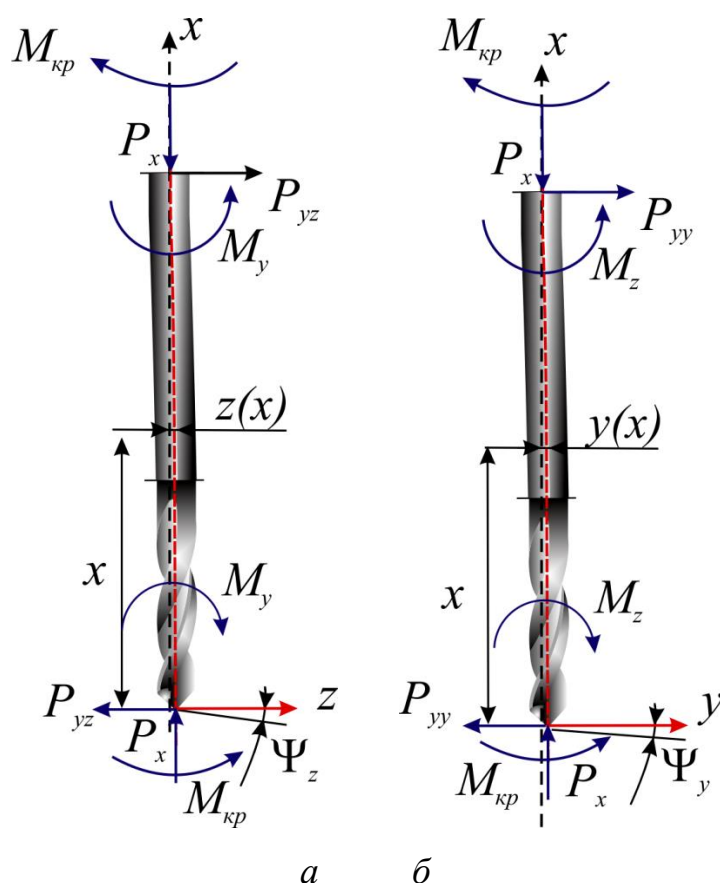


Рисунок 2.2. Расчетная схема изогнутого сжато-закрученного сверла.

Предположим, что в результате комплексного внешнего воздействия осевой инструмент, представляющий собой прямолинейный стержень, загружен по торцам крутящими моментами $M_{кр} = P_z r$ и продольными сжимающими усилиями P_x . В двух взаимно перпендикулярных плоскостях стержень изгибается поперечными силами P_{yy} и P_{yz} и изгибающими моментами M_z и M_y (см. рисунок 2.2).

После приложения внешней нагрузки, прямолинейный до нагружения стержень деформируется, его торцы смещаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и поворачиваются на некоторый угол.

На основании расчетной схемы (рисунок 2.2) из условия равновесия правой части в сечении с координатой x получим дифференциальные уравнения изогнутой оси сверла в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\begin{cases} EJ_z \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = -M_{кр} \cdot \frac{dz(x)}{dx} + P_x \cdot (y_0 - y(x)) + M_z + P_{yy} x \\ EJ_y \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = M_{кр} \cdot \frac{dy(x)}{dx} + P_x \cdot (z_0 - z(x)) + M_y + P_{yz} x \end{cases} \quad (2.8)$$

где $M_z(x)$ и $M_y(y)$ – изгибающие моменты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в сечении с координатой x соответственно;

P_{yy}, P_{yz}, P_x – составляющие силы резания.

Для решения (2.8) используем методы, приведенные в работах [26, 88].

Осуществим переобозначения:

$$EJ_y = EJ_z = EJ = \Delta; \quad y(x) = y; \quad z(x) = z; \quad T_1 = \frac{M_{кр}}{\Delta}; \quad T^2 = \frac{P_x}{\Delta}$$

Выражение (2.8) перепишется:

$$\begin{cases} y'' + T_1 z' + T^2 y = T^2 y_0 + \frac{M_z}{\Delta} + \frac{P_{yy}}{\Delta} x \\ z'' - T_1 y' + T^2 z = T^2 z_0 + \frac{M_y}{\Delta} + \frac{P_{yz}}{\Delta} x \end{cases} \quad (2.9)$$

Осуществляем поиск решения системы в виде: $y = \bar{y} + y^*$; $z = \bar{z} + z^*$, здесь $\bar{y}$ и $\bar{z}$ – общие решения системы однородных уравнений, а y^* и z^* – частные решения системы (2.9):

$$\begin{cases} y'' + T_1 z' + T^2 y = 0 \\ z'' - T_1 y' + T^2 z = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Считаем, что общее решение $y(x)$ и $z(x)$ имеет вид:

$$\begin{cases} \bar{y}(x) = C_1 e^{\lambda x} \\ \bar{z}(x) = C_2 e^{\lambda x} \end{cases} \quad (2.11)$$

Тогда на основании (2.11) характеристическое уравнение системы уравнений (2.10) примет вид:

$$\lambda^4 + (2T^2 + T_1^2)\lambda^2 + T^4 = 0. \quad (2.12)$$

Корнями уравнения (2.12) будут $\lambda_i = n_i \sqrt{-1}$, где:

$$n_{1,4} = \mp \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} + T^2} = \pm n; \quad n_{2,3} = \mp \frac{T_1}{2} \mp \sqrt{\frac{T_1^2}{4} + T^2} = \pm m.$$

С учетом полученного, уравнение (2.11) перепишется:

$$\begin{cases} \bar{y}(x) = C_{11}e^{\lambda_1 x} + C_{12}e^{\lambda_2 x} + C_{13}e^{\lambda_3 x} + C_{14}e^{\lambda_4 x} \\ \bar{z}(x) = C_{21}e^{\lambda_1 x} + C_{22}e^{\lambda_2 x} + C_{23}e^{\lambda_3 x} + C_{24}e^{\lambda_4 x} \end{cases} \quad (2.13)$$

или, с учетом разложения $e^{\pm inx} = \cos nx \pm i \sin nx$ и $e^{\pm imx} = \cos mx \pm i \sin mx$ (2.8):

$$\begin{cases} \bar{y}(x) = A_1 \cdot \sin mx + A_2 \cdot \cos mx + A_3 \cdot \sin nx + A_4 \cdot \cos nx \\ \bar{z}(x) = -A_1 \cdot \cos mx + A_2 \cdot \sin mx - A_3 \cdot \cos nx + A_4 \cdot \sin nx \end{cases} \quad (2.14)$$

Частное решение правой части уравнений y^* и z^* получим в форме (2.8):

$$y^* = a + b \cdot x \quad z^* = c + d \cdot x. \quad (2.15)$$

С учетом выражений (2.15) и их производных система уравнений (2.8) имеет вид:

$$\begin{cases} T_1 \cdot d + T^2 a + T^2 b \cdot x = \frac{P_x y_0 + M_z + P_{yy} x}{\Delta} \\ -T_1 \cdot b + T^2 c + T^2 d \cdot x = \frac{P_x z_0 + M_y + P_{yz} x}{\Delta} \end{cases} \quad (2.16)$$

Используя метод неопределенных коэффициентов, находим:

$$a = y_0 + \frac{M_z}{P_x} - \frac{M_{kp} \cdot P_{yz}}{P_x^2}; \quad b = \frac{P_{yy}}{P_x}; \quad c = z_0 + \frac{M_y}{P_x} + \frac{M_{kp} \cdot P_{yy}}{P_x^2}; \quad d = \frac{P_{yz}}{P_x}. \quad (2.17)$$

С учетом (2.17), частное решение (2.15) получаем в виде:

$$\begin{cases} y^* = y_0 + \frac{M_z}{P_x} - \frac{M_{kp} \cdot P_{yz}}{P_x^2} + \frac{P_{yy}}{P_x} x \\ z^* = z_0 + \frac{M_y}{P_x} + \frac{M_{kp} \cdot P_{yy}}{P_x^2} + \frac{P_{yz}}{P_x} x \end{cases}. \quad (2.18)$$

Таким образом, решение системы уравнений (2.8) примет вид:

$$\begin{cases} y(x) = A_1 \cdot \sin mx + A_2 \cdot \cos mx + A_3 \cdot \sin nx + A_4 \cdot \cos nx + y_0 + \frac{M_z}{P_x} - \frac{M_{kp} \cdot P_{yz}}{P_x^2} + \frac{P_{yy}}{P_x} x \\ z(x) = -A_1 \cdot \cos mx + A_2 \cdot \sin mx - A_3 \cdot \cos nx + A_4 \cdot \sin nx + z_0 + \frac{M_y}{P_x} + \frac{M_{kp} \cdot P_{yy}}{P_x^2} + \frac{P_{yz}}{P_x} x \end{cases}. \quad (2.19)$$

Постоянные A_1, A_2, A_3, A_4 определяются из граничных условий $y(0) = y_0$, $z(0) = z_0$, $\Psi_y(0) = \Psi_{0y}$, $\Psi_z(0) = \Psi_{0z}$

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{1}{(n-m)} \left(\Psi_{0y} - n \cdot \frac{M_y}{P_x} - n \cdot \frac{M_{kp} \cdot P_{yy}}{P_x^2} - \frac{P_{yy}}{P_x} \right); \\ A_2 &= -\frac{1}{(n-m)} \left(\Psi_{0z} + n \cdot \frac{M_z}{P_x} - n \cdot \frac{M_{kp} \cdot P_{yz}}{P_x^2} - \frac{P_{yz}}{P_x} \right); \\ A_3 &= \frac{1}{(n-m)} \left(\Psi_{0y} - m \cdot \frac{M_y}{P_x} - m \cdot \frac{M_{kp} \cdot P_{yy}}{P_x^2} - \frac{P_{yy}}{P_x} \right); \\ A_4 &= \frac{1}{(n-m)} \left(\Psi_{0z} - m \cdot \frac{M_z}{P_x} - m \cdot \frac{M_{kp} \cdot P_{yz}}{P_x^2} - \frac{P_{yz}}{P_x} \right). \end{aligned}$$

Подставляя A_1, A_2, A_3, A_4 в (2.19), получим уравнения поперечных смещений сжато-закрученного сверла и их производные (уравнения углов поворота, изгибающих моментов и импульса сил) в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе в форме начальных параметров:

$$\left\{ \begin{aligned}
y(x) &= y_0 + \frac{\Psi_{0y}}{T} \varepsilon_2 + \frac{\Psi_{0z}}{T} \mu_2 + \frac{M_z}{P_x} \varepsilon_1 - \frac{M_y}{P_x} \mu_1 + \\
&+ \frac{P_{yy}}{TP_x} \left(T\chi - \varepsilon_2 + \frac{M_{kp}T}{P_x} \mu_1 \right) - \frac{P_{yz}}{TP_x} \left(\mu_2 + \frac{M_{kp}T}{P_x} \varepsilon_1 \right); \\
z(x) &= z_0 + \frac{\Psi_{0z}}{T} \varepsilon_2 + \frac{\Psi_{0y}}{T} \mu_2 + \frac{M_y}{P_x} \varepsilon_1 - \frac{M_z}{P_x} \mu_1 + \\
&+ \frac{P_{yz}}{TP_x} \left(T\chi - \varepsilon_2 + \frac{M_{kp}T}{P_x} \mu_1 \right) - \frac{P_{yy}}{TP_x} \left(\mu_2 + \frac{M_{kp}T}{P_x} \varepsilon_1 \right); \\
\Psi_y(x) &= \frac{dy(x)}{dx} = \Psi_{0y} \varepsilon_3 + \Psi_{0z} \mu_3 + \frac{TM_z}{P_x} \varepsilon_2 - \frac{TM_y}{P_x} \mu_2 + \\
&+ \frac{P_{yy}}{P_x} \left(1 - \varepsilon_3 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_2 \right) - \frac{P_{yz}}{P_x} \left(\mu_3 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_2 \right); \\
\Psi_z(x) &= \frac{dz(x)}{dx} = \Psi_{0z} \varepsilon_3 - \Psi_{0y} \mu_3 + \frac{TM_y}{P_x} \varepsilon_2 - \frac{TM_z}{P_x} \mu_2 + \\
&+ \frac{P_{yz}}{P_x} \left(1 - \varepsilon_3 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_2 \right) + \frac{P_{yy}}{P_x} \left(\mu_3 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_2 \right); \\
M_z(x) &= \Delta \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = T\Delta \Psi_{0y} \varepsilon_4 + T\Delta \Psi_{0z} \mu_4 + M_z \varepsilon_3 - M_y \mu_3 + \\
&+ \frac{P_{yy}}{T} \left(-\varepsilon_4 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_3 \right) - \frac{P_{yz}}{T} \left(\mu_4 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_3 \right); \\
M_y(x) &= \Delta \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = T\Delta \Psi_{0z} \varepsilon_4 - T\Delta \Psi_{0y} \mu_4 + M_y \varepsilon_3 + M_z \mu_3 + \\
&+ \frac{P_{yz}}{T} \left(-\varepsilon_4 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_3 \right) + \frac{P_{yy}}{T} \left(\mu_4 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_3 \right); \\
\Lambda_y(x) &= \Delta \frac{d^3 y(x)}{dx^2} = T^2 \Delta \Psi_{0y} \varepsilon_5 + T^2 \Delta \Psi_{0z} \mu_5 + TM_y \varepsilon_4 - TM_z \mu_4 + \\
&+ P_{yy} \left(-\varepsilon_5 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_4 \right) - P_{yz} \left(\mu_5 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_4 \right); \\
\Lambda_z(x) &= \Delta \frac{d^3 z(x)}{dx^2} = T^2 \Delta \Psi_{0z} \varepsilon_5 + T^2 \Delta \Psi_{0y} \mu_5 + TM_z \varepsilon_4 - TM_y \mu_4 + \\
&+ P_{yz} \left(-\varepsilon_5 + \frac{M_{kp}T}{n} \mu_4 \right) - P_{yy} \left(\mu_5 + \frac{M_{kp}T}{n} \varepsilon_4 \right);
\end{aligned} \right. \quad (2.20)$$

где $\varepsilon_i(x)$ и $\mu_i(x)$ – функции влияния:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1(x) &= 1 + \frac{m \cos nx - n \cos mx}{n - m}; \quad \varepsilon_2(x) = T \frac{\sin nx - \sin mx}{n - m}; \quad \varepsilon_3(x) = \frac{n \cos nx - m \cos mx}{n - m}; \\
\varepsilon_4(x) &= \frac{n^2 \sin nx - m^2 \sin mx}{T(n - m)}; \quad \varepsilon_5(x) = -\frac{n^3 \cos nx - m^3 \cos mx}{T^2(n - m)}.
\end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}\mu_1(x) &= -\frac{m \sin nx - n \sin mx}{n-m}; \quad \mu_2(x) = T \frac{\cos nx - \cos mx}{n-m}; \quad \mu_3(x) = -\frac{n \sin nx - m \sin mx}{n-m}; \\ \mu_4(x) &= \frac{n^2 \cos nx - m^2 \cos mx}{T(n-m)}; \quad \mu_5(x) = \frac{n^3 \sin nx - m^3 \sin mx}{T^2(n-m)}.\end{aligned}\quad (2.22)$$

Функции (2.21) и (2.22) связаны между собой соотношениями кругового дифференцирования $\frac{d\varepsilon_i(x)}{dx} = s\varepsilon_{i+1}(x)$ и $\frac{d\mu_i(x)}{dx} = s\mu_{i+1}(x)$.

$$\text{Так: } \frac{1}{T} \frac{d\varepsilon_i(x)}{dx} = \frac{1}{T} \left(-mn \frac{\sin nx - \sin mx}{n-m} \right) = T \frac{\sin nx - \sin mx}{n-m} = \varepsilon_2(x),$$

$$\frac{1}{T} \frac{d\mu_i(x)}{dx} = \frac{1}{T} \left(-mn \frac{\cos nx - \cos mx}{n-m} \right) = T \frac{\cos nx - \cos mx}{n-m} = \mu_2(x).$$

Влияние различных типов внешних воздействий в уравнениях учитывается посредством коэффициентов $n = -\frac{T_1}{2} + \sqrt{\frac{T_1^2}{4} + T^2}$, $m = -\frac{T_1}{2} - \sqrt{\frac{T_1^2}{4} + T^2}$.

При малых диаметрах сверла, на погрешность формы отверстия оказывают влияние скручивающие деформации сверла. Соответственно, при анализе необходимо учитывать как изгиб сверла, так и его скручивание. На рисунке 2.3 показана схема разбиения среднего диаметра.

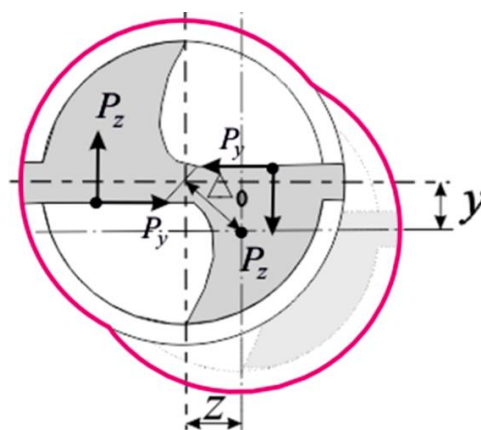


Рисунок 2.3 Схема разбиения среднего диаметра отверстия за счет относительного увода сверла.

По полученным формулам можно выполнять расчёты для вновь проектируемых и действующих технологических процессов. На стадии проектирования может быть выполнен расчёт ожидаемой погрешности смещения оси отверстия, которые связывают конструктивно-технологические параметры инструментальной наладки и условия обработки. Точностные расчёты для действующего техпроцесса могут быть выполнены при известных значениях ряда параметров и заданной величине допустимой погрешности.

Относительный увод сверла определяется по формуле:

$$\Delta_0 = \sqrt{y^2(x) + z^2(x)}.$$

На рисунке 2.4 приведены результаты расчета относительного увода сверла от диаметра инструмента. Для его расчета приняты следующие начальные данные, задающие граничные условия, определялись экспериментально; нормализованные и стандартные значения принимались по техническим справочникам и ГОСТам [84, 85, 49, 32].

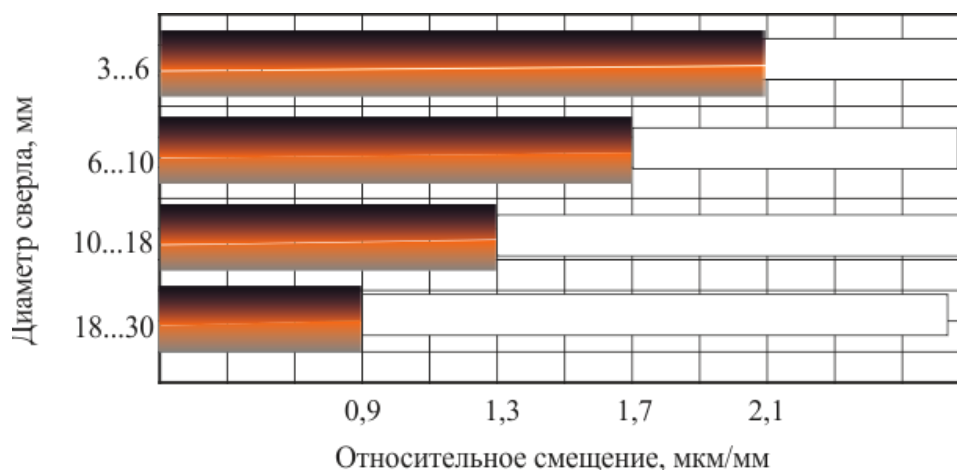


Рисунок 2.4. Относительный увод сверла от диаметра инструмента.

2.3 Математическое моделирование процесса сверления с учетом упругих деформаций инструмента.

В широком смысле математическая модель как таковая может быть представлена в виде аналитических, графических либо табличных зависимостей, показывающих взаимосвязи функционирования технологического процесса.

Рассматриваемый технологический процесс сверления осуществляется в результате взаимодействия упругой системы процессов трения, сопровождающих резание и механических передаточных процессов в трансмиссии станка, приводящего шпиндель. Взаимодействие переменных в технологическом процессе механообработки схематически можно изобразить (рисунок 2.5) следующим образом:

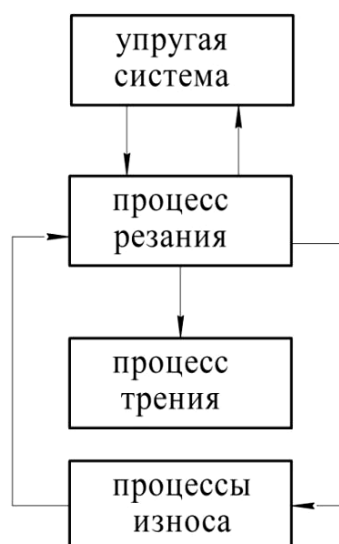


Рисунок 2.5. Схема замкнутой динамической системы механообработки.

Если при разработке математической модели технологической системы пренебречь упругой системой станка, это позволяет не учитывать влияние контура обратной связи с управляемым станком и рассматривать частоту вращения шпинделя n_w и скорость осевой подачи v_f как направленные воздействия. Такое допущение возможно в связи с тем, что конструкции и системы управления приводов главного движения и подачи станков обеспечивают высокую точность управления скоростью их исполнительных механизмов. С учетом этого

допущения, схема процесса резания может быть представлена как на рисунке 2.6.

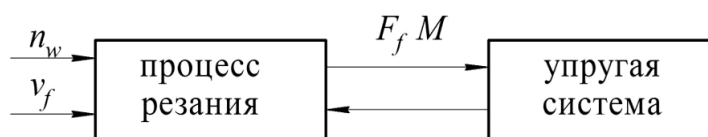


Рисунок 2.6. Упрощенная схема взаимодействия процесса резания и упругой системы в целом.

При аналитическом описании взаимодействия элементов схемы, целесообразно первоочередное определение переменных, определяющих силу резания.

В работе [76] показано, что управлять технологическим процессом глубокого сверления целесообразно не за счет скорости резания, а регулированием продольной подачи. Влияние режимов резания, при выполнении сверлильной операции, на крутящий момент исследовано в работе [17]. Пришли к заключению о том, что режимы резания в меньшей степени зависят от скорости резания, чем от изменений осевой подачи. Для технологических процессов сверления считают [89] свойственным резание «по следу». Толщина слоя металла, срезаемого каждой из двух кромок сверла определяется координатой его вершины в момент времени $x(t)$ и предыдущим процессом за промежуток времени τ .

Считая постоянной частоту вращения шпинделя n_w , время одного оборота сверла τ_0 можно записать как

$$\tau_0 = 1 / n_w. \quad (2.23)$$

Поскольку нами рассматривается двухкромочное сверло с симметричным расположением кромок, время между их очередными проходами можно определить из выражения

$$\tau = \tau_0 / 2. \quad (2.24)$$

Текущее значение толщины среза в работе [39] записано как

$$a(t) = x(t) - x(t - \tau). \quad (2.25)$$

Формирование толщины среза схематически представлено на рисунке 2.7.

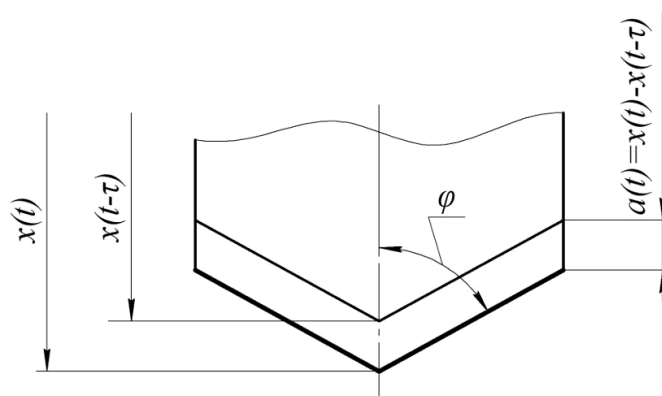


Рисунок 2.7. Схема формирования толщины среза [56].

Если считать, что технологическая система инструмент-заготовка-элементы станка (ИЗЭС) абсолютно жесткие, координата режущей кромки сверла на текущий момент и предшествующий оборот определяется только скоростью осевой подачи сверла, являющийся величиной переменной.

Уравнение для определения координаты режущей кромки сверла на текущий момент может быть записано в следующем виде:

$$x(t) = \int_0^t v_f(t) dt, \quad (2.26)$$

а на момент предшествующего оборота

$$x(t - \tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t) dt. \quad (2.27)$$

Податливость системы из-за упругих деформаций будет способствовать тому, что режущая часть кромки сверла будет смещаться на ΔY , а это в свою очередь приведет к изменению толщины среза. Последнее обстоятельство будет особенно выражено при первичном врезании инструмента. На рисунке 2.8 показано положение режущих кромок сверла с учетом упругих деформаций его тела.

Податливость упругой системы ИЗЭС, где деформация сверла доминирует, ведет к тому, что режущие кромки оказываются смещенными. Причем, в момент врезания сверла смещение режущих кромок способствует изменению толщины среза (см. рисунок 2.8).

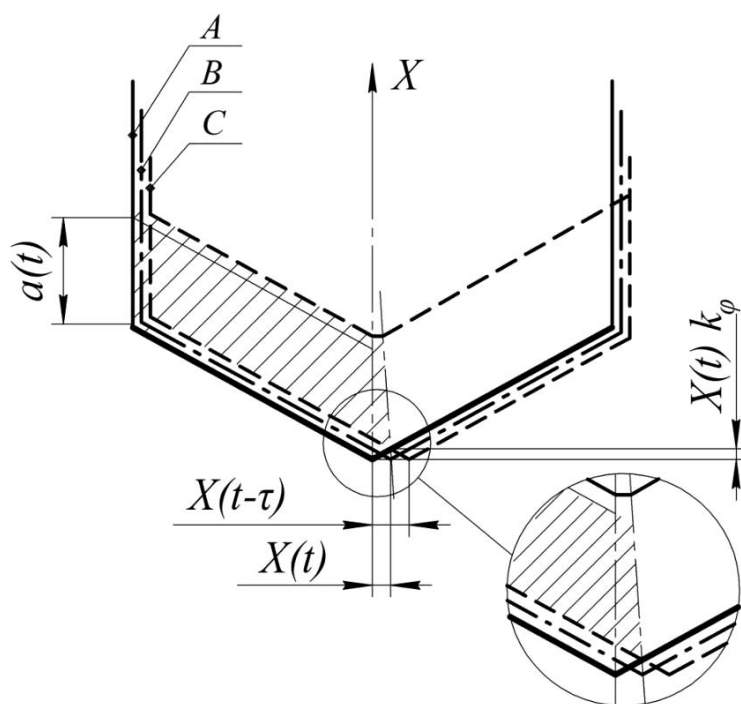


Рисунок 2.8. Положение режущих кромок с учетом упругих деформаций:

A – исходный контур сверла;

B – контур сверла в результате упругих деформаций (податливости) системы;

C – контур сверла после врезания в заготовку.

При врезании сверла в обрабатываемую заготовку, под воздействием на него осевой силы возникают одновременно деформации инструмента $H_{\text{деф.св}}$ и деформация упругой системы станка $H_{\text{ст}}$ в осевом направлении. При этом вступают в силу ряд других причин, порождающих неуравновешенные радиальные силы, перпендикулярные оси вращения сверла, как: погрешности заточки кромок, неперпендикулярность поверхности заготовки к оси вращения сверла, неоднородность по твердости материала заготовки, порождающие дополнительные деформации $X_{\text{рад}}$.

Тогда податливость технологической системы в целом можно записать как:

$$H_y = H_{\text{ст}} + H_{\text{деф.св}}, \quad (2.28)$$

где $H_{\text{ст}}$ – податливость станка в осевом направлении;

$H_{\text{деф.св}}$ – податливость сверла в осевом направлении.

Величину продольной деформации сверла (усадки), рассматривая его как стержень, можно записать:

$$\Delta l = \frac{F_x l}{EF}. \quad (2.29)$$

где F – площадь поперечного сечения сверла;

F_x – сжимающая осевая сила;

E – модуль упругости материала сверла;

l – длина сверла.

Вторую компоненту правой части уравнения (2.28), т.е. податливость станка в осевом направлении, можно определять согласно работе [4], для типовых технологических процессов сверления, из расчета $2 \dots 4 \cdot 10^{-4}$ мм/Н.

Величины радиальных деформаций сверла, возникающих под действием радиальных сил, являющихся следствием непредсказуемых факторов, определять значительно сложнее. Изучению причин зарождения радиальных сил в процессе сверления посвящена работа [81], где сделан анализ влияния условий обработки на характер их измерения.

Рассматривая, согласно [26], упругую технологическую систему как безинерционную, уравнение ее поведения может быть записано в следующем виде:

$$\Delta Y_x(s) = H_x(s) \cdot \Delta F_f(s), \quad (2.30)$$

$$\Delta Y_p(s) = H_p(s) \cdot \Delta F_p(s). \quad (2.31)$$

Увеличение сил резания в результате изменения размера срезаемого слоя может быть представлено передаточной функцией в виде:

$$\Delta F_f(s) = M_x(s) \cdot \Delta a(s), \quad (2.32)$$

$$\Delta F_p(s) = M_p(s) \cdot \Delta a(s). \quad (2.33)$$

Координата вершины сверла в текущий момент времени, с учетом упругих деформаций, определяется из выражения:

$$x(t) = \int_0^t v_f(t) dt - Y_x(t) - k_\phi \cdot Y_p(t), \quad (2.34)$$

где k_ϕ – коэффициент, учитывающий геометрические параметры сверла.

Для момента времени $t - \tau$

$$x(t - \tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t) dt - Y_x(t - \tau) - k_\phi \cdot Y_p(t - \tau), \quad (2.35)$$

2.4 Математическая модель силовой составляющей процесса сверления, учитывающая ее изменение во времени.

Анализ литературных источников показывает, что большая часть представленных моделей не учитывают в своей структуре нестационарную природу процессов, например, изменение сил резания с течением времени. Значительная часть моделей получена эмпирическими методами и имеет ограниченную область применения [25, 67].

В процессе сверления, в зоне контакта режущих кромок инструмента с материалом заготовки возникает энергосиловое взаимодействие, приводящее к формированию новых поверхностей с заданным качеством поверхностного слоя. Традиционно, в теории резания, равнодействующую сил резания R разделяют на составляющие: R_p – сила, расходуемая на «чистое» резание; $R_{тр}$ – сила, преодолевающая трение в процессе резания. Тогда,

$$\vec{R} = \vec{R}_p + \vec{R}_{тр}.$$

При попытке «привязать» силовое взаимодействие к элементам зоны стружкообразования, и выразить это в классической ньютоновской системе, сила, расходуемая на «чистое» резание R_p может быть выражена как:

$$R_p = \sqrt{P_s^2 + P_N^2},$$

где P_s – сила, действующая вдоль плоскости сдвига (рисунок 2.9), и определяемая наличием касательных напряжений τ_s ;

P_N – сила, перпендикулярная плоскости сдвига, и обусловленная нормальным напряжением σ .

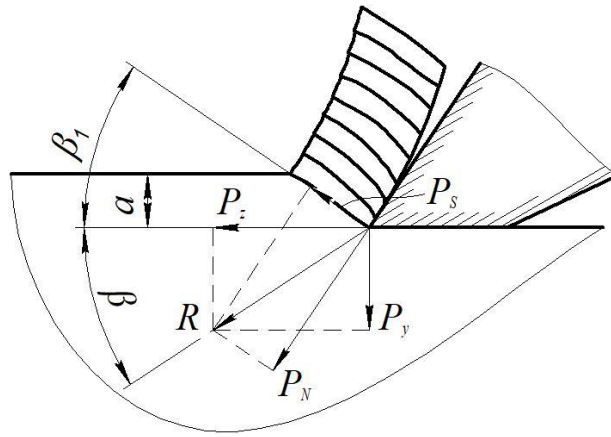


Рисунок 2.9. План сил, действующих при сверлении.

Согласно работы [72] составляющие силы резания определяются следующими соотношениями:

$$P_s = \frac{a \cdot b}{\sin \beta_1} \tau_s, \quad (2.36)$$

$$P_N = \frac{a \cdot b}{\sin \beta_1} \sigma, \quad (2.37)$$

где β_1 – угол между вектором скорости резания и плоскостью сдвига;

b – длина режущих кромок сверла.

Для расчета длины режущих кромок b используется зависимость:

$$b = \frac{d + b_0 \cdot \cos \psi}{\sin \varphi} + b_0,$$

где d – диаметр сверла;

b_0 – длина перемычки;

ψ – угол наклона перемычки;

φ – угол в плане.

В ряде источников [72, 39] указано, что соотношение $\frac{P_y}{P_z}$ для режущего клина из электрокорунда лежит в диапазоне $1 \div 3$, тогда как для лезвийных инструментов оно составляет $\approx 0,5$. В дальнейшем, для упрощения математических зависимостей, допускается соотношение $\frac{\sigma}{\tau_s} = 1,5$, из чего следует $\sigma \approx 1,5 \tau_s$.

Подобное утверждение слишком грубо, и не отвечает реальной картине стружкообразования.

В [72], указывается что соотношение $\frac{\sigma}{\tau_s}$ определяется обрабатываемым материалом, геометрией режущего клина и кинематикой процесса резания. Исходя из чего утверждается, что отношение $\frac{\sigma}{\tau_s}$ близко к значениям усадки стружки K .

При условии, что $\sigma \approx K\tau_s$ и подстановки в (2.37), сила резания R_p выразится как

$$R_p = \sqrt{\left(\frac{ab}{\sin\beta_1} \tau_s\right)^2 + \left(\frac{ab}{\sin\beta_1} K\tau_s\right)^2} = \sqrt{\frac{a^2 b^2 \tau_s^2}{\sin^2\beta_1} + \frac{a^2 b^2 \tau_s^2 K^2}{\sin^2\beta_1}} = \frac{ab\tau_s}{\sin\beta_1} \sqrt{(1+K^2)}. \quad (2.38)$$

При выражении векторов сил прямоугольной системе координат ZOY (см. рисунок 2.9), через полученную R_p , имеем

$$P_{zp} = \frac{ab\tau_s \cos\beta}{\sin\beta_1} \sqrt{(1+K^2)}, \quad (2.39)$$

$$P_{yp} = \frac{ab\tau_s \sin\beta}{\sin\beta_1} \sqrt{(1+K^2)}. \quad (2.40)$$

Сила трения возникающая на задней поверхности за счет наличия площадки износа и направленная вдоль оси Z , определяется из выражения

$$P_{ztp} = \sigma_{cp} l_{из} b, \quad (2.41)$$

где σ_{cp} – средние нормальные напряжения;

$l_{из}$ – ширина площадки износа.

При условии, что $\sigma_{cp} = \frac{\sigma}{3}$ и отношении $\frac{P_{ytp}}{P_{ztp}} = \mu$, получим:

$$P_{ztp} = \frac{l_{из} b}{3} \tau_s K, \quad (2.42)$$

$$P_{ytp} = \frac{l_{из} b}{3} \tau_s \mu K. \quad (2.43)$$

Тогда интегральная составляющая силы резания вдоль осей OZ и OY , выражается как:

$$P_Z = P_{Zp} + P_{Ztp} = \left(\frac{a \cos \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{l_{из}}{3} K \right) b \tau_s, \quad (2.44)$$

$$P_Y = P_{Yp} + P_{Ytp} = \left(\frac{a \sin \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{l_{из}}{3} \mu K \right) b \tau_s. \quad (2.45)$$

Значение углов β и β_1 определяется из следующих условий. Угол β_1 может быть получен из соотношения [66]:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{K - \sin \gamma},$$

тогда

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \gamma}{K - \sin \gamma} \right), \quad (2.46)$$

где γ – передний угол.

Для определения угла β рассмотрим прямоугольник, образованный векторами сил P_s и P_N (см. рисунок 2.9). Отношение указанных сил определяется как тангенс суммы углов β и β_1 :

$$\operatorname{tg}(\beta + \beta_1) = \frac{P_N}{P_s}, \quad (2.47)$$

подставив в (2.47) выражения (2.36) и (2.37) и применяя условие что $\sigma \approx K \tau_s$, получим

$$\operatorname{tg}(\beta + \beta_1) = \frac{a K \tau_s}{\sin \beta_1} \times \frac{\sin \beta_1}{a \tau_s} = K. \quad (2.48)$$

Преобразовав в последнем выражении тангенс суммы как действие аргументов, имеем

$$\frac{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \beta_1}{1 - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \beta_1} = K. \quad (2.49)$$

Решая уравнение (2.49) относительно $\operatorname{tg}(\beta)$ имеем

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{K - \operatorname{tg}\beta_1}{1 + K \cdot \operatorname{tg}\beta_1}, \quad (2.49)$$

угол β_1 определяем по (2.46), а подставив его в (2.49) и осуществив упрощение, получим

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{K(K - \sin\gamma) - \cos\gamma}{K(1 + \cos\gamma) - \sin\gamma}$$

тогда

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{K(K - \sin\gamma) - \cos\gamma}{K(1 + \cos\gamma) - \sin\gamma} \right). \quad (2.50)$$

В зависимости (2.44) и (2.45) входит переменная $l_{\text{из}}$ определяющая составляющую трения по задней поверхности. За счет наличия абразивно-адгезионного износа и увеличения площадки износа, величина силы прогрессирует и может привести к неустойчивости процесса резания, а соответственно к потере качества обработки или поломке инструмента.

Переменная $l_{\text{из}}$ зависит от размерного износа h по передней поверхности. Однако, проанализировав рисунок 2.10 приходим к выводу что напрямую $l_{\text{из}}$ зависит от действительного размерного износа h_p . Действительный износ h_p формируется благодаря наличию заднего угла α , характерного для большинства лезвийного инструмента. В общем случае размерный износ h определяется как

$$h = h_\alpha + h_p, \quad (2.51)$$

где h_α – приращение размерного износа за счет наличия заднего угла α .

Из выражения (2.51) выразим h_p :

$$h_p = h - h_\alpha. \quad (2.52)$$

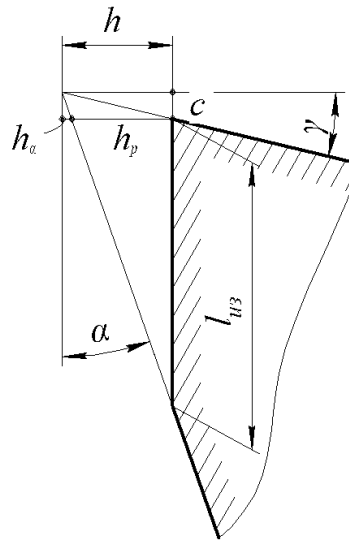


Рисунок 2.10. Картина изменения площадки износа за счет наличия заднего угла α .

Рассмотрев два прямоугольных треугольника (рисунок 2.10), один образованный катетами h и c и передним углом γ , другой катетами h_α и c и задним углом α , имеем:

$$c = h \cdot \operatorname{tg} \gamma,$$

$$c = \frac{h_\alpha}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Приравнивая правые части функций и определяя h_α получим

$$h_\alpha = h \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.53)$$

Подставляя (2.53) в (2.52) имеем функцию действительного износа h_p :

$$h_p = h(1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha).$$

Рассматривая треугольник образованный катетами $l_{из}$, h_p и задним углом α , выразим $l_{из}$:

$$l_{из} = \frac{h_p}{\operatorname{tg} \alpha} = h \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.54)$$

Размерный износ h согласно [56] может быть представлен как:

$$h = h_0 V_p \tau, \quad (2.55)$$

где h_0 – относительный износ;

V_p – скорость резания;

τ – время работы инструмента.

Относительный износ h_0 зависит от условий процесса резания: взаимодействующих материалов, их физико-механических свойств и кинематических параметров, эта переменная может быть выражена следующим образом [42]:

$$h_0 = C_h \frac{\sigma_{\text{ср}}}{H_a}, \quad (2.56)$$

где C_h – безразмерная переменная, зависящая от материала контактирующих тел;

$\sigma_{\text{ср}}$ – нормальные напряжения, действующие в зоне трения;

H_a – микротвердость материала при температуре трения в процессе резания.

Значение микротвердости H_a выражается зависимостью [48]:

$$H_a = A e^{-\alpha_k T_{\text{max}}}, \quad (2.57)$$

где A , α_k – экспериментально определяемые переменные;

T_{max} – температура, оказывающая влияние на величину микротвердости.

В свою очередь, температура T_{max} подчинена следующей функции [80]:

$$T_{\text{max}} = \frac{2q_1 (\varepsilon \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_{\text{и}}}, \quad (2.58)$$

q_1 – интенсивность теплоотвода;

τ – время работы инструмента;

$\lambda_{\text{и}}$ – коэффициент теплопроводности материала.

Упомянутая в функции (2.58) интенсивность теплоотвода q_1 может быть определена как [80]:

$$q_1 = \frac{\alpha_T P_z V_p}{S_k}, \quad (2.59)$$

где α_T – коэффициент температуропроводности материала заготовки;

P_z , V_p – режимы обработки: тангенциальная составляющая силы резания, скорость резания;

S_k – площадь теплового потока.

При условии, что произведение $P_z \cdot V_p$ определяет мощность N_p процесса резания, которая может быть определена экспериментально, выражение (2.60) преобразуется:

$$q_1 = \frac{\alpha_T N_p}{S_k}. \quad (2.61)$$

Последовательная подстановка (2.61), (2.59), (2.58), (2.57) в (2.56) дает следующее выражение

$$h = \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}}. \quad (2.62)$$

Анализируя (2.62) можно сделать вывод что полученная зависимости не противоречит положениям теории износа режущего инструмента. Износ, согласно (2.62), зависит от физико-механических параметров материала инструмента и напряжений в зоне контакта (C_h , σ_{cp} , A , α_k , λ_n , α_T , S_k), кинематики процесса и режимов резания (V_p , N_p , τ), пути резания (произведение $V_p \cdot \tau$).

Дальнейшая подстановка функции (2.62) в (2.54), и затем в (2.44), (2.45) дает следующие выражения

$$P_z = \left(\frac{a \cdot \cos \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s, \quad (2.63)$$

$$P_y = \left(\frac{a \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{\mu K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \times \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s. \quad (2.64)$$

Проведенный численный расчет по зависимостям (2.63) и (2.64) дает результаты, представленные на рисунках 2.11 и 2.12. При этом в качестве экспериментальных данных использованы следующие данные: диаметр сверления – 22 мм; подача инструмента – 0,076 мм/об; обрабатываемый материал – легированная сталь 12X18H10T.

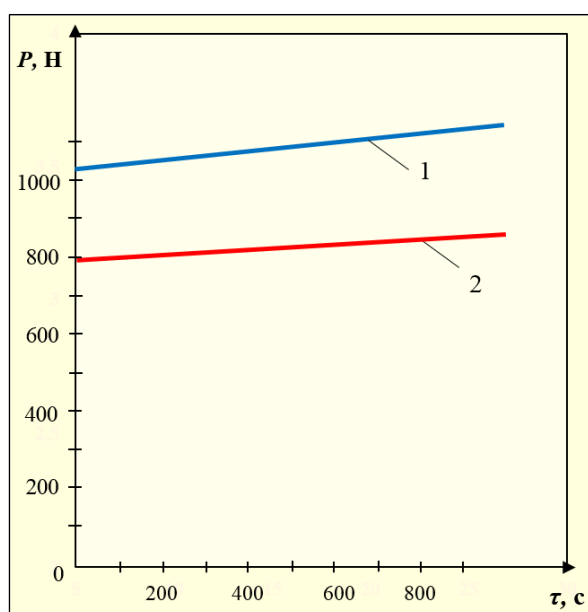


Рисунок 2.11. Изменение тангенциальной и радиальной составляющей силы резания при сверлении:

1 – тангенциальная (P_Z),
2 – радиальная (P_Y) составляющая силы резания.

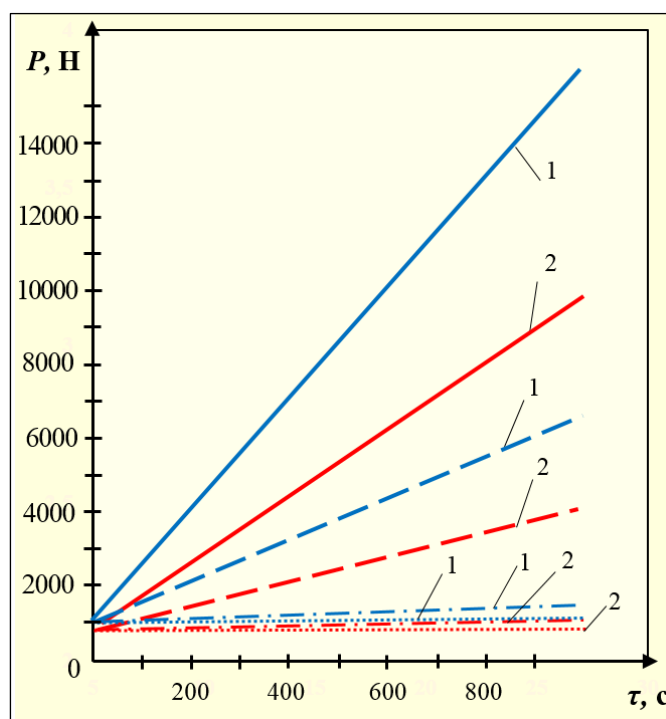


Рисунок 2.12. Изменение составляющих силы резания при сверлении с изменением скорости:

1 – тангенциальная (P_Z),

2 – радиальная составляющая (P_Y):

————— – $V_p = 41$ м/мин,
- - - - - – $V_p = 31$ м/мин,
- . - . - – $V_p = 21$ м/мин,
..... – $V_p = 11$ м/мин.

При расчете скорость резания изменяли: для рисунка 2.11 постоянна и равна $V_p = 11$ м/мин; на рисунке 2.12 представлено семейство графиков по скоростям резания $V_p = 11, 21, 31, 41$ м/мин.

Представленные на рисунках 2.11 и 2.12 графики иллюстрируют постоянное увеличение составляющих силы во времени. Это объясняется наличием износа по задней поверхности, а его интенсивность физико-механическими характеристиками принятого в качестве примера обрабатываемого материала (сталь 12Х18Н10Т). Экстремальное увеличение сил резания при скоростях резания 31 и 41 м/мин (см. рисунок 3.10), может быть объяснено большим путем резания

пройденным вершиной инструмента, по сравнению с меньшими скоростями, а также высокой и увеличивающейся со временем температурой в процессе обработки, приводящей к снижению твердости рабочих поверхностей инструмента, и как результат, повышенному износу. При скоростях 11 и 21 м/мин такого яркого эффекта не наблюдается. Кроме того, скорости 11 и 21 м/мин лежат в диапазоне характерном для наростообразования, а наличие нароста защищает заднюю поверхность заборного конуса сверла от столь интенсивного износа.

2.5 Теплофизическая модель контактного взаимодействия при резании в СОТС

Роль СОТС, при исследовании тепловых процессов резания, сводится к конвективному теплообмену окружающей среды с зоной стружкообразования и уменьшения длины пластического контакта, изменяющего тем самым контактные нагрузки.

Проникновение СОТС в область дискретного контакта, позволяет создавать такие условия взаимодействия, которые зависят от его физико-химических свойств. Рассматривая общий случай область дискретного контакта взаимодействия передней поверхности режущего инструмента со стружкой и задней поверхности с обрабатываемой заготовкой, можно наблюдать граничное и полужидкостное трение.

Происходящие теплофизические процессы в рассматриваемой зоне косвенно влияют на тепловую нагруженность зоны стружкообразования и режущего клина.

Рассматривая область полужидкостного и жидкостного трения на основе модельного описания, можно представить следующей схемой (рисунок 2.13).

Основным тепловым элементом является стружка 1, которая образовываясь, перемещается по передней поверхности режущего инструмента 2. При этом жидкостной слой 5 находится между поверхностями режущего инструмента и стружки, покрытые тонким адсорбированным слоем 3 и 4.

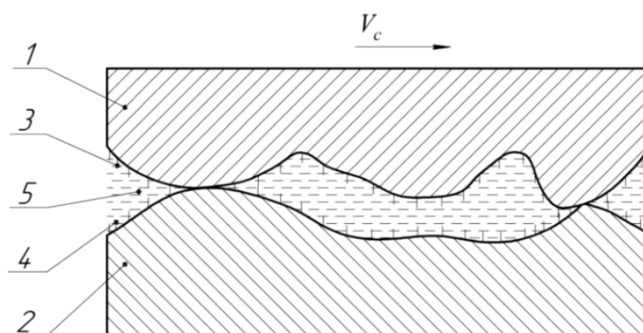


Рисунок 2.13. Модель области дискретного контакта при резании с СОТС [103].

Уравнение теплового баланса для данной зоны контактного взаимодействия поверхностей сверла и стружки, обладающей дегидратацией примет вид:

$$Q_c + Q_{тр} = Q_{СОТС} + Q_{кон} + Q_{дг} \quad (2.65)$$

где Q_c – теплота, выделяемая в зоне образования стружки;

$Q_{тр}$ – теплота, выделяемая трением стружки об заготовку и о переднюю поверхность лезвия инструмента;

$Q_{СОТС}$ – поглощаемая теплота СОТС при ее нагреве;

$Q_{кон}$ – теплота, уносимая конвективным путем из зоны резания;

$Q_{дг}$ – теплота дегидратации (поглощаемая теплота) присадки СОТС.

В работе [103] предположено, что скорость перемещения стружки относительно велика и большую часть тепла она передала СОТС, омывающая зону резания, и внутренняя поверхность стружки в рассматриваемой области уже покрыта адсорбционным слоем и ламинарной прослойкой, то тепло, которое вносится в зону рассматриваемого взаимодействия, будет несущественным и первым членом уравнения (2.65) можно пренебречь.

Выделяемую теплоту трения стружки об переднюю поверхность лезвия инструмента и обработанную поверхность, с учетом износа инструмента представим в виде равенства:

$$Q_{тр} = P_z \cdot V_p \cdot \tau, \quad (2.66)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания;

V_p – скорость резания;

τ – продолжительность процесса.

Поглощаемая теплота СОТС при ее нагреве определим из соотношения:

$$Q_{\text{СОТС}} = C_v \cdot M \cdot T, \quad (2.67)$$

где C_v – удельная теплоемкость СОТС;

M – масса СОТС, участвующая в контактном процессе;

T – температура нагрева СОТС при сверлении.

Теплота, уносимая СОТС из зоны резания конвективным процессом теплообмена, определяется в следующем виде:

$$Q_{\text{кон}} = k \cdot F \cdot T \cdot \tau, \quad (2.68)$$

где k – коэффициент теплоотдачи;

F – контактная площадь инструмента и стружки рассматриваемой области.

В нашем случае, конвективные процессы происходят на границе между СОТС и поверхностью режущего инструмента, где коэффициент теплоотдачи k определяется уравнением Ньютона-Рихмана. Однако использование данного уравнения имеет определенную сложность, заключающуюся в том, что коэффициент не является константой величиной в зависимости от материала, а является характеристикой протекающего процесса.

Согласно работе [103], скрытая теплота термодеструкционных (экзотермических) реакций СОТС, рассчитывается по методике, представленной в работе [71] и имеет следующий вид:

$$Q_{\text{т.д}} = \alpha \cdot M \cdot \Delta H \cdot \tau, \quad (2.69)$$

где α – доля смазки, участвующая в контактном процессе, подверженная термодеструкции;

$\Delta H_{\text{т.д}}$ – энтальпия термодеструкции СОТС или ее компонентов.

Далее теплоту термодеструкции ($Q_{\text{т.д}}$) масляной основы СОТС, нами не будет учитываться, т. к. нас интересует явление дегидратации наноглинистой минеральной присадки (НГМП), которая протекает в общем случае при других температурах.

Теплоту дегидратации НГМП в нашем случае будет представляться по аналогии работы [103], с учетом коэффициента ($f_{\text{вл}}$), который характеризует степень влажности НГМП.

Таким образом, теплоту дегидратации НГМП представим в виде:

$$Q_{\text{д.г}} = M_{\text{к}} \cdot \Delta H \cdot \tau \cdot f_{\text{вл}}, \quad (2.70)$$

где $M_{\text{к}}$ – масса НГМП введенная в СОТС;

M – полная масса СОТС с учетом массы НГМП;

ΔH – энтальпия дегидратации НГМП, зависящая от степени ее обезвоживания, которая определяется по дериватограмме, как энергия отрыва молекул воды с поверхности адсорбционного слоя присадки;

$f_{\text{вл}}$ – коэффициент влажности НГМП.

С учетом вышеописанного, уравнение теплового баланса (2.65) запишем в дифференциальном виде:

$$P_z \cdot V_p \cdot d\tau = C_v \cdot M \cdot dT + k \cdot F \cdot T \cdot d\tau + M_{\text{к}} \cdot \Delta H_{\text{дг}} \cdot f_{\text{вл}} \cdot d\tau. \quad (2.71)$$

После преобразования имеем:

$$\frac{P_z V_p}{M} = C_v \frac{dT}{d\tau} + kT \frac{F}{M} + \frac{M_{\text{к}} \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H_{\text{дг}}}{M}. \quad (2.72)$$

Отношение $\frac{F}{M}$ запишем в следующем виде:

$$\frac{F}{M} = \frac{F}{W \cdot \gamma} = \frac{F}{F \cdot h_{\text{ср}} \cdot \gamma} = \frac{1}{h_{\text{ср}} \cdot \gamma}, \quad (2.73)$$

где $h_{\text{ср}}$, W – средняя толщина слоя и объем СОТС, которая участвует в процессе контакта между передней поверхностью режущего инструмента и стружки;

γ – плотность СОТС с учетом НГМП.

С учетом (2.73) дифференциальное уравнение (2.72) после преобразований примет вид:

$$\frac{P_z V_p}{M} - C \frac{dT}{d\tau} - T \frac{k}{h_{\text{ср}} \cdot \gamma} - \frac{M_{\text{к}} f_{\text{вл}}}{M} \Delta H = 0, \quad (2.74)$$

или

$$\frac{dT}{d\tau} + T \frac{k}{h_{cp} \cdot \gamma \cdot C} = \frac{P_z \cdot V_p}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H}{M \cdot C}. \quad (2.75)$$

Полученное уравнение (2.74) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Для его решения член $\frac{k}{h_{cp} \cdot \gamma \cdot C}$

обозначим через a , а правый член $\frac{P_z \cdot V_p}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H}{M \cdot C}$ обозначим через b .

Тогда получим уравнение $T' + aT = b$, решение которого имеет вид:

$$T = e^{-at} \left(\frac{b}{a} e^{at} + e \right) = \frac{b}{a} + A e^{-at}$$

и преобразовав его получим:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H) h_{cp} \gamma}{M \cdot k} + A \cdot \exp \left(-\frac{k \cdot \tau}{h_{cp} \cdot \gamma \cdot C} \right) \quad (2.76)$$

где A – постоянная интегрирования, которая определяется при начальных условиях $T = 0, \tau = 0$

$$A = -\frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H) h_{cp} \gamma}{M \cdot k}. \quad (2.77)$$

В конечном виде решение уравнения (2.72) примет вид:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H) h_{cp} \gamma C}{M \cdot k \cdot C} \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{k \cdot \tau}{h_{cp} \cdot \gamma \cdot C} \right) \right). \quad (2.78)$$

Параметр $\tau_0 = \frac{C \cdot h_{cp} \cdot \gamma}{k}$ есть стационарное время установления температуры

для системы «инструмент-стружка-COTC».

Если обозначить $\theta = \frac{k}{h_{cp} \cdot \gamma \cdot C}$

то зависимость (2.78) преобразится:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H) \theta}{M \cdot C} \cdot (1 - \exp(-\theta \tau)). \quad (2.79)$$

С учетом тангенциальной силы резания (2.63), зависимость (2.79) в окончательном виде получим:

$$T = \left[\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{1 + K^2} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{\text{ср}}}{Ae^{-2\alpha_k} \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}} \cdot \left(\frac{1 - \text{tg} \gamma \cdot \text{tg} \alpha}{\text{tg} \alpha} \right) \right) \frac{b \tau^2}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H \cdot \theta}{M \cdot C} \right] \times (1 - \exp(-\theta \tau)). \quad (2.80)$$

На рисунке 2.14 представлено общее решение уравнения (2.74) для различных значений параметра θ .

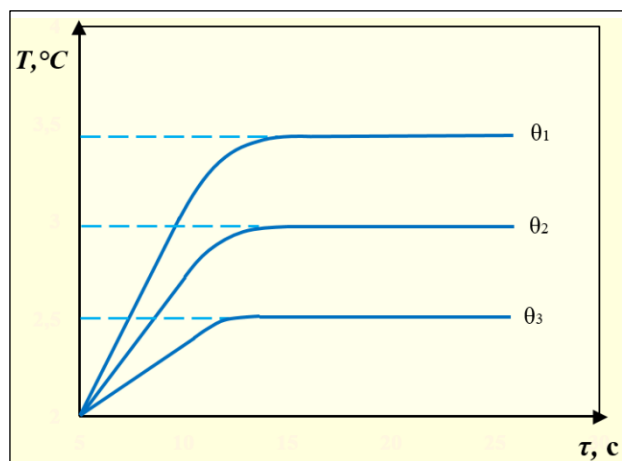


Рисунок 2.14. Температура СОТС в зависимости от времени и параметра Θ [103].

Полученное выражение (2.80) отражает влияние теплофизических и гидродинамических свойств смазки на процесс резания. Можно предполагать, что понижение температуры СОТС возможно за счет снижения динамической вязкости, а увеличение энтальпии термодеструкции может снизить температуру.

Численное значение теоретической зависимости (2.80) выполнено с помощью ПК для операции сверления в зависимости от скорости резания V_p при

обработке нержавеющей стали 12X18H10T при подаче различных СОТС, результаты которого представлены на рисунке 2.15.

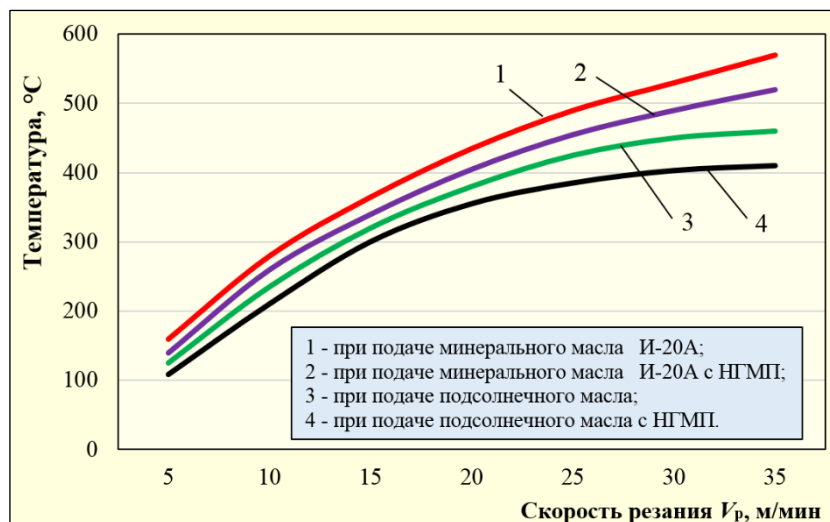


Рисунок 2.15. Влияние скорости резания и различных составов СОТС на температуру резания.

Расчеты выполнялись для следующих условий: режущий инструмент — сверло из быстрорежущей стали Р6М5. Принятый допустимый износ по задней поверхности $h = 0,5$ мм. Рассчитанное для данных условий значение коэффициента теплопроводности материала заготовки $\alpha_T = 2,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/м² °С.

Проверку теоретических зависимостей проводили с применением стандартных СОТС и с применением масляной СОТС, разработанной на кафедре автомобильного транспорта. Результаты приведены на рисунке 2.16.

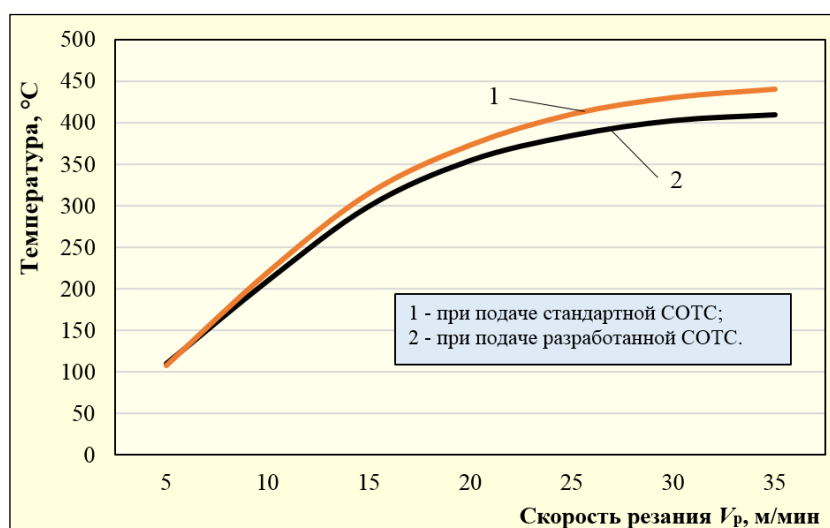


Рисунок 2.16. Влияние скорости резания и различных составов СОТС на температуру резания.

Анализ графика показывает, что применение разработанной масляной СОТС по сравнению со стандартными, позволяет снизить температуру в зоне резания за счет охлаждающего (эндотермического) эффекта, которое обеспечивает присадка наноглинистого минерала, прошедшая специальную обработку. Наличие присадки наноглинистого минерала, наряду с охлаждающим эффектом, дополнительно повышает смазывающее действие СОТС, что и обеспечивает максимальное снижение температуры резания.

Проверка адекватности полученных зависимостей выполнялась путем сравнения теоретических зависимостей с экспериментальными данными.

Рассмотрим изменение энтальпии процесса дегидратации НГМП в СОТС, теплоемкость которой зависит от температуры и изменяются ступенчато в момент перехода с одного состояния в другое.

В общем виде уравнение для расчета изменения энтальпии системы СОТС, будет следующим:

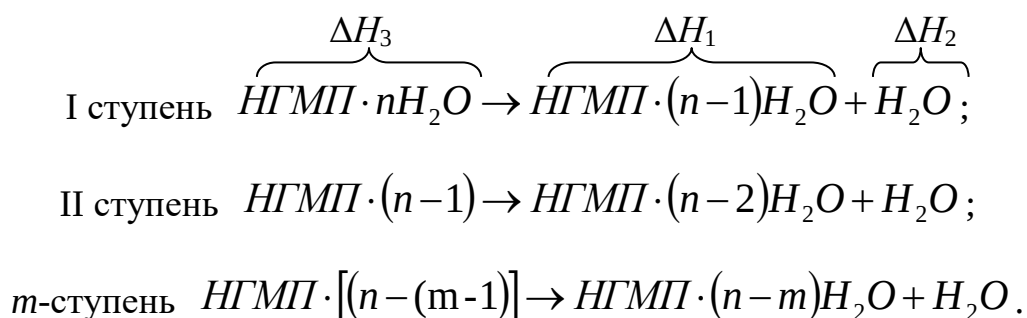
$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = H_{298}^0 + \int_{298}^{T_2} C_p dT, \quad (2.81)$$

или $\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_p^0 (T_2 - 298)$

где ΔH_{298}^0 – стандартная энтальпия при стандартных условиях;

C_p – молярная теплоемкость присадки в СОТС.

Процесс дегидратации присадки наноглинистого минерала, который будет происходить ступенчато, можно представить в следующем виде:



Следовательно, энтальпия дегидратации для каждой из ступеней составит:

$$\Delta H_{\text{д.г.}} = (\Delta H_1 + \Delta H_2) - \Delta H_3$$

Изменение энтальпии НГМП в зависимости от температуры СОТС, происходит ступенчато за счет отрыва молекул воды с адсорбционного слоя воды, схематично показано на рисунке 2.17 на примере трехступенчатом изменении энтальпии системы СОТС.

Следующая ступень изменения энтальпии возможна, но уже в случае отрыва структурированной воды с поверхности минерала, что происходит при более высоких температурах.

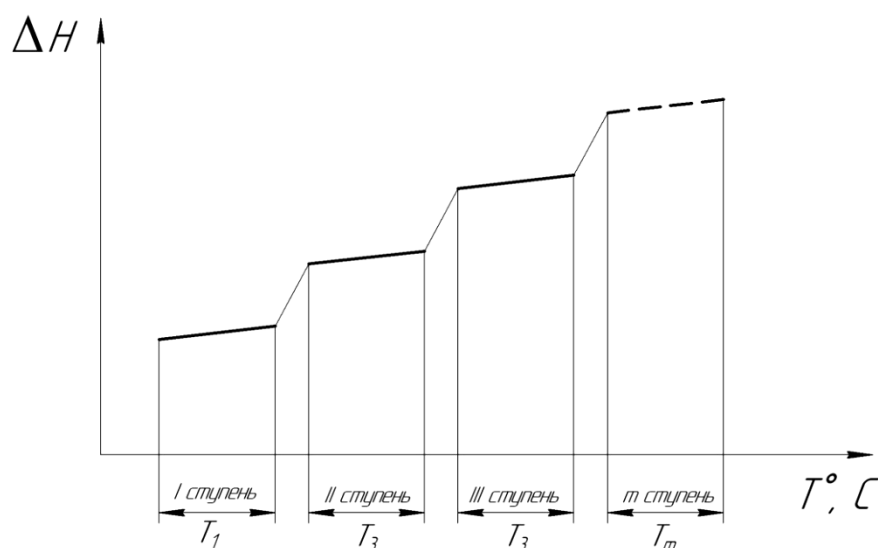


Рисунок 2.17. Ступенчатое изменение энтальпии системы СОТС с НГМП в зависимости от температуры СОТС.

Анализ рисунка 2.17 показывает, что присадки с большим скачком энтальпии (ΔH) приводит к большему снижению температуры СОТС.

Рассмотренные выше свойства разработанной СОТС, позволяют прогнозировать снижение площади контакта режущего инструмента с заготовкой за счет гидорасклинивания структурных пакетных слоев присадки, обладающей контактной прочностью, обеспечивающие гидросмазку между ними и способствуя повышению триботехнической эффективности.

Выводы по главе

1. Для решения поставленных задач и целей операция сверления рассмотрена как динамическая система, где процесс формообразования поверхности исследуется не только в пространстве, но и во времени. При структурном анализе операция расчленена по функциональным признакам на подсистемы станка, приспособления, инструмента, детали, СОТС, зоны контакта. Определены, входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем.

2. Разработана динамическая математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе. Установлены закономерности влияния деформаций рабочей части сверл на точность отверстий, получены зависимости, позволяющие выполнять аналитические расчеты для вновь проектируемых и действующих операций сверления

3. Получены аналитические зависимости для расчёта составляющих сил резания, учитывающее износ режущих кромок сверла.

4. Установлены закономерности изменения энтальпии присадки наноглинистого минерала от температуры СОТС и ее влияние на снижение температуры СОТС в зоне резания.

5. Получены математические выражения, позволяющие осуществлять расчет температур в зоне контакта за период стойкость инструмента, зависимости для расчёта составляющих сил резания, учитывающее износ режущих кромок сверла.

6. Для непосредственного использования полученных теоретических результатов необходимы экспериментальные исследования по определению входящих в состав модели параметров и проверка их адекватности полученных зависимостей реальному процессу.

ГЛАВА 3.

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МОДЕЛИ. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

3.1 Задачи и методика экспериментальных исследований

Основными задачами экспериментальных исследований являются:

- получение эмпирических зависимостей влияния параметров процесса сверления на износ и стойкость режущего инструмента;
- проверка адекватности разработанных математических моделей, реальному процессу сверления.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедры технологии машиностроения ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова на специальном стенде (рисунок 3.1).

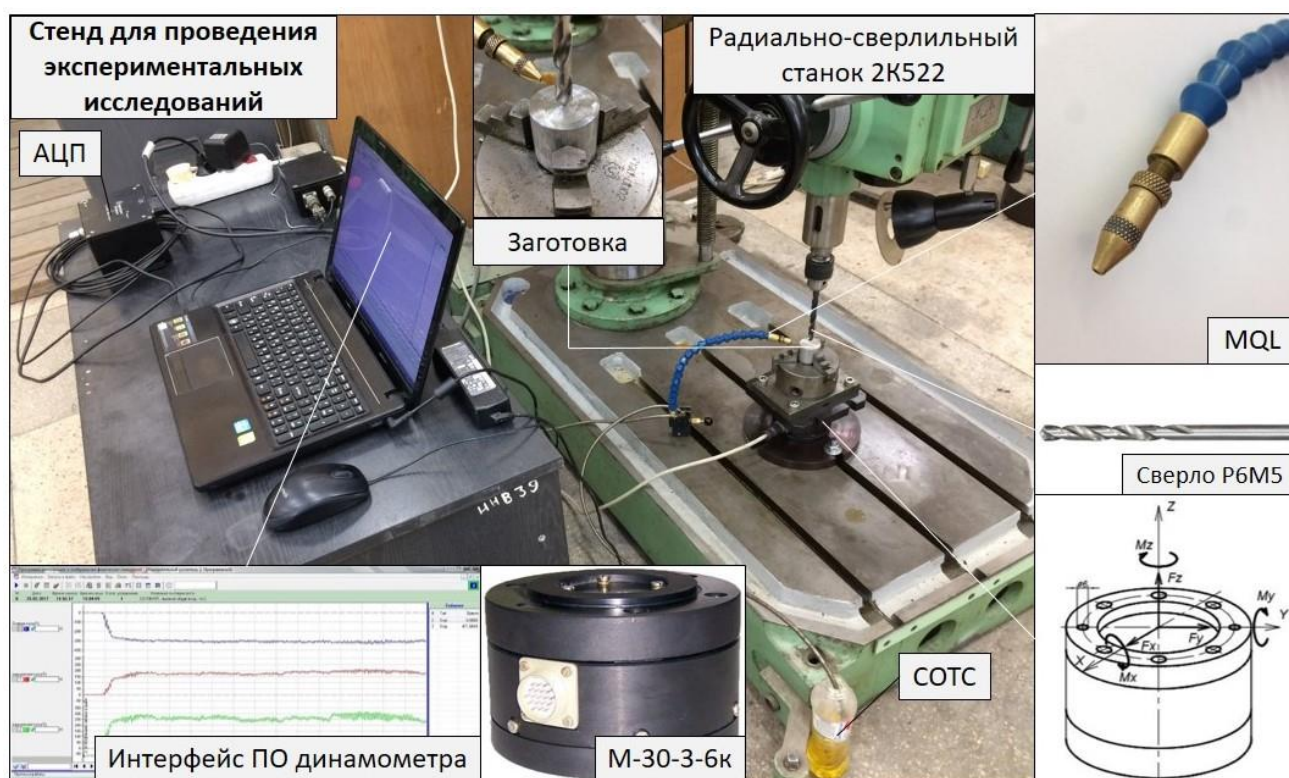


Рисунок 3.1. Общий вид стенда для проведения экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве режущего инструмента использовались спиральные сверла с коническим хвостовиком ГОСТ 10903-77.

При проведении технологических испытаний в качестве обрабатываемого материала применялась коррозионная стойкая сталь 12X18H10T (ГОСТ 5632-2014), имеющая временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 0,55 \cdot 10^9$ Н/м². Заготовки были изготовлены из материала одной партии в состоянии поставки (HRC 89-92).

Объекты экспериментальных исследований и контролируемые параметры, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Объекты экспериментальных исследований и контролируемые параметры

Объект исследований	Наименование параметра
Станок-приспособление $Z_{СП}$	Приведенная масса (M) Жесткость (осевая или радиальная) (C) Коэффициент демпфирования колебаний (H)
Инструмент $Z_{И}$	Средний износ сверла по задней поверхности. Износ сверла у уголков. Углы заточки Длина режущих кромок инструмента, участвующих в процессе стружкообразования (b) Твердость инструмента HRC - с покрытием - без покрытия Стойкость сверла
Заготовка Z_3	Химический состав материала Твердость HRC Диаметр отверстия на j -м обороте Погрешность на j -м обороте
Зона контакта $Z_{ЗК}$	Толщина срезаемого слоя (a) Коэффициент утолщения стружки (K_a) Значение температуры при обработке отверстия на j -м обороте. Тангенциальная составляющая силы резания P_z . Контактная жесткость между задней поверхностью инструмента и поверхностью резания (материал инструмента -

Объект исследований	Наименование параметра
	материал заготовки) (H_α);
Смазочно-охлаждающая технологическая среда $Z_{\text{СОТС}}$	Основа СОТС Метод активации Присадка

Для экспресс-испытания, согласно пункта 5.5.1 ГОСТ Р 52338-2005, использовались быстрорежущие стандартные сверла класса точности А по ГОСТ 2034-80. Для лабораторно-станочных испытаний, по требованиям того же пункта ГОСТ Р 52338-2005 использовался стандартный инструмент повышенной точности класса А1 (повышенный по ГОСТ 2034-80). На рабочих поверхностях сверл не допускали прожогов и глубоких поверхностных трещин.

Обработку производили спиральными сверлами из быстрорежущей стали марки Р6М5 со следующими параметрами: диаметр сверла $d = 10,0 \dots 22,0$ мм; угол заточки $2\varphi = 118^\circ$; длина $l = 130$ мм, осевая жесткость $C = 1,85 \cdot 10^8$ Н/м². Контактная жесткость между задней поверхностью режущего инструмента и обрабатываемой заготовкой $H_\alpha = 1 \cdot 10^{12}$ Н/м.

Подача СОТС осуществлялась как поливом, так и технологией минимальной смазки и были получены графики износа в зависимости от применяемых СОТС. Затем были проведены экспериментальные исследования с применением сверл диаметром 22 мм с внутренним подводом СОТС. Выбор геометрических параметров таких сверл обусловлен тем, что при больших диаметрах можно качественно оценить влияние СОТС на процесс резания и конструктивными особенностями, а именно наличием внутренних каналов, что гарантирует проникновение СОТС в контактную зону.

В качестве СОТС при сверлении применялись: подсолнечное масло, минеральное масло «Индустриальное-20А» (ГОСТ 20799-75), модифицированное минеральное масло И-20 с присадками наноглинистых минералов и модифицированное подсолнечное масло с присадками наноглинистых минералов.

СОТС подавали в зону резания в процессе экспериментальных исследований свободно падающей струей, где расход оставался постоянным, равным 0,5 л/мин.

Для изучения процесса сверления деталей была использована установка, оснащенная комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющим получать значительный объем информации об обрабатываемой детали, износе инструмента, величине составляющей силы резания, возникающей в процессе сверления.

Величину износа режущих кромок сверла Δh определяли измерением по задней главной поверхности при подаче различных составов СОТС до и после сверления.

Измерение износа режущих кромок инструмента производили с помощью инструментального микроскопа ИМЦЛ 150х75 (2), Б с точностью цифрового отсчета до 4-го знака после запятой, погрешностью при измерении до 3-го знака и при 40-кратном увеличении. С целью обеспечения базирования сверла с учетом его геометрических параметров было использовано специальное зажимное устройство (рисунок 3.2).

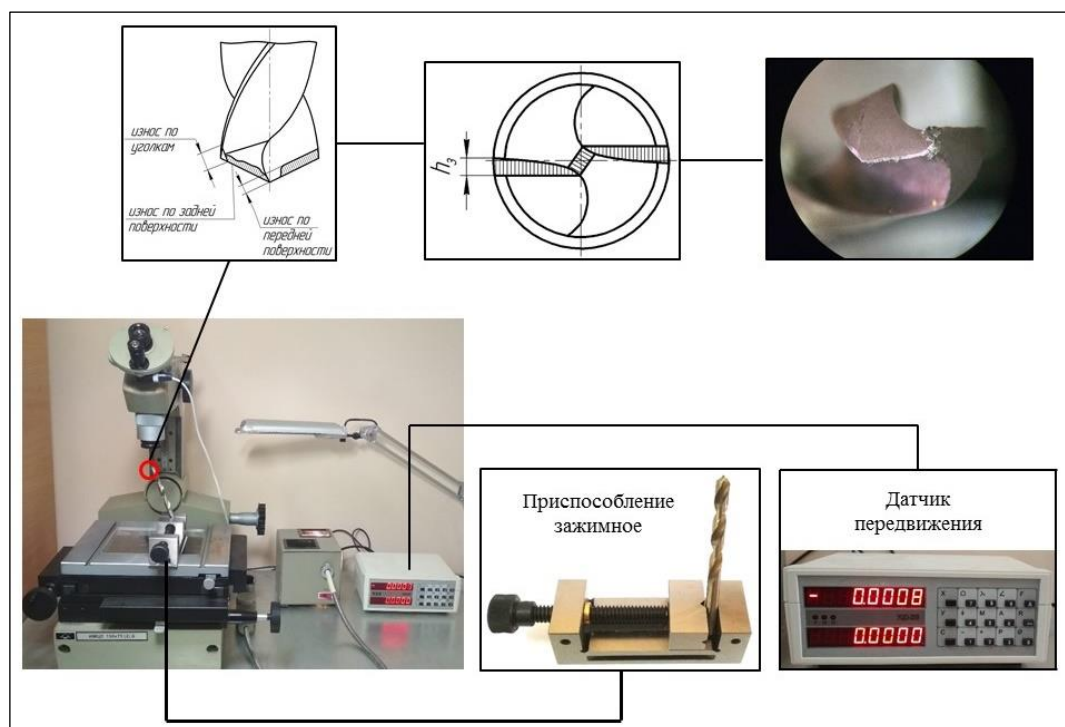


Рисунок 3.2. Установка для измерения износа режущего инструмента.

Замеры производились по задней главной поверхности, предварительно очищая поверхность от нароста. Путем продольного и поперечного перемещения стола инструментального микроскопа находилась максимальная величина износа. Критерием стойкости сверла был принят износ по задней поверхности, значение которого был принят согласно ГОСТ 2034-80 – $h_3 = 0,35$ мм.

Погрешность данного метода измерения Δh не превышает $\pm 0,005$ мм. Износ режущих кромок сверла в единицу времени S_h вычисляли как отношение износа Δh к времени работы инструмента.

Для достоверности стойкостных данных экспериментальные исследования проводились по 3 раза.

Оценку триботехнических свойств масляной СОТС с НГМП проводили по методике определения коэффициента трения – «верчение конуса по конусу» [31] на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 3.3, на базе вертикально-сверлильного станка модели 2Н125.

Для оценки коэффициента трения был использован трехкомпонентный динамометр УДМ-600 (1), показания которого усиливались аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (13) и фиксировались персональным компьютером (14). С помощью динамометра измеряли крутящий момент, который потом пересчитывали на коэффициент трения.

Работа динамометра основана на тензометрии. Под действием измеряемой нагрузки, например, при нагружении осевой силой P_o , деформируются вертикальные опоры, на которые наклеены строго вдоль образующих проволоочные датчики сопротивления с базой 10 мм и номинальным сопротивлением 100 Ом.

На вертикальные опоры наклеены по одному датчику, которые служат для измерения P_o , а на опоры с горизонтальным расположением наклеены по два датчика. Первые служат для измерения сил P_x и P_y , а вторые для измерения $M_{кр}$.

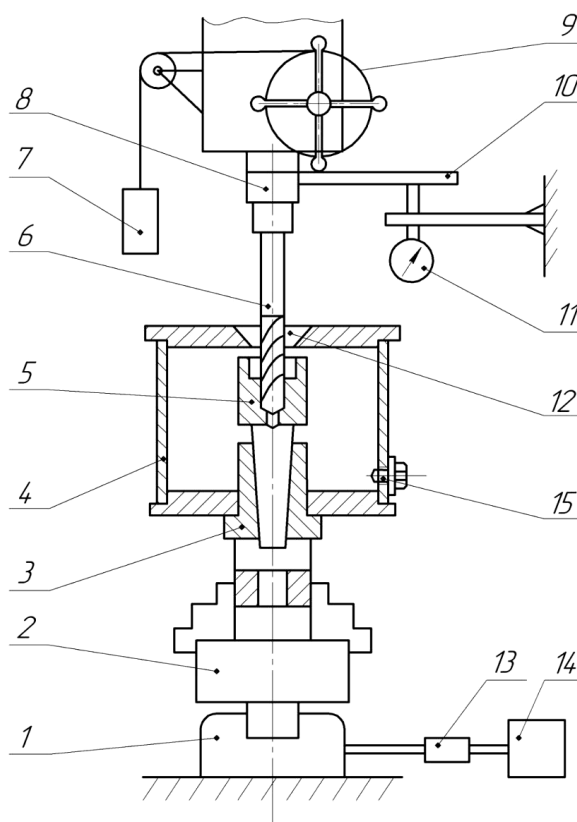


Рисунок 3.3. Схема установки для экспресс-испытания экспериментальной СОТС методом измерения крутящего момента при трении пары индентор-контртело:

- 1 – динамометр УДМ-600; 2 – кулачковый шпиндель; 3 – оправка с внутренним конусом; 4 – полый цилиндр; 5 – контртело; 6 – индентор (сверло); 7 – груз; 8 – шпиндель станка; 9 – барабан; 10 – рычаг; 11 – индикатор часового типа; 12 – воронка; 13 – усилитель сигнала УДМ; 14 – персональный компьютер; 15 – штуцер для слива СОТС.

Проволочные датчики, наклеенные на вертикальные опоры, соединены таким образом, что сигнал измерительной системы пропорционален алгебраической сумме деформаций всех вертикальных опор. При такой комбинации подключения датчиков показания динамометра не зависят от точки приложения силы резания. Далее сигнал поступает на тензостанцию, где осуществляется преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал для персонального компьютера. Последний, с помощью специального программного обеспечения, обрабатывает получаемые результаты.

Во избежание путаницы индексации направлений действия сил по Декартовой системе координат (X , Y , Z) и индексации сил, действующих на сверло, рассмотрим последнюю схему более детально.

Для обеспечения максимально возможной точности получаемых результатов перед экспериментом динамометр был тарирован (рисунок 3.4).

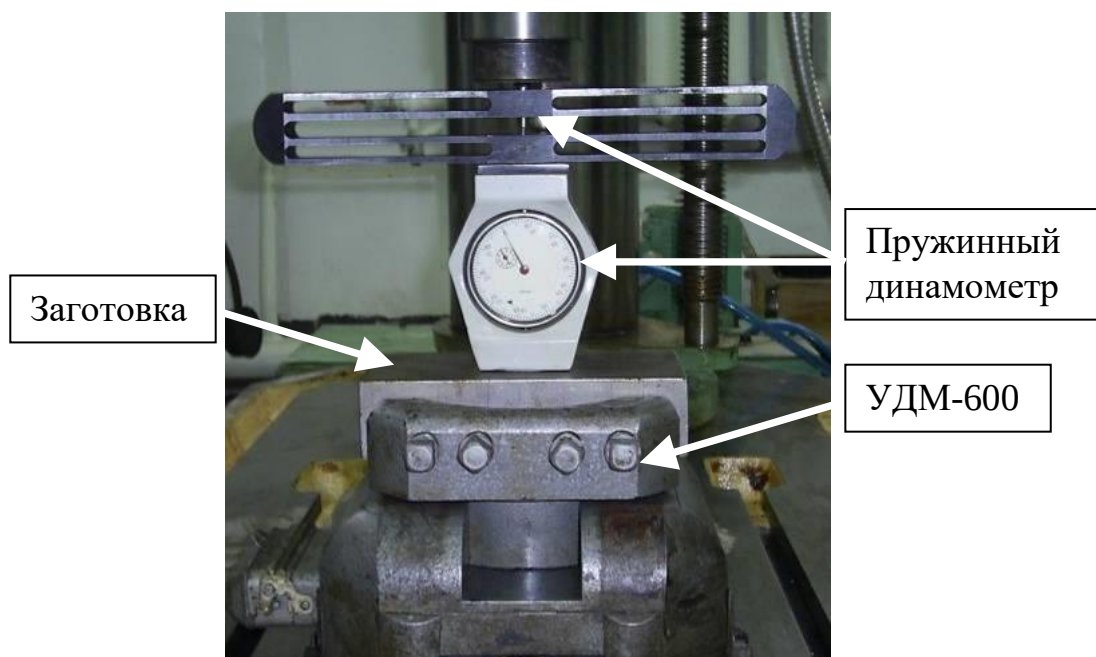
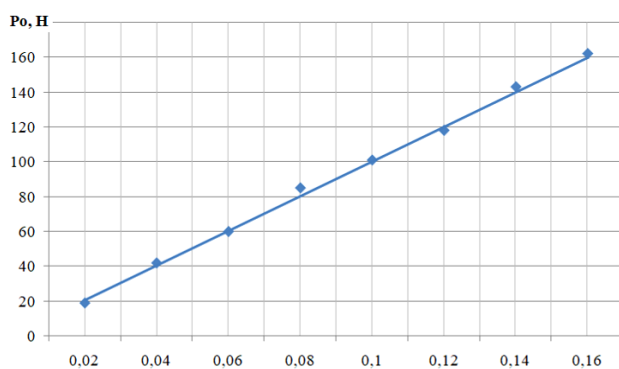
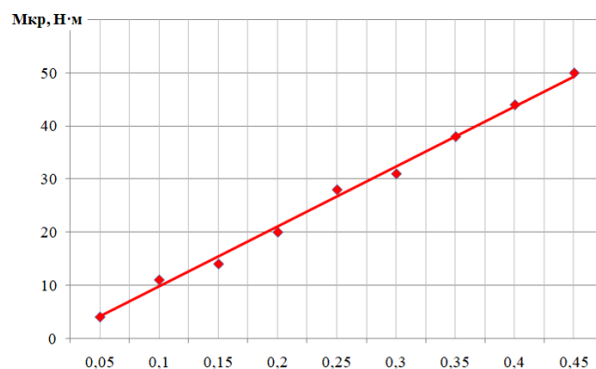


Рисунок 3.4. Тарирование УДМ-600 с помощью пружинного динамометра.

Для этого с помощью пружинного динамометра создавались различные фиксированные осевые усилия. Затем, с помощью динамометрического ключа создавался крутящий момент, который также регистрировал динамометр и результат выводился на экран ПК. Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Тарировочный график имел линейный характер и представлен на рисунке 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5. Тарировочные графики:

а) осевой силы; б) крутящего момента.

Погрешность динамометра УДМ-600 и АЦП составила соответственно 6% и 2%, а погрешность измерения амплитуд сигналов на экране ПК – 2%. Общая погрешность при использовании данной методики составляет не более 10%.

Установка служила своеобразным трибометром, позволяющим имитировать процесс граничного трения, соответствующий процессу сверления. В качестве активного элемента пары трения – индентора использовалось сверло, подвергнутое специальной переточке (рисунок 3.6), обеспечивающее процесс трения скольжения инструмента по конической поверхности контртела, которое утратило способность врезаться в обрабатываемый материал 4.

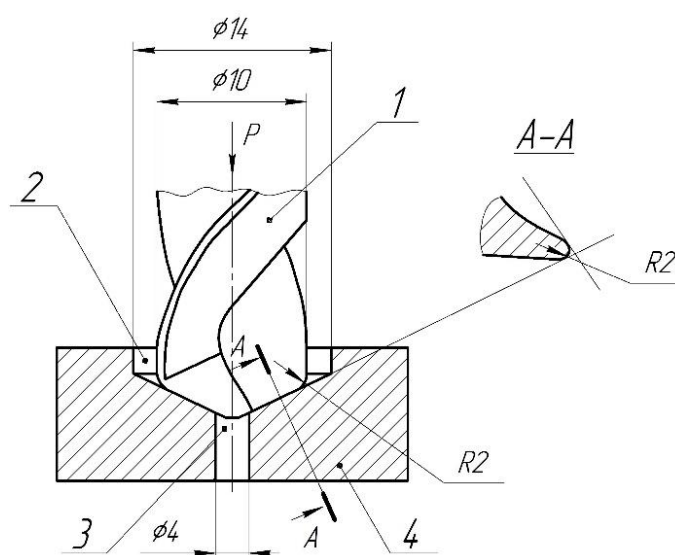


Рисунок 3.6. Геометрия индентора и контртела для моделирования процесса трения в зоне резания при сверлении:

1 – сверло, подвергнутое переточке (индентор); 2 – круговой паз для подачи в зону резания испытуемой СОТС; 3 – отверстие исключаящее контакт контртела с перемычкой сверла; 4 – контртело.

Вторым элементом пары трения являлось контртело 4 с отверстием 3. Отверстие 3 служит для исключения контакта перемычки сверла с контртелом и одновременного протока СОТС и удаления продуктов износа.

При проведении испытаний по определению коэффициента трения создавалась осевая сила P_0 , приближенная по величине к осевой силе при сверлении – $P_0 = 2000$ Н при частоте вращения $n = 500$ об/мин.

Ход эксперимента был следующим. На динамометр крепили контртело и в круговой паз 2 подавали испытуемую СОТС. Запускали станок с установленным в патроне индентором и равномерно, в течении 10 секунд повышали нагрузку на контртело до достижения требуемого значения P_0 , с фиксацией через каждую секунду момента трения, который регистрировался с помощью динамометра.

Затем по максимальным значениям момента трения и прикладываемой осевой силы рассчитывали коэффициент трения μ по формуле:

$$\mu = \frac{4M_{\text{тр}}}{(D + d_0) \cdot P_0 \cdot \sin \varphi}.$$

Перед экспериментом фрикционные пары в течение 10 минут прирабатывались с пастой, содержащей 20% абразива Al_2O_3 (средний размер абразивных частиц составлял 4 мкм) и 80% С-5. В процессе работы к инструменту прикладывалась осевая нагрузка P . Для определения абсолютных значений крутящего момента прибор (УДМ-600) был тарирован. Установка позволяла из суммарных энергозатрат, происходящих при сверлении, выделить чисто фрикционную составляющую, которая является функцией состава смазочного материала.

Дальнейшие исследования проводились после завершения экспресс испытаний, с целью выявления технологической эффективности НГМП к масляной субстанции СОТС, применительно к технологической схеме при натурной обработке заготовок из типовых представителей групп обрабатываемости материалов.

Сверление заготовок из коррозионной стойкой стали 12Х18Н10Т при проведении испытаний экспериментальной СОТС, проводились, для исключения влияния оборудования, на радиально-сверлильном станке модели 2К52, оснащенном устройством для подачи СОТС, обеспечивающим технологию минимальной смазки (ТМС) фирмы NOGA (Израиль).

Для регистрации нормальной составляющей силы резания при сверлении, возникающие при обработке образцов измеряли по стандартной методике, при помощи трехкомпонентного динамометра М-30-3-6к, установленного на столе

станка.

Генерируемый сигнал от М-30-3-6к поступал на АЦП, который обрабатывался с помощью персонального компьютера (ПК). Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 3.1. Для защиты комплекса измерительной аппаратуры от попадания СОТС устанавливался полиэтиленовый экран.

Для обеспечения максимально возможной точности получаемых результатов перед экспериментом динамометр был тарирован. Для этого с помощью пружинного динамометра создавались различные фиксированные осевые усилия, которые регистрировал динамометр.

В качестве заготовки использовались бруски из коррозионной стойкой стали 12Х18Н10Т. Выбор этих материалов обусловлен большим спектром применения их в различных отраслях промышленности, например, для изготовления корпусов, фланцев, крышек и т.д. работающих в агрессивных средах.

Заготовка крепилась непосредственно на динамометре М-30-3-6к. Сверление отверстий проводились вдоль заготовки, что позволяло фиксировать осевую силу P_0 и крутящий момент $M_{кр}$.

Скорость резания V_r изменялась от 5 до 30 м/мин. Подача S от 0,044 до 0,35 мм/об. Сверление отверстий велось при отношении длины отверстия к его диаметру (L/d) от 1 до 5.

ПК был оснащен программным обеспечением на базе Windows, который принимал сигнал от усилителя и блока передачи данных. Затем с помощью программного обеспечения, аналоговый сигнал, поступающий от М-30-3-6к преобразовывался в цифровой, и выводился в графическом виде на экран монитора ПК (см. рис. 3.5). Полученные данные на экране монитора сохранялись в ПК в виде графиков и числовых значений, что необходимо для дальнейших анализов.

Перед проведением экспериментов осуществлена настройка аппаратной части устройства и программного обеспечения ПК с блоком передачи данных с помощью USB разъема.

Для повышения достоверности полученных результатов, проверялось биение сверла в патроне станка, величина которого каждый раз не превышала допустимых 0,02 мм.

Влияние погрешности изготовления РИ, как следствие создает дополнительные силы резания, влияющие на качество обработанной поверхности.

Линейные и угловые размеры сверл контролировали индикаторами, универсальными угломерами с ценой деления 0,5°.

Для оценки качества поверхности просверленных отверстий исследовался параметрами шероховатости R_a по ГОСТ 25142-82 контактным методом с помощью профилометра Handysurf E-35A (Германия) на базовой длине равной 5 мм. Основным параметром шероховатости при измерении с помощью профилометра было принято среднеарифметическое отклонение профиля R_a в мкм. При проведении измерений учитывалась базовая длина отверстия, при этом исключали измерение первых 2 мм в начале отверстия. Погрешность определения параметра R_a составило $\pm 5\%$.

Для обеспечения корректных результатов эксперимента сверлили по пять отверстий по каждому варианту подаваемой СОТС: в «сухую», с подачей подсолнечного масла, масла И-20, масла И-20 с НГМП и экспериментальной СОТС (подсолнечного масла с НГМП). Полученные значения силовых параметров в каждом варианте усреднялись и сверло для следующего варианта подаваемой СОТС заменялось на новое.

Проверка эффективности экспериментальной СОТС с НГМП проводилась по изменению температуры в зоне резания. При этом необходимо учитывать тот факт, что температура в зоне резания уменьшается как за счет охлаждающего действия СОТС с НГМП, так и за счет уменьшения работы сил трения сверла об заготовку, за счет улучшения триботехнических свойств.

Измерение температуры осуществляли с помощью пирометра, фирмы Raytek (Германия), подробная методика измерений температуры описана в работе [48, 103].

Перед проведением экспериментов на радиально-сверлильном станке модели 2К52 закреплялось сверло диаметром 22,0 мм из быстрорежущей стали Р6М5 и крепилась заготовка на станок. Затем при описанных выше режимах резания просверливались отверстия в заготовке. Для осуществления измерений с температуры пирометром на торце заготовки с были сформированы специальные пазы шириной 4 мм и глубиной 6 мм с интервалом 26-28 мм. Такие пазы обеспечивает оптический доступ для бесконтактного метода измерения температуры при операции сверления на всю глубину заглубления сверла.

На рисунке 3.7 показан способ бесконтактного измерения температуры в процессе сверления.

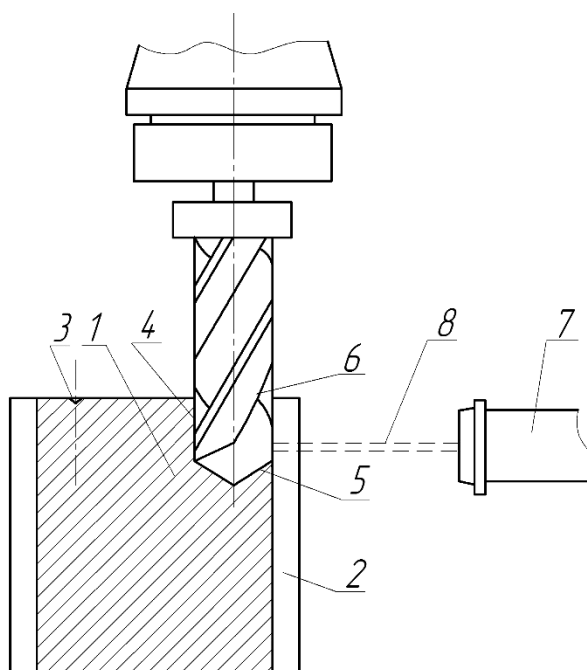


Рисунок 3.7. Способ бесконтактного замера температуры при сверлении:

- 1 – заготовка; 2 – специальный паз; 3 – кернение; 4 – образованное отверстие;
 5 – режущие кромки сверла; 6 – сверло; 7 – инфракрасный пирометр;
 8 – инфракрасный луч.

Измерение температуры выполняется следующим образом. На обрабатываемой заготовке 1 выполняются специальные пазы 2 шириной 4 мм и глубиной 6 мм. Затем на верхней части заготовки наносится кернение 3 и просверливают отверстия 4. При этом режущие кромки 5 сверла 6 начинают нагреваться и образовавшаяся теплота передается на саму заготовку 1. Затем в паз

2 направляется генерируемый пирометров 7 инфракрасный луч 8. При сверлении заготовки 1 режущие кромки 5 сверла 6 нагреваются, и образованная теплота передается в заготовку и через паз 2 инфракрасным лучом 7 снимается средняя температура с незначительными потерями. Это позволяет с достаточно высокой точностью получать данные измерения температуры при сверлении режущих кромок сверла, что и является результатами исследования теплового процесса сверления.

Для определения статистической жесткости технологической системы заготовку устанавливали в тензометрический динамометр, закрепленный на столе станка, и вводили в контакт со сверлом при отключенном приводе вращения сверла. С помощью рукоятки механизма вертикальных подач станка производили предварительное нагружение путем постепенного надавливания сверлом на заготовку. После этого выполняли контрольное нагружение и разгружение системы. По показаниям протарированного усилителя, подключенного к тензометрическому динамометру, определяли усилия нагружения и разгружения. Полученные экспериментальные данные обрабатывали по методу наименьших квадратов.

Для определения приведенной массы M и коэффициента демпфирования H необходимо иметь значения частоты собственных колебаний f и декремента затухания λ . С этой целью использовался способ свободных затухающих колебаний [61], суть которого заключается в следующем. В системе искусственно создаются импульсные нагрузки и регистрируются свободные затухающие колебания; параллельно регистрируются метки отметчика времени; с полученной осциллограммы снимаются необходимые параметры и выполняются вычисления по формулам:

$$f = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_0 \cdot f_0}{L_c \cdot \sqrt{4 \cdot \pi^2 - \lambda^2}}; \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{A_i}{A_{i+n}}; \quad (3.2)$$

где F_0 – частота отметчика времени;

L_0 – длина между отметками времени на осциллограмме;

L_C – период колебаний по осциллограмме;

A_i, A_{i+n} – амплитуды свободных затухающих колебаний с разницей в n периодов.

Для расчета приведенной массы M и коэффициента демпфирования H были использованы зависимости [61]:

$$M = \frac{C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}; \quad (3.3)$$

$$H = \frac{\lambda \cdot C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}, \quad (3.4)$$

где f – частота собственных колебаний;

λ – декремент затухания колебаний.

Значение жесткости C определяется как величина обратная податливости по результатам эксперимента или по эмпирическим зависимостям [61].

Толщина срезаемого слоя определялась как половина подачи. Длина, режущих кромок спирального сверла вычислялась по следующей формуле:

$$b = \frac{d + b_0 \cdot \cos \psi}{\sin \phi} + b_0, \quad (3.5)$$

где b_0 – длина перемычки;

ψ – угол наклона перемычки;

ϕ – угол в плане.

Математическое планирование экспериментов. С целью исследования средней величины износа поверхностей режущего инструмента и периода стойкости в процессе сверления был проведен факторный эксперимент с числом опытов $N = 2^k$, где N – общее число различных точек в плане матрицы; 2 – число уровней; k – общее число факторов.

Исследовалось влияние сил резания, подачи, скорости резания на выходные параметры. За критерий стойкости сверла принят износ по задней поверхности, что соответствует ГОСТ 2034-80. Обработку результатов экспериментов проводили в соответствии с РДМУ 109-77 [70].

В качестве СОТС была выбрана экспериментальная композиция подсолнечного масла с НГМП в % соотношении 5; 9; 10; 15 % по массе.

Как правило, статистические исследования по стойкости режущего инструмента занимают достаточное большое количество времени (необходимо ждать критического износа режущей части инструмента) и большие издержки на обрабатываемый материал. Затем определяется степень износа режущей кромки инструмента, при этом данный показатель весьма непостоянен (конкретен) из-за неравномерности степени его износа.

Для моделирования оптимального состава присадок НГМП к масляной СОТС предлагаем использовать регрессионный анализ, чтобы установить наличие зависимости, тип данной зависимости, и на основе полученных результатов определить значения параметров, при которых период стойкости имел бы максимальное значение.

Основная цель регрессионного анализа состоит в определении связи между некоторой характеристикой Y наблюдаемого явления или объекта и величинами $x_1, x_2, \dots, x_n$, которые обуславливают, объясняют изменения Y . Переменная Y называется зависимой переменной (откликом), влияющие переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$ называются факторами (регрессорами). Основными задачами регрессионного анализа являются – установление формы зависимости, подбор модели (уравнения) регрессии и оценка ее параметров.

В работе входными переменными будут процентное по массе $C_{\text{масс}}$ % содержание НГМП в СОТС, применяемое как субстанция СОТС подсолнечное масло $C_{\text{подс}}$ и износ инструмента, в качестве выходного параметра T – время стойкости сверла, мин.

Необходимо установить связь между входными и выходными переменными в виде следующей функции

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (3.6)$$

Затем устанавливаем параметры измерения входных переменных и значения их вариации.

Во втором случае, входными переменными будут скорость резания V м/мин и подача инструмента S мм/об, в качестве выходного параметра h – износ режущего инструмента по задней поверхности, мм.

В таблице 3.2 приведены значения интервалов варьирования переменных и результаты обработки данных по исследованию износа режущего инструмента, а в таблице 3.3 приведены значения по стойкости режущего инструмента.

Для математического описания процессов выбрана традиционная в технологии машиностроения степенная зависимость вида:

$$\bar{y} = C_y x_1^{B_1} \cdot x_2^{B_2} \cdot x_3^{B_3} \cdot x_4^{B_4} \quad (3.7)$$

где $\bar{y}$ – среднее значение контролируемого параметра;

x_1, x_2, x_3, x_4 – значения варьируемых параметров;

C_y, B_1, B_2, B_3, B_4 – эмпирические коэффициенты.

Для получения уравнения регрессии зависимость (3.7) логарифмировали, при этом она приобрела вид:

$$\ln \bar{y} = \ln C_y + B_1 \ln x_1 + B_2 \ln x_2 + B_3 \ln x_3 + B_4 \ln x_4 \quad (3.8)$$

Поскольку факторы исследуемого процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, а числа, выражающие величины факторов, имеют различные порядки, их следует привести к единой системе счисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным по формулам:

$$X_{i\text{ооc}} = \frac{X_{i\text{max}} + X_{i\text{min}}}{2}; \quad (3.9)$$

где $X_{i\text{ооc}}$ – основной уровень (определяется для каждой переменной);

$X_{i\text{max}}$ – верхний уровень (определяется для каждой переменной);

$X_{i\text{min}}$ – нижний уровень (определяется для каждой переменной);

2 – число уровней;

i – номер фактора;

и определяется интервал варьирования по формуле:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i\text{max}} - X_{i\text{min}}}{2}; \quad (3.10)$$

где ΔX_i – интервал варьирования (определяется для каждой переменной).

Полученные значения для каждой переменной записываются в таблицу.

После этого строится план матрицы планирования полного факторного эксперимента типа $N = 2^k$, где $k = 2$, а число точек плана $N = 4$ для первого случая и типа $N = 2^k$, где $k = 3$, а число точек плана $N = 8$ для второго.

Для обеспечения расчетов вводим графу фиктивной переменной x_0 , принимаемая во всех случаях значение $+1$. Знак « $+$ » в графах переменной означает верхний уровень значений, а знак « $-$ » соответственно нижний уровень.

Далее для каждой переменной придается по два значения (верхний « $+$ » и нижний « $-$ »), что позволяет получить возможные сочетания уровней для двух переменных матрицы планирования. В нашем случае свыше четырех комбинаций сделать невозможно.

В каждом варианте экспериментов устанавливали необходимые значения переменных поочередно в каждой точке плана матрицы в соответствии с планом матрицы планирования, поддерживав данные значения постоянными в течении всего эксперимента. Полученные значения параметра оптимизации заносили в таблицу.

Среднее значение контролируемого параметра оптимизации $\bar{y}$ в каждой из точек N плана определяли в логарифмическом масштабе по данным трех измерений (повторяемость $m = 3$) по формуле:

$$\bar{Y}_v = \frac{\sum_{j=1}^m Y_{v,j}}{m}, \quad (3.11)$$

где $\bar{Y}_v$ – среднее арифметическое значение по j опытам в точке с номером v ;

v – номер опыта;

$Y_{v,j}$ – полученное значение показателя параметра оптимизации;

m – количество параллельных наблюдений в каждой точке плана матрицы.

Результаты вычислений записывают в таблицу в графу $\bar{Y}_v$.

Для оценки отклонений контролируемых параметров от среднего значения по данным m наблюдений вычисляли дисперсию воспроизводимости S_v^2 по формуле:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{v,j} - \bar{Y}_{v,j})^2}{m-1}, \quad (3.12)$$

где S_v^2 – дисперсия в v -й точке;

j – порядковый номер параллельного опыта;

$Y_{v,j}$ – полученное значение показателя параметра оптимизации в v -й точке.

Значения вычисленные для всех точек плана матрицы, занесли в таблицу в графу S_v^2 .

Для проверки гипотезы однородности дисперсий использовали G -критерий Кохрена, который основан на законе распределения отношения максимальной дисперсии S_v^2 к сумме дисперсий $\sum_{v=1}^B S_v^2$. т. е.

$$G = \frac{S_{v \max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_N^2} = \frac{S_{v \max}^2}{\sum_{v=1}^N S_v^2}, \quad (3.13)$$

где G – критерий Кохрена;

$S_{v \max}^2$ – максимальная дисперсия в v -й точке;

$\sum_{v=1}^N S_v^2$ – сумма дисперсий.

Для выполненных экспериментов $G < G_{\text{табл}}$, следовательно дисперсии однородны и процесс является воспроизводимым.

Задаваемый уровень значимости приняли $q = 5\%$, после чего определяли число степеней свободы $V_{1b} = m - 1 = 2$, $V_{2b} = N = 4$, после чего находили табличное значение критерия Кохрена $G_{\text{кр}}$ равное 0,7679 для первого случая и при $V_{1b} = m - 1 = 2$, $V_{2b} = N = 8$, значение критерия Кохрена $G_{\text{кр}}$ имело 0,5157 для второго.

Расчетное значение критерия меньше табличного и, следовательно, гипотеза однородности дисперсии принимается.

Для контроля расчетов однородности дисперсий записываем в соответствующие графы в таблицу.

Подсчитали дисперсию воспроизводимости процесса или ошибку эксперимента по формуле :

$$S^2 = S^2\{Y\} = \frac{\sum_{v=1}^N S_v^2}{N}, \quad (3.14)$$

где $S^2\{Y\}$ – средняя арифметическое значение дисперсий всех точек плана матрицы;

$\sum_{v=1}^N S_v^2$ – сумма всех дисперсий;

N – общее число различных точек в плане матрицы планирования.

Вычисленное значение $S^2\{Y\}$ записали в соответствующую графу таблицы.

Далее переходим к построению математической модели процесса.

Коэффициенты регрессии B_i определяли умножением данных $\bar{y}$ на данные x_{iv} в кодовых обозначениях с последующим делением полученного произведения на общее число точек в плане матрицы N по формуле:

$$b = \frac{\sum_{v=1}^N X_{i,v} \bar{Y}_v}{N}, \quad (3.15)$$

где b_i – коэффициенты регрессии 0, 1, 2, . . . , k ;

$X_{i,v}$ – номер (фактора в кодовых обозначениях) столбца в плане матрицы;

$\bar{Y}_v$ – полученное среднее арифметическое значение.

Рассчитанные значения записали в графу b_i таблицы.

Затем по усредненным дисперсиям, общему числу точек в плане матрицы и числу параллельных наблюдений m вычисляли среднеквадратические отклонения дисперсии ошибок $S^2\{b_i\}$ и $S\{b_i\}$ коэффициентов b_i для каждой из регрессий. Гипотезу о значимости коэффициентов регрессии проверяли по критерию Стьюдента. Задаваемый уровень значимости принимали равным $q = 5\%$, число степеней свободы $V_{3b} = N(m - 1) = 8$.

Среднеквадратические отклонения дисперсии ошибок определяли по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{Y\}}{Nm}, \quad (3.16)$$

где $S^2\{b_i\}$ – дисперсия ошибки определения коэффициента;

$S^2\{Y\}$ – дисперсия показателя параметра оптимизации.

Расчетное значение $S^2\{b_i\}$ записываем в таблицу. Значение $S^2\{b_i\}$ для всех коэффициентов одинаковое.

Значимые коэффициенты регрессии определяли из полученного результата $S^2\{b_i\}$ путем извлечения квадратного корня по формуле:

$$S\{b_i\} = \sqrt{\frac{S^2\{Y\}}{Nm}}. \quad (3.17)$$

Расчетное значение записали в таблицу в графу $S^2\{b_i\}$.

Далее определили значимость полученных коэффициентов регрессии согласно t -критерию Стьюдента. Каждый коэффициент определяли по формуле:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \quad (3.18)$$

где t_i – критерий Стьюдента;

$|b_i|$ – коэффициенты регрессии;

$S\{b_i\}$ – дисперсия коэффициента регрессии.

Рассчитанные значения t_i записали в таблицу.

Для заданного уровня значимости $q = 5\%$ и для числа степени свободы $V_{3H} = N(m - 1) = 8$ находим критическое значение $t_{кр} = 2,306$ для первого случая и при $V_{3H} = N(m - 1) = 16$ находим критическое значение $t_{кр} = 2,119$ для второго. Если $t_i > t_{кр}$, то коэффициент $\hat{b}_i$ признается значениями. В нашем случае при определении стойкости режущего инструмента значимыми коэффициентами оказались b_0 , b_2 и b_3 , а при определении износа режущего инструмента значимыми коэффициентами оказались b_0 , b_1 и b_2 .

Таким образом, для каждого из случаев получили уравнение регрессии

(математическую модель процесса), в которую включили значимые коэффициенты.

Уравнение регрессии для определения стойкости режущего инструмента:

$$\hat{Y} = 40,542 + 0,375X_1 + 1,708X_2 - 2,292X_3.$$

Уравнение регрессии для определения износа режущего инструмента:

$$\hat{Y} = 0,988 + 0,463X_1 - 0,379X_2.$$

Далее переходим к проверке адекватности полученной математической модели. Для каждой точки плана матрицы по уравнению регрессии рассчитываем величину $\hat{Y}_{v,l}$. После чего определяем разность между средним значением $\bar{Y}_v$ показателя параметра оптимизации процесса, полученным экспериментально, и значением, полученным по уравнению регрессии $\hat{Y}_{v,l}$; полученную разность возвели в квадрат $(\bar{Y}_v - \hat{Y}_{v,l})^2$ и просуммировали $\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \hat{Y}_{v,l})^2$, записав полученные значения в таблицу.

Определили дисперсии адекватности модели по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \hat{Y}_{v,l})^2, \quad (3.19)$$

где S_{ad}^2 – оценка дисперсии адекватности модели;

l – количество значимых коэффициентов (включая b_0);

$\bar{Y}_v$ – полученное среднее арифметическое значение в каждой точке матрицы.

$\hat{Y}_{v,l}$ – математическое ожидание параметра оптимизации.

Полученный результат записали в таблицу в графу S_{ad}^2 .

Для проверки адекватности линейной модели оценивали по F - критерию Фишера на основе вычисленной дисперсии адекватности S_{ad}^2 по формуле:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{Y\}}, \quad (3.20)$$

где F – критерий Фишера;

S_{ad}^2 – оценка дисперсии адекватности модели;

$S^2\{Y\}$ – дисперсия параметра оптимизации.

Полученное значение критерия Фишера записали в таблицу.

При принятом уровне значимости $q = 5\%$ и числе степеней свободы для определения стойкости режущего инструмента $V_{1ad} = N - l = 5$ (l – число значимых коэффициентов) и $V_{2ad} = N(m - 1) = 16$ значение критерия Фишера составит $F_{кр} = 2,85$ и для износа режущего инструмента $V_{1ad} = N - l = 1$ и $V_{2ad} = N(m - 1) = 8$ значение критерия Фишера составит $F_{кр} = 5,32$.

Так как расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения $F < F_{кр}$, означает что наша модель адекватно описывает экспериментальные данные (соответствует реальному процессу) и гипотеза адекватности модели принимается.

Определим коэффициенты влияния (чувствительности) с учетом вклада каждого из полученных параметров на процесс оптимизации:

$$A_i = \frac{b_i}{\Delta X_i}; \quad (3.21)$$

где A_i – коэффициент чувствительности параметра процесса в действительных значениях;

b_i – рассчитанные коэффициенты регрессии;

ΔX_i – интервал варьирования фактора.

Для значимых коэффициентов b_2 и b_3 в случае определения стойкости режущего инструмента коэффициент чувствительности составит 0,34 и 2,72 соответственно. В случае определения износа режущего инструмента для значимых коэффициентов b_1 и b_2 коэффициент чувствительности составит 0,046 и 2,478 соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что при определении стойкости инструмента большее влияние оказывает фактор X_3 (износ сверла) чем параметр X_2 (т.к. он более чувствителен к изменению процесса) на параметр оптимизации, что при контроле рассматриваемого процесса необходимо уделять больше внимания.

При определении износа фактор X_2 оказывает большее влиянием (т.к. он более чувствителен к изменению процесса), чем параметр x_1 на параметр оптимизации, что при контроле рассматриваемого процесса необходимо уделять больше внимания.

Следовательно, на износ режущего инструмента оказывает большее влияние подача инструмента S (фактор X_2), чем скорость резания V (фактор X_1).

Для получения конечных зависимостей проводили замену переменных в уравнениях регрессии и приводили их к степенному виду.

Обработку результатов факторного эксперимента по вышеприведенной методике проводили на ПК с использованием табличного редактора MS Excel.

Полученные результаты по определению износа и стойкости режущего инструмента сведены в таблицы 3.4 и 3.5 соответственно.

3.2 Результаты экспериментальных исследований от технологических факторов на процесс сверления. Проверка адекватности математических моделей.

Экспериментально получены значения декремента затухания λ и частоты собственных колебаний f :

$$\lambda = 0,147 \qquad f = 455 \text{ Гц.}$$

Экспериментально были получены для установленных условий обработки приведенная масса M и коэффициент демпфирования H , которые составили:

$$M = 22,67 \text{ кг;} \qquad H = 3,17 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с/м.}$$

На рисунке 3.8 представлен график передаточной функции или декремента затухания. Известно, что чем меньше жесткость технологической системы, тем выше значение магнитуды [40]. Максимальное значение соответствует значениям собственных частот системы.

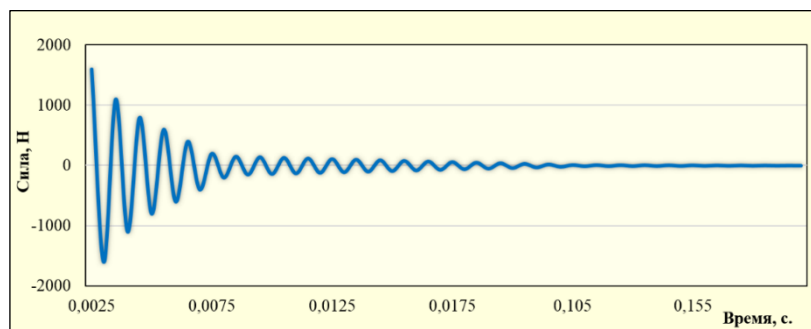


Рисунок 3.8. График функции одномассовой системы

Полученные результаты по определению коэффициента трения представлены на рисунке 3.9.

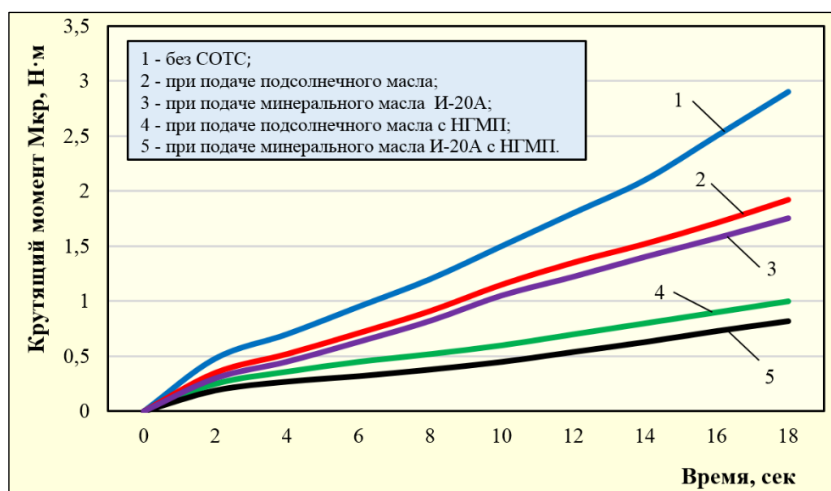


Рисунок 3.9. Зависимости момента трения, полученного коническим индентером при подаче различных составов СОТС.

Экспериментальные исследования выполнялись с пятикратным повтором, результаты в виде среднеарифметических значений представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.10.

Таблица 3.2.

Полученные результаты коэффициента трения μ
в зависимости от вида подаваемой СОТС

Сухое резание	Подсолнечное масло	Индуст- риальное масло И-20А	Подсол- нечное масло с НГМП	Индуст- риальное масло И-20А с НГМП
0,48	0,17	0,26	0,11	0,19

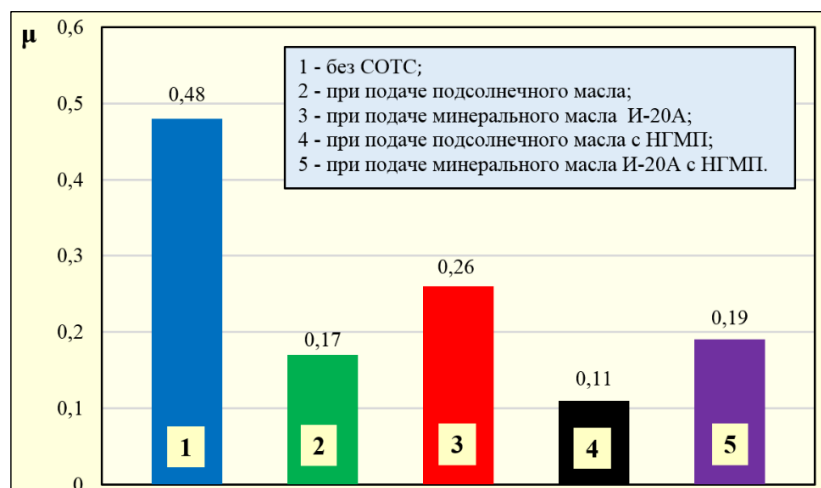


Рисунок 3.10. Значения коэффициентов трения в среде различных СОТС.

В случае трения вращающегося тела с неподвижным контртелом удобно пользоваться вместо силы трения моментом силы трения $M_{\text{тр}}$. При этом сила сопротивления перемещению одного тела по поверхности другого тела является распределенной силой, направленной против направления вектора скорости рассматриваемого тела.

Анализ полученных данных показывает, что максимальный коэффициент трения зафиксирован при трении в «сухую» и составил 0,48. При подаче подсолнечного масла коэффициент трения составил 0,17, а индустриальное масло И-20А приводит к увеличению μ до 0,26. В случае применения присадки в составе индустриального масла И-20А составило 0,19, а при присадке к подсолнечному маслу гидрированного наноглинистого минерала коэффициент трения снижается до 0,11.

Таким образом, наименьший коэффициент трения наблюдается при подаче в зону трения растительного масла с присадкой гидрированного наноглинистого минерала, что свидетельствует о лучшей смазывающей и большей несущей способности экспериментальной СОТС.

Полученные результаты коэффициентов трения согласовываются с результатами стойкостных испытаний экспериментальной СОТС.

Рассмотрим влияние СОТС на силы резания при сверлении. На рисунке 3.11 представлены результаты экспериментальных исследований силы резания при сверлении заготовки их стали 12Х18Н10Т с течением времени, а на рисунке 3.12 представлены результаты влияния скорости резания на силу резания в условиях подачи различных СОТС.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что применение в качестве СОТС индустриального масла И-20А наблюдается снижение силы резания P_z на 11%, при подаче подсолнечного масла в чистом виде значения силы резания P_z на 21% относительно результатов сухого резания.

При подаче, разработанной СОТС (композиция на основе подсолнечного масла с присадкой наноглинистого минерала), не только снизились значения силы резания P_z (на 29%), но и изменился характер процесса.

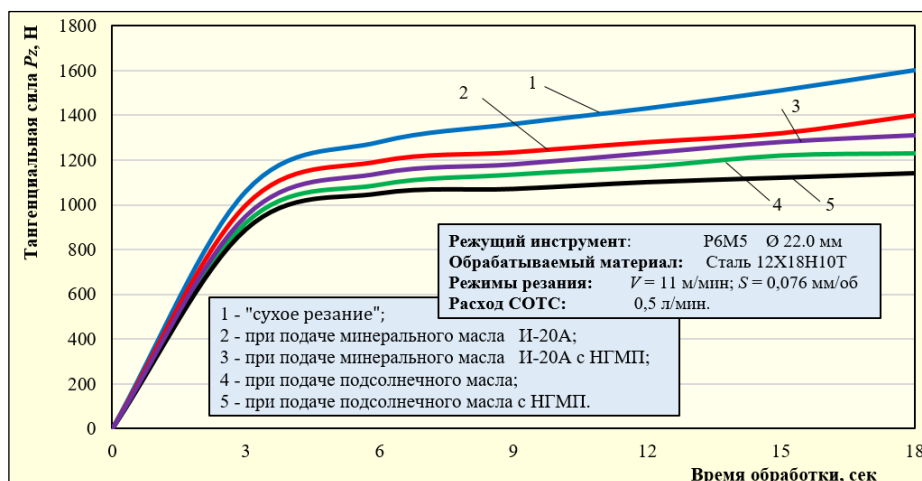


Рисунок 3.11. Зависимость тангенциальной силы резания P_z при сверлении стали 12Х18Н10Т в условиях подачи различных СОТС.

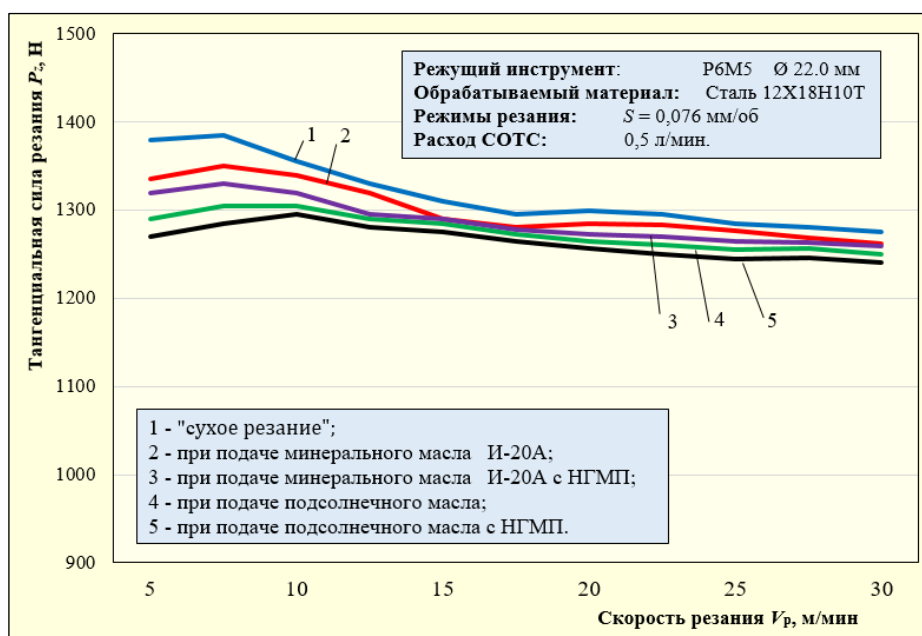


Рисунок 3.12. Влияние скорости резания на силы резания в условиях подачи различных СОТС при сверлении заготовки из стали 12Х18Н10Т.

На начальной стадии процесса сверления сила резания P_z минимальна. При увеличении времени обработки наблюдается закономерное увеличение силы P_z , которое стабилизируется до завершения процесса сверления. По нашей оценке, это связано с тем, что присадка НГМП дополнительно улучшает триботехнические свойства масляной основы СОТС, повышает стойкость режущего инструмента и улучшает процесс резания [45].

Анализ графика (рисунок 3.12) показывает, что применение СОТС на небольших скоростях резания оказывает существенное влияние на силу резания P_Z , но с увеличением скорости влияние СОТС незначительно. Основное влияние на силу резания P_Z оказывает изменение силы трения по задней поверхности инструмента.

Результаты экспериментов, полученные с помощью инфракрасного пирометра представлены на рисунке 3.13. процесс замера температуры происходило в идентичных условиях при каждом виде подаваемой СОТС.

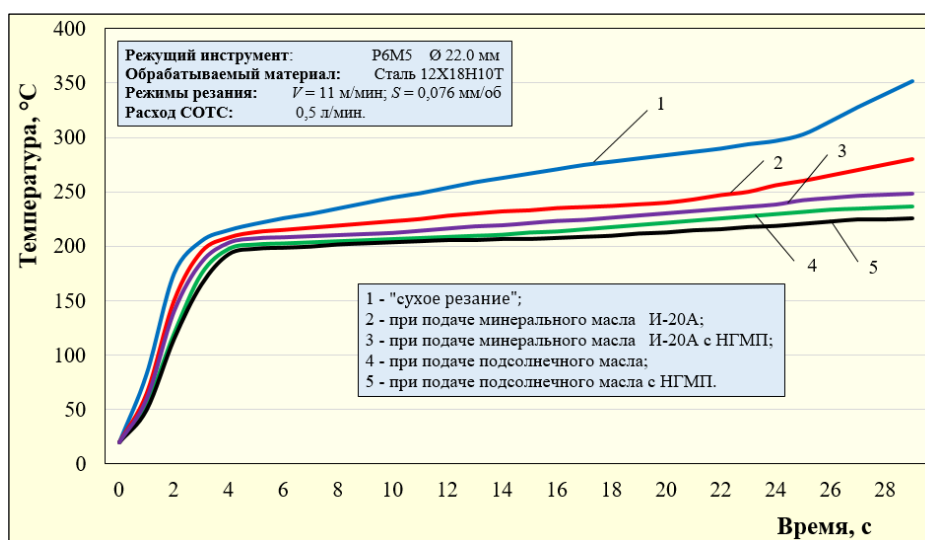


Рисунок 3.13. Зависимость температуры режущих кромок сверла от времени при подаче различных СОТС

Как видно из рисунка 3.13, температура при «сухом» резании по мере заглубления сверла нарастает и достигает максимальных значений. Аналогичное явление наблюдается и при подаче масла И-20А с НГМП. При подаче же экспериментальной СОТС (подсолнечного масла с НГМП) температура плавно возрастает и стабилизируется по мере заглубления сверла в заготовку.

Значения температуры режущих кромок сверла в зависимости от скорости резания при различных подачах, полученные экспериментальным и теоретическим путем приведены на рисунке 3.14.

Из анализа рисунка 3.14 видно, что зависимости температуры режущих кромок сверла от скорости резания, полученные экспериментально, носят одинаковый характер с теоретическими зависимостями и показало хорошее их совпадение.

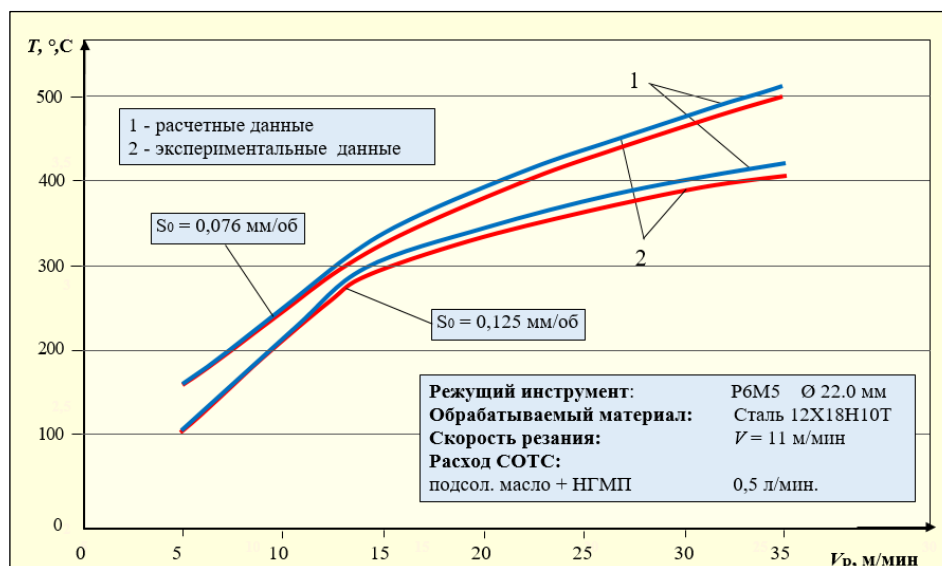
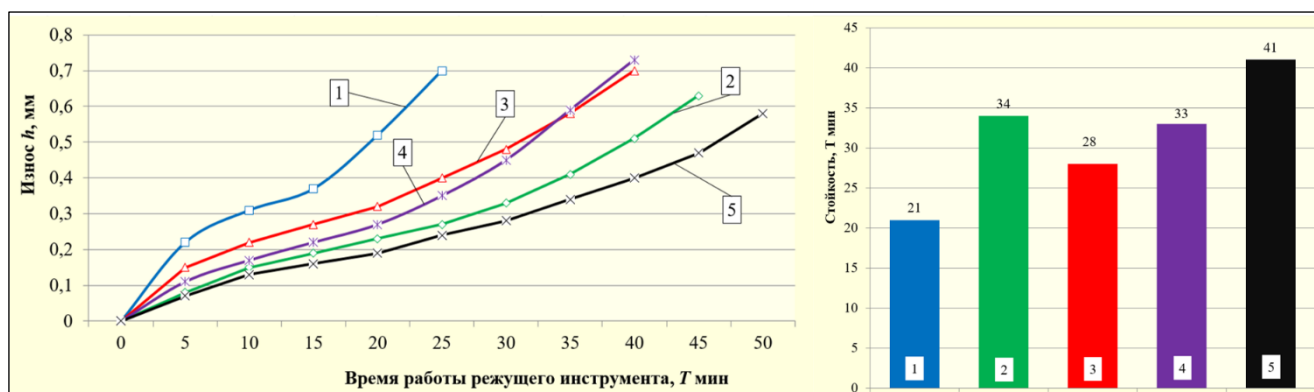


Рисунок 3.14. Зависимость температуры режущих кромок сверла от режимов обработки

На рисунке 3.15 представлены результаты износа и периода стойкости спиральных сверл в зависимости от подачи различных видов СОТС при обработке стали 12X18H10T. За критерий износа была принята величина $h_z = 0,35$ мм. В таблице 3.3 представлены фото и величины износа режущего инструмента при подаче различных составов СОТС.



Режимы резания: $V = 11$ м/мин; $S = 0,076$ мм/об. Расход СОТС 0,5 л/мин.

Режущий инструмент P6M5.

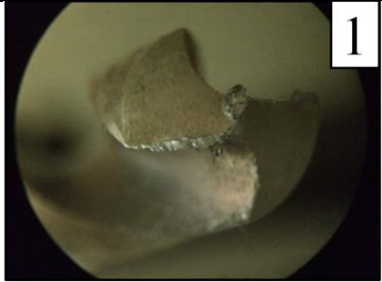
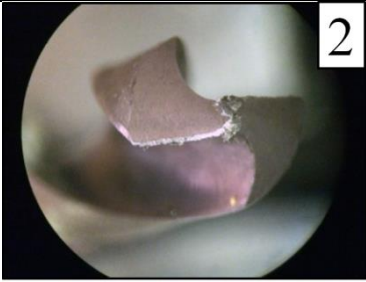
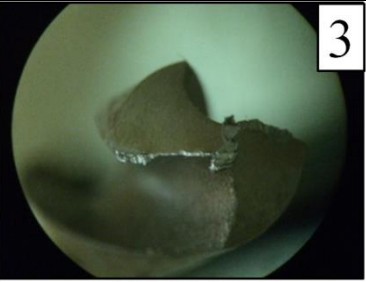
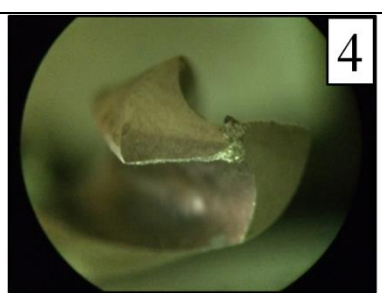
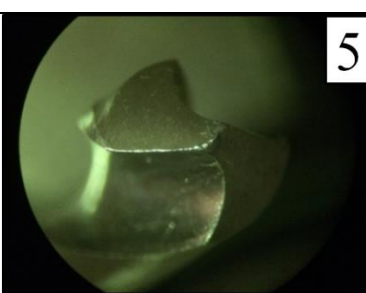
1 – Сухое резание; 2 – Подсолнечное масло; 3 – И-20А; 4 – И-20А + НГМП;

5 – Подсолнечное масло + НГМП

Рисунок 3.15. Влияние различных составов СОТС на износ задней поверхности и стойкость сверла из быстрорежущей стали P6M5 при обработке стали 12X18H10T.

Таблица 3.3

Величины износа режущего инструмента при подаче различных составов СОТС

 $h_3 = 0,37$ мм	 $h_3 = 0,19$ мм	 $h_3 = 0,27$ мм
 $h_3 = 0,22$ мм	 $h_3 = 0,16$ мм	Режимы резания: $V = 11$ м/мин; $S = 0,076$ мм/об; Расход СОТС – 0,5 л/мин. Режущий инструмент Р6М5. Время обработки – 15 мин.

1 – Сухое резание; 2 – Подсолнечное масло; 3 – Индустриальное масло И-20А;
 4 – Индустриальное масло И-20А + НГМП; 5 – Подсолнечное масло + НГМП.

Анализ таблицы показывает, что при сверлении отверстий за одинаковый промежуток времени работы инструмента (15 мин) и при подаче различных составов СОТС максимальное значение износа достигается при сверлении в сухую ($h_3 = 0,37$ мм), при подаче подсолнечного масла значение h_3 снижается до 0,19 мм. В случае подачи индустриального масла И-20А значение износа возрастает до 0,27 мм, но снижается при добавлении НГМП до 0,22 мм. Наилучшее значение достигается при подаче в качестве СОТС подсолнечного масла с присадками наноглинистых минералов и составляет $h_3 = 0,16$ мм.

В таблицах 3.4 и 3.5 приведены результаты обработки данных по исследованию износа и периода стойкости режущего инструмента, полученных экспериментальным путем.

Таблица 3.4

Значения интервалов варьирования переменных и результаты обработки данных по исследованию износа режущего инструмента

Контролируемые переменные				V , м/мин	S , мм/об	Аппроксимирующая зависимость									
Верхний уровень				41	0,35	$\ln h_3 = 0,988 + 0,463 \ln V - 0,379 \ln S$. $h_3 = -0,012V^{0,463}S^{-0,379}$.									
Нижний уровень				11	0,044										
Основной уровень				21	0,197										
Интервал варьирования				10	0,153										
Матрица планирования эксперимента				Результаты эксперимента и дисперсии отклонений							Проверка адекватности				
№ точки	Контролируемые параметры			x_0	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_1$		S_v^2	$\sum_{v=1}^N S_v^2$	Проверка однородности дисперсий	$\sum_{v=1}^N (\bar{y}_v - y_v)^2$
	x_0	x_1	x_2												
1	+	-1	-1	0,4	0,9	0,6	0,63	0,0633					0,8842		0,29
2	+	+1	-1	1,7	2,9	1,7	2,10	0,4800	$q\%$	5	$V_{1ад}$	$S_{ад}^2$	F	3,98	0,88
3	+	-1	+1	0,25	0,6	0,4	0,42	0,0308	$V_{2ад}$	4	$V_{кр}$	$F_{кр}$	0,7679	5,32	8
4	+	+1	+1	1,4	0,3	0,7	0,80	0,3100	Вывод	$G < G_{кр}$	Вывод	$F < F_{кр}$			
Коэф. b_i	0,988	-0,379	0,463	$S^2\{Y\}$	$S^2\{b_{ij}\}$	$S\{b_{ij}\}$	$q\%$	$V_{зн}$	$t_{кр}$	t_0	t_1	t_2	3,4077	2,7937	Вывод: модель адекватна

Таблица 3.5
Значения интервалов варьирования переменных и результаты обработки данных по исследованию стойкости режущего инструмента

Контролируемые переменные				COTC, %	Присадка, %	Износ, мм	Аппроксимирующая зависимость						
Верхний уровень				95	15	2,1	$\ln T = 40,542 + 0,375 \ln C_{COTC} - 1,708 \ln C_{прис} - 2,292 \ln h_3$ $T = 3,702 C_{COTC}^{0,375} C_{прис}^{-1,708} h_3^{-2,292}$						
Нижний уровень				85	5	0,42							
Основной уровень				90	10	1,26							
Интервал варьирования				5	5	0,84							
Матрица планирования эксперимента		Результаты эксперимента и дисперсии отклонений				Проверка однородности дисперсий			Проверка адекватности				
№ точ-ки	Контролируемые параметры				y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_1$	S_v^2	$\sum_{v=1}^N S_v^2$	$\sum_{v=1}^N (\bar{y}_v - y_v)^2$	190,92	
	x_0	x_1	x_2	x_3									
1	+	-1	-1	-1	49	41	45	45,00	16,00	19,00	$S_{ад}^2$	95,458	
2	+	1	-1	-1	44	40	46	43,33	9,33	0,155	F	6,225	
3	+	-1	1	-1	37	45	43	41,67	17,33	5	$q_{ад}$	5	
4	+	1	1	-1	44	40	40	41,33	5,33	2	$V_{1ад}$	5	
5	+	-1	-1	1	38	38	31	35,67	16,33	8	$V_{2ад}$	16	
6	+	1	-1	1	43	50	42	45,00	19,00	0,5157	$F_{кр}$	2,85	
7	+	-1	1	1	32	40	43	38,33	32,33	$G < G_{кр}$	Вывод	$F < F_{кр}$	
8	+	1	1	1	37	32	33	34,00	7,00				
Проверка значимости коэффициентов													
Коеф. b_i	-2,292			1,708			0,375			Вывод:			
	$S^2\{y_i\}$	$S^2\{b_i\}$	$S\{b_i\}$	$q, \%$	$V_{зн}$	$t_{кр}$	t_0	t_1	t_2	t_3	b1		
	15,33	0,6389	0,7993	5	16	2,12	50,7211	0,4692	-2,1373	2,8671	незначим		

При работе режущего инструмента и достижении износа $h_3 = 0,7$ мм возникает предельный износ инструмента, при котором дальнейшая его работа приводит к его поломке.

Экспериментальные значения предельного износа сравнивались с теоретическими. Расчеты значений предельного износа проводились на численно по зависимостям предложенным профессором П.А. Линчевским [46]:

$$h_{np} = \sqrt{E \cdot \frac{A' + B'}{D'}}, \quad (3.22)$$

$$\text{где } A' = \frac{5,06 \cdot a^4 \cdot H}{C} \cdot \left(\frac{K_a}{V}\right)^4 + \frac{6,75 \cdot a^3 \cdot H^2}{C^2} \cdot \left(\frac{K_a}{V}\right)^3 + \frac{4,5 \cdot a^2 \cdot H \cdot M}{C^2} \cdot \left(\frac{K_a}{V}\right)^2;$$

$$B' = \frac{2,25 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot a \cdot M \cdot K_a^2}{C^3 \cdot V} \cdot \left(1,5 \cdot a \cdot H \cdot \frac{K_a}{V} - M\right);$$

$$D' = 3,37 \cdot a^3 \cdot \left(\frac{K_a}{V}\right)^3 + 4,5 \cdot a^2 \cdot \frac{H}{C} \cdot \left(\frac{K_a}{V}\right)^2 + \frac{1,5 \cdot a}{C} \cdot \left(\frac{H^2}{C} - M\right) \cdot \frac{K_a}{V};$$

$$E = \frac{1,33 \cdot C \cdot V^2}{H_a \cdot a \cdot b \cdot K_a}.$$

Значения, полученные в результате расчета предельного износа спиральных сверл от режимов обработки приведены на рисунке 3.16. Значения предельного износа инструмента независимо от подачи увеличиваются с ростом скорости. Увеличение подачи приводит к снижению значений предельного износа. При подачах от 0,125 до 0,35 мм/об зависимость носит линейный характер, при подаче 0,076 мм/об она близка к линейной.

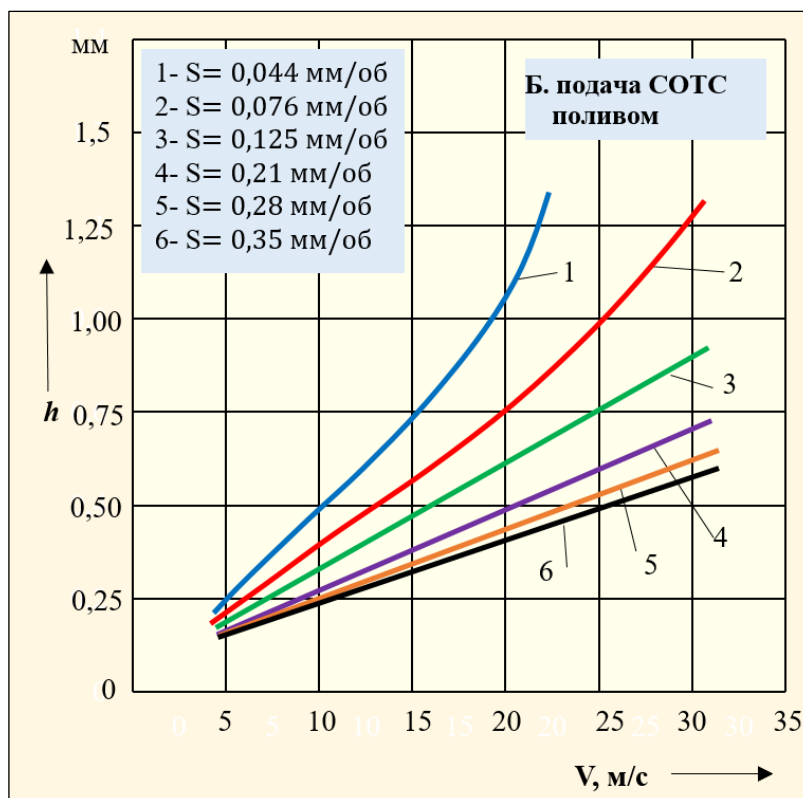
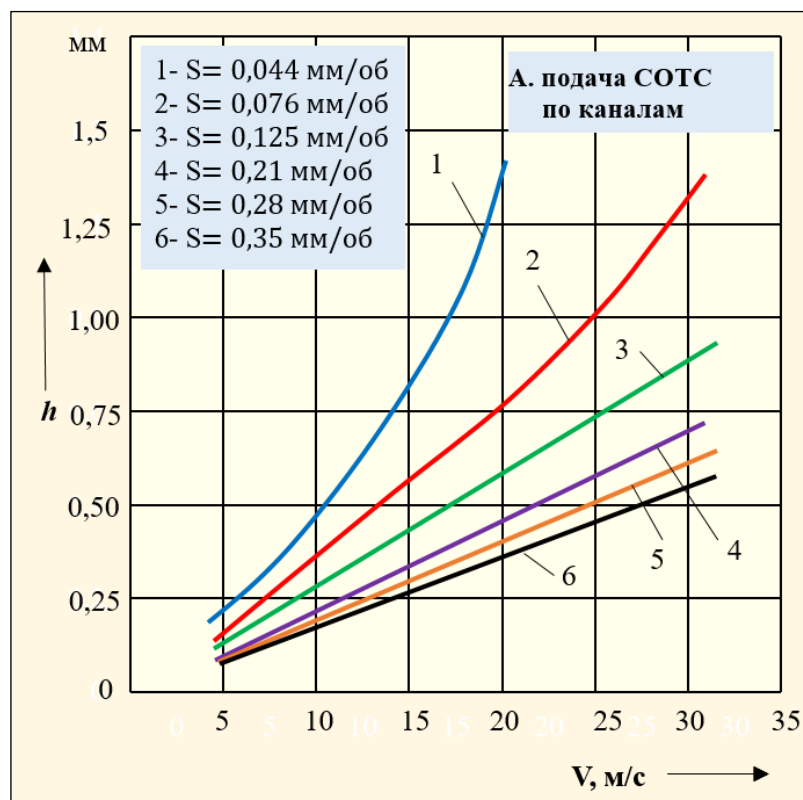


Рисунок 3.16. Зависимости предельного износа спиральных сверл диаметром 22 мм от режимов обработки стали 12Х18Н10Т.

При этих подачах предельный износ инструмента не зависит от способа подвода СОТС в зону резания. При подаче 0,044 мм/об, зависимость предельного износа приобретает нелинейный характер от скорости резания и значения предельного износа увеличиваются при подаче охлаждения по внутренним каналам сверла. Эти явления при малых подачах можно объяснить значительным различием постоянных времени переднего T_γ и заднего T_α углов. Поэтому при малых подачах, необходимо вносить некоторые коррективы, из-за погрешности в значениях предельного износа инструмента. Полученные теоретические зависимости предельного износа инструмента от режимов обработки (рисунок 3.16) подтверждаются результатами экспериментальных исследований целого ряда авторов [79, 60, 29, 30].

Кроме использования литературных данных, подтверждающих справедливость зависимостей предельного износа, инструмента от режимов обработки, полученных теоретическим путем, были проведены полные стойкостные испытания. С целью устранения разброса экспериментальных данных каждый эксперимент проводился 10 раз, а полученные результаты усреднялись.

На рисунках 3.17 – 3.20 представлены зависимости развития среднего износа задней поверхности и износа у уголков от суммарной глубины просверленных отверстий при различных скоростях резания. Из полученных зависимостей видно, что износ по задней поверхности у уголков значительно превосходит средний износ. Кроме того, значение этого износа, соответствующее началу катастрофического износа в 3 – 4 раза превосходит нормативные данные [20]. Это говорит о том, что смена инструмента при достижении нормативных критериев притупления приводит к неполному использованию срока службы сверла (на 50 % и более).

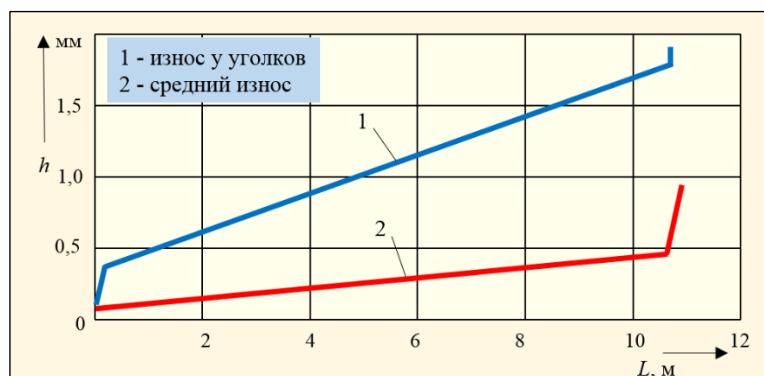


Рисунок 3.17. Зависимость среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков от суммарной глубины отверстий при сверлении с $V = 11$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.

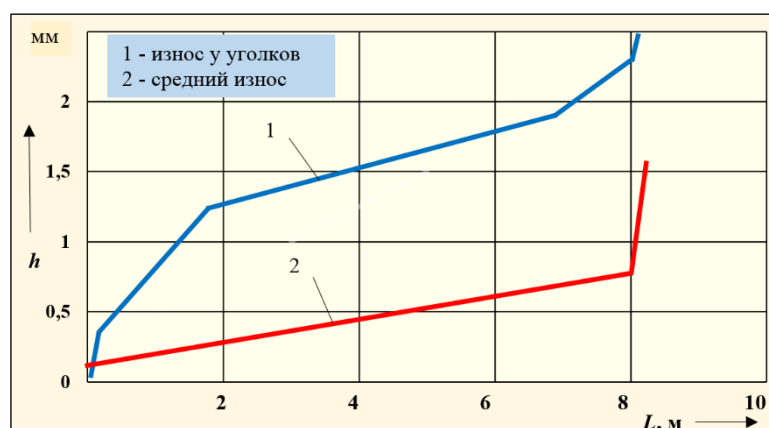


Рисунок 3.18. Зависимость среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков от суммарной глубины отверстий при сверлении с $V = 21$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.

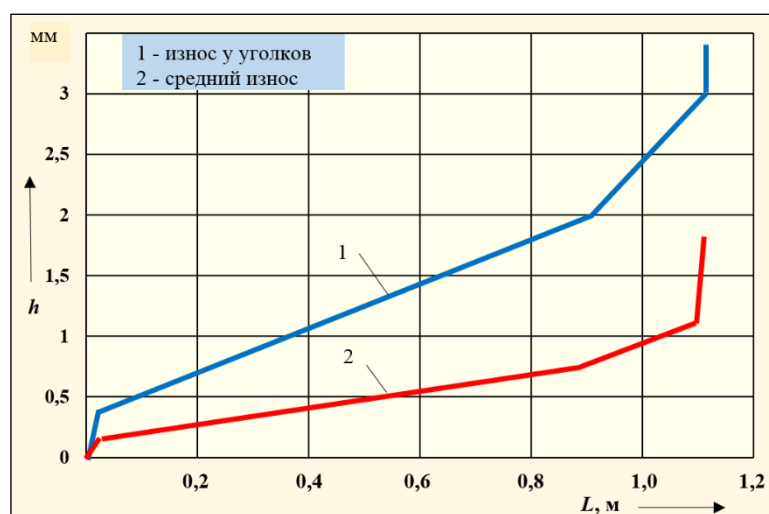


Рисунок 3.19. Зависимость среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков от суммарной глубины отверстий при сверлении с $V = 31$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.

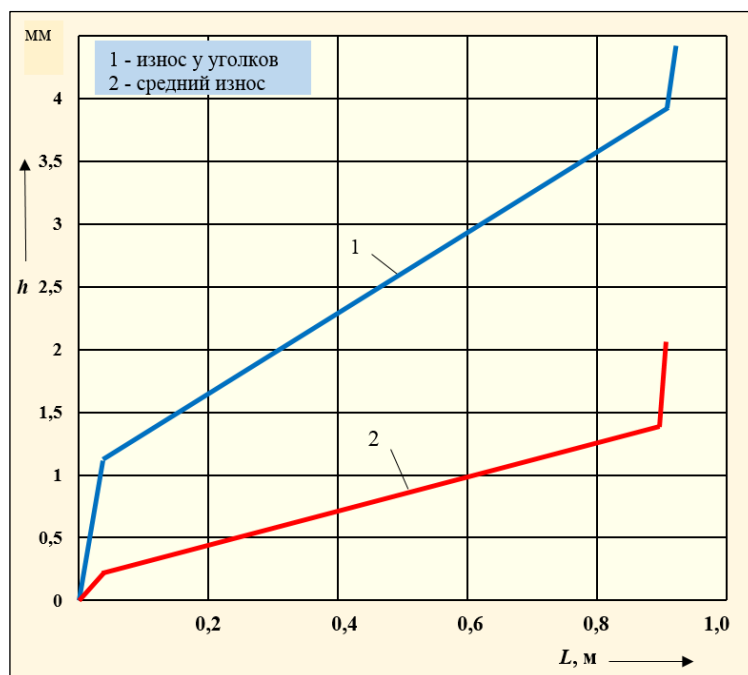


Рисунок 3.20. Зависимость среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков от суммарной глубины отверстий при сверлении
с $V = 41$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.

Значения предельного износа спиральных сверл в зависимости от скорости резания при различных подачах, полученные экспериментальным и теоретическим путем приведены на рисунке 3.21.

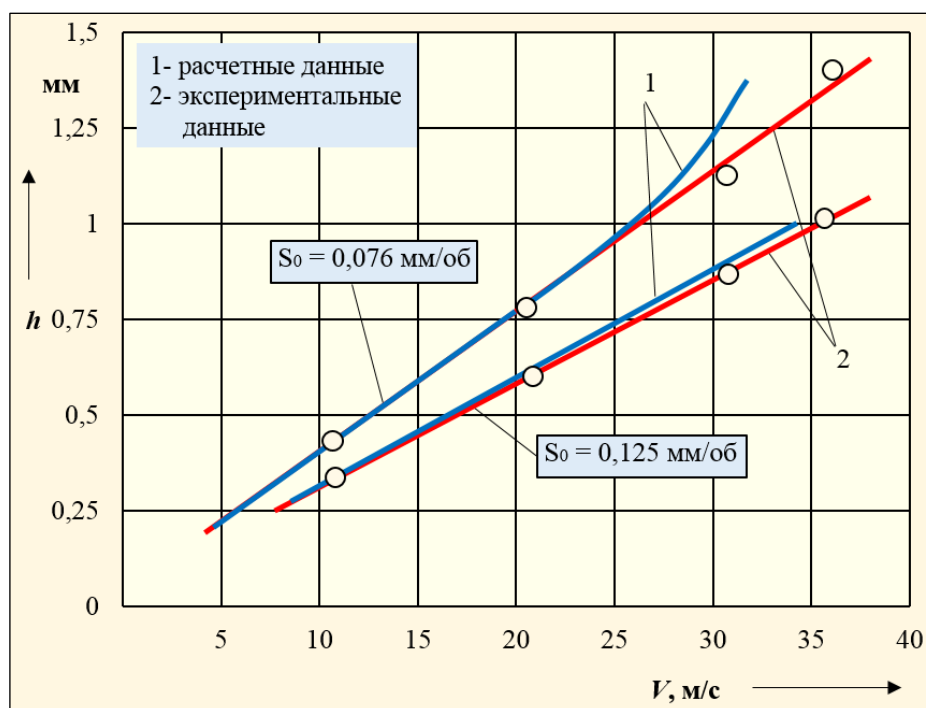


Рисунок 3.21. Зависимость предельного износа спиральных сверл от режимов обработки

Зависимости предельного износа инструмента от скорости резания, полученные экспериментально, носят одинаковый характер с теоретическими зависимостями. Сравнение экспериментально полученных и расчетных значений предельного износа инструмента показало хорошее их совпадение.

Основным параметром шероховатости при измерении с помощью профилометра было принято среднеарифметическое отклонение профиля R_a в мкм.

Температура в зоне резания занимает важное место в ряду факторов, которые влияют на шероховатость обработанной поверхности [69]. При подаче масляной СОТС с НГМП наблюдается не только снижение температуры, но и снижение значений шероховатости обработанных поверхностей при сверлении стали 12Х18Н10Т.

Результаты измерений шероховатости полученных отверстий, при подаче тех же четырех разновидностей СОТС, представлены в таблице 3.6 и на рис. 3.22.

Таблица 3.6

Результаты измерений шероховатости при сверлении
в зависимости от состава подаваемой СОТС

Обрабатываемый материал	Режущий инструмент, режимы резания	Подаваемое СОТС	Шероховатость, мкм
Сталь 12Х18Н10Т	Сверло из быстрорежущей стали Р6М5, диаметром 22,0 мм, $V_p = 11$ м/мин, $s = 0,076$ мм/об.	Без СОТС	11,64
		Подсолнечное масло	4,36
		Масло И-20А	7,88
		Масло И-20А + НГМП	5,08
		Подсолнечное масло + НГМП	3,96

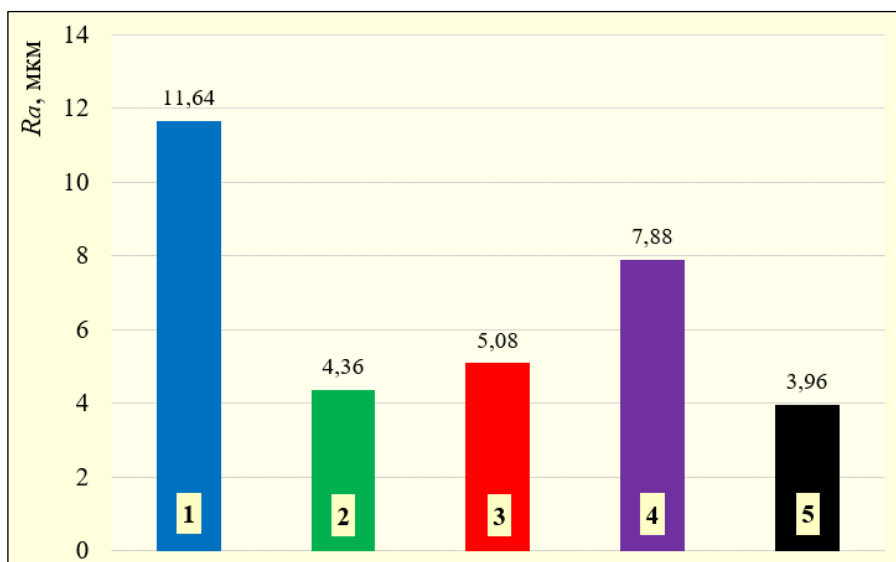


Рисунок 3.22. Гистограммы полученных значений шероховатости поверхности при сверлении стали 12X18H10T.

1 – Сухое резание; 2 – при подаче в качестве СОТС подсолнечного масла;
3 – при подаче в качестве СОТС индустриального масла И-20А; 4 – при подаче в качестве СОТС индустриального масла И-20А + НГМП; 5 – при подаче в качестве СОТС подсолнечного масла + НГМП.

Проверку адекватности математических моделей, разработанных в главе 2, реальному процессу сверления производили сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Экспериментальные значения показателей процесса сверления получали по плану, изложенному выше. Обработка экспериментальных данных осуществлялась по известной методике [16, 82, 98]. При расчете доверительных интервалов использовали распределение Стьюдента, величину доверительной вероятности при нормали равной 0,95.

Относительная погрешность расчетных и экспериментальных данных не превышала 15%, что указывает на достаточную степень адекватности разработанных моделей реальному процессу.

Исследование операции сверления показывает, что начальный момент времени работы инструмента при правильном подборе его режимов резания, как правило, обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали. Однако с течением времени выходные показатели качества

ухудшаются по сравнению с начальным моментом после переточки инструмента.

За относительно короткий промежуток времени из всех элементов технологической системы только режущий инструмент и заготовка претерпевают существенные изменения. В результате износа режущего инструмента его поверхности затупляются, на режущих кромках появляются оплавления, которые прогрессируют. Также возможен неравномерный износ передних и задних поверхностей вследствие дисбаланса инструмента. Все это оказывает влияние на качество обрабатываемой поверхности. Приведенные рассуждения согласуются с результатами исследований, выполненных ранее.

Интенсификация износа режущего инструмента объясняется тем, что с увеличением скорости резания ускоряются адгезионные процессы в зоне контакта вследствие увеличения температуры, что приводит к снижению стойкости инструмента.

Для значений углов $\psi = 55^\circ$, $\psi = 62,5^\circ$ при длине перемычки $b_0 = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м длина режущих кромок для сверла $d = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м и составит $b_0 = 2,56 \cdot 10^{-2}$ м.

Коэффициент утолщения стружки K_a определялся экспериментально по методике [65]. В результате исследований было установлено, что коэффициент утолщения стружки при сверлении нержавеющей стали 12Х18Н10Т равен $K_b = 1$.

Поэтому коэффициент утолщения становится равным коэффициенту укорочения стружки.

Экспериментально были получены зависимости коэффициента утолщения стружки от скорости резания и глубины отверстия при подаче масляной СОТС с НГМП поливом с расходом $Q = 3$ л/мин (рис. 3.23, а) и по каналам сверла с расходом $Q = 1,5 \dots 2$ л/мин (рис. 3.23, б), а также средние значения коэффициента утолщения стружки вдоль отверстия (рис. 3.24 – 3.27).

Значение коэффициента утолщения стружки при обработке отверстий с малыми глубинами $\left(\frac{L}{d} \leq 1\right)$ не зависит от способа подачи СОТС в зону резания.

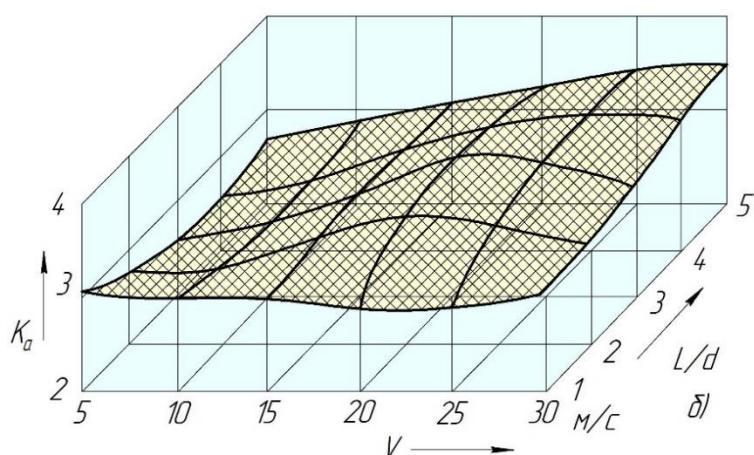
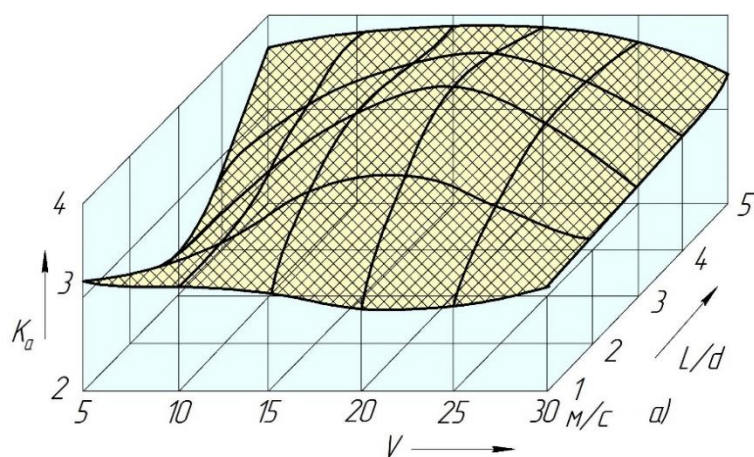


Рисунок 3.23. Зависимость коэффициента утолщения стружки от скорости резания и отношения глубины отверстия к его диаметру при сверлении стали 12X18H10T:

a – подача СОТС поливом; *б* - подача СОТС по внутренним каналам сверла.

При увеличении глубины обрабатываемого отверстия зависимость коэффициента утолщения стружки в зависимости от скорости резания приобретает экстремальный характер с выраженным максимумом. В случае высоких скоростей резания коэффициент утолщения стружки практически не изменяется от изменения глубины обрабатываемого отверстия в силу высоких температур в зоне резания.

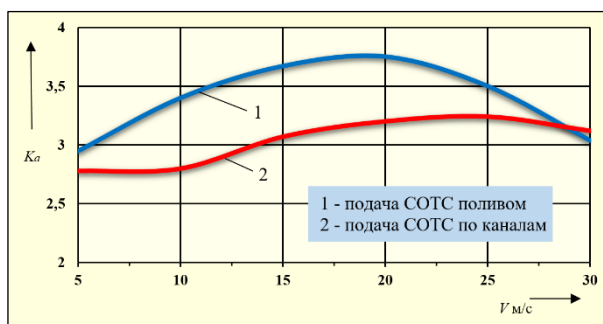


Рисунок 3.24. Зависимость среднего значения коэффициента утолщения стружки K_a при сверлении от скорости резания при подаче $S = 0,076$ мм/об и $L/d = 5$.

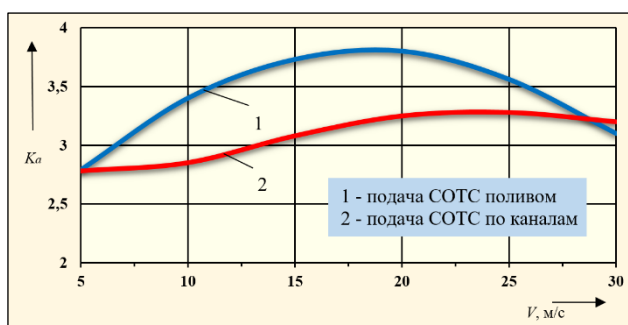


Рисунок 3.25. Зависимость среднего значения коэффициента утолщения стружки K_a при сверлении от скорости резания при подаче $S = 0,076$ мм/об и $L/d = 4$.

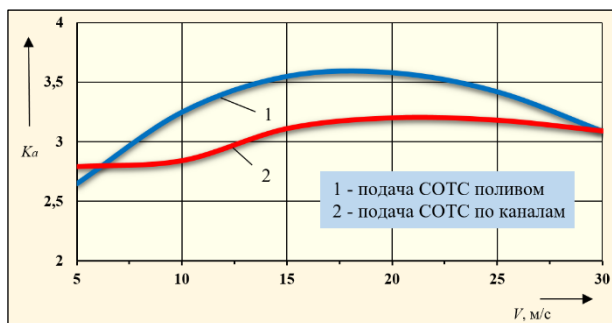


Рисунок 3.26. Зависимость среднего значения коэффициента утолщения стружки K_a при сверлении от скорости резания при подаче $S = 0,076$ мм/об и $L/d = 3$.

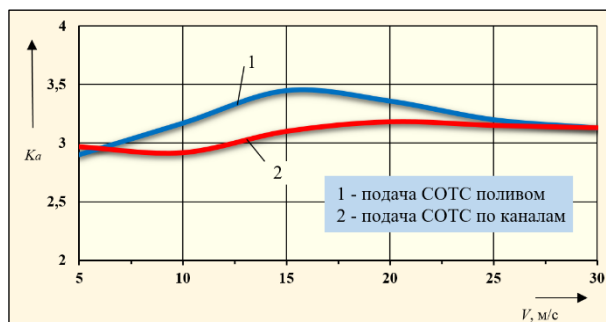


Рисунок 3.27. Зависимость среднего значения коэффициента утолщения стружки K_a при сверлении от скорости резания при подаче $S = 0,076$ мм/об и $L/d = 2$.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить результаты в виде аналитических зависимостей:

$$K_a = a \cdot \exp(\alpha \cdot V^2 + \beta \cdot V) \quad (3.23)$$

Значения коэффициентов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

$\frac{L}{d}$	Способ подачи СОТС в зону резания					
	свободным поливом			по каналам сверла		
	a	α	β	a	α	β
2	2,58	-2,53	1,61	2,84	-0,29	0,33
3	2,06	-5,72	3,66	2,50	-1,66	1,28
4	2,13	-5,70	3,58	2,46	-1,51	1,29
5	2,34	-5,12	3,12	2,42	-1,71	1,43

Получена также зависимость коэффициента утолщения стружки от величины подачи (рисунок 3.28). С ростом подачи до 0,15 мм/об коэффициент утолщения стружки уменьшается, дальнейшее увеличение подачи до 0,3 мм/об не приводит к его изменению и только работа с большими подачами увеличивает его значение. Описанный характер зависимости связан с изменением толщины среза с различной степенью пластической деформации и с разной прочностью стружки на всех диапазонах подач.

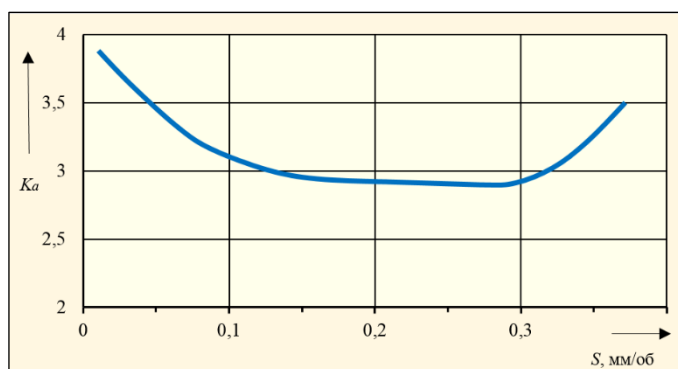


Рисунок 3.28. Зависимость коэффициента утолщения стружки от подачи при сверлении со скоростью резания $V = 30$ м/мин и $L/d = 1$.

Ввиду того, что коэффициент утолщения стружки зависит от режимов обработки и способов подвода охлаждения, то для каждого режима сверления вводилось соответствующее его значение.

Выводы по главе

1. Разработанные методики и конструкции экспериментальных стендов для исследования процессов сверления, позволяют изучать обработанные поверхности не только в целом, но и отдельные участки, образованные за любой из оборотов спирального сверла с учетом изменения геометрии режущих кромок инструмента за период стойкости сверла, оценивать и контролировать составляющие силы резания, и температуру в технологической системе.

2. Основными причинами образования отклонений параметров качества отверстий, являются износ режущих кромок инструмента и вибрация в технологической системе. За период стойкости инструмента увеличиваются не только средние значения, но и дисперсии отклонений от округлости отверстия. У круга значимы амплитуды первой и преобладающей высокочастотных гармоник. Они являются причинами образования на детали соответственно огранки и волнистости, которые возрастают с течением времени работы инструмента.

3. Выполненные эксперименты по изучению механизма образования обработанной поверхности подтверждают гипотезу о необходимости исследования показателей качества обработки деталей, на основании анализа динамического взаимодействия режущих кромок инструмента и материала заготовки, геометрия и взаимное положение которых изменяются с течением времени.

4. Проведенные качественная и количественная оценки свидетельствуют об адекватности математической модели процесса сверления, разработанной во второй главе, реальному процессу. Отклонения экспериментальных значений от расчетных составили 5-10%, что позволяет использовать модели для управления показателями процесса в рассмотренных диапазонах варьирования при сверлении

5. Разработанная комплексная математическая модель может быть широко использована для решения вопросов управления точностью и качеством обработки на операциях сверления.

ГЛАВА 4.

РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ ЦИКЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ СВЕРЛЕНИЯ

4.1. Критерии оптимизации операции сверления.

Для оптимизации процесса сверления необходимо наличие критериев оптимизации. В общем виде выбор критерия эффективности определяется запросами потребителя [101]. Глобально из всего многообразия критериев можно выделить следующие критерии: 1 – Экономические; 2 – По быстродействию.

Реализация способа управления процессом сверления происходит с систематическим изменением скорости резания и подачи в течение всего времени работы инструмента. Соответственно критерием быстродействия является производительность процесса, а экономическим критерием себестоимость операции.

1) Производительность операции. Продолжительность цикла работы станка при сверлении $T_{ц}$ определяется по зависимости [56]:

$$T'_{ц} = \frac{60 \cdot K_з}{R}, \quad (4.1)$$

где $K_з$ – коэффициент загрузки станка;

R – заданная производительность станка, шт/ч.

Время цикла сверления $T_{ц}$ определяются как трудоемкость обработки детали на данной операции:

$$T_{ц} = T_M + T'_B, \quad (4.2)$$

где T_M – машинное время, мин.;

T'_B – сумма вспомогательных времен, мин.

Машинное время при сверлении детали T_M определяется отношением объема материала, просверленного с детали (Q_M) к производительности процесса

сверления (W):

$$T_M = \frac{Q_M}{W} = \frac{S \cdot n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot R}{240 \cdot K_3}. \quad (4.3)$$

2) Себестоимости $C_{об}$ одного просверленного отверстия при обработке с переменными режимами по рассчитывается формуле [11]:

$$C_{об} = \frac{1}{N_{отв}} \cdot (E \cdot (T_M + T_{ин} + T_B) \cdot S_{и}), \quad (4.4)$$

где $N_{отв}$ – количество полученных отверстий за весь период работы инструмента, шт.

E – себестоимость работы на станке;

T_M – машинное время за весь цикл обработки, мин;

$T_{ин}$ – время на замену изношенного инструмента и подналадку, мин;

T_B – вспомогательное время, мин;

$S_{и}$ – затраты на режущий инструмент за весь период его работы, руб.

Вспомогательное время T_B состоит из следующих составляющих:

$$T_B = 2 \cdot t_{б1} \cdot n_1 + t_{б2} \cdot n_2,$$

где $t_{б1}$ – затрачиваемое время на управление станком (запуск или остановка), мин;

n_1 – количество запусков или остановок станка за весь цикл обработки;

$t_{б2}$ – затрачиваемое время на изменение величины подачи или частоты вращения шпинделя, мин;

n_2 – количество изменений величины подачи и скорости резания за весь цикл обработки.

Для определения затрат на режущий инструмент за весь период эксплуатации ($S_{и}$), связанный с переменными режимами обработки и различными величинами износа, получена зависимость для расчета величины переточки по схеме, которая представлена на рисунке 4.1:

$$l = h_K \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \gamma}{\cos(\alpha + \gamma)}, \quad (4.5)$$

где l – величина переточки;

α, γ – задний и передний углы режущей части инструмента соответственно.

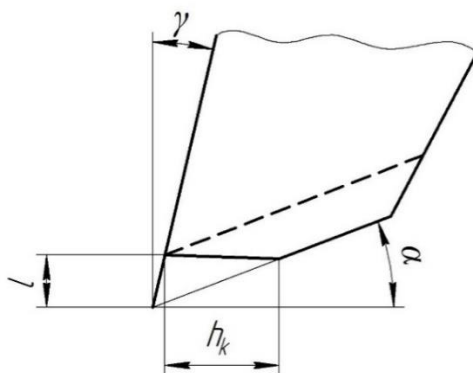


Рисунок 4.1. Схема для расчета величины переточки инструмента.

С учетом зависимости (4.5) стоимость режущего инструмента за весь период эксплуатации (S_{II}) за одну переточку составит:

$$S_{II} = \frac{C \cdot h_k \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma}{L \cdot \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (4.6)$$

где C – стоимость режущего инструмента (сверла);

L – длина режущей части инструмента.

Минутную производительность процесса резания (Π) определим отношением одного просверленного отверстия к штучному времени:

$$\Pi = \frac{N_{\text{отв}}}{T_{\text{шт}}^{\Pi}}. \quad (4.7)$$

Переменные составляющие производительности и себестоимости, обусловленные режимами обработки учтены в полученных формулах по определению себестоимости и производительности при сверлении отверстий.

При обработке с переменными режимами резания, количество полученных отверстий ($N_{\text{отв}}$), с учетом зависимостей рассчитываются по формуле [8, 90]:

$$N_{\text{отв}} = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot l} \cdot \left(\frac{h_{np}(V_1, S_1) - \bar{h}_0(V_1, S_1)}{K_{II}(V_1, S_1) \cdot h_{kp} - \bar{h}_0(V_1, S_1)} \cdot V_1 \cdot S_1 \cdot T(V_1, S_1) + \right. \\ \left. + \sum_{i=2}^N \left(\frac{h_{np}(V_i, S_1) - h_{np}(V_{i-1}, S_1)}{K_{II}(V_i, S_1) \cdot h_{kp} - \bar{h}_0(V_i, S_1)} \cdot V_i \cdot S_1 \cdot T(V_i, S_1) \right) + \right. \\ \left. + \sum_{j=2}^M \sum_{i=K+1}^N \left(\frac{h_{np}(V_i, S_j) - h_{np}(V_{i-1}, S_j)}{K_{II}(V_i, S_j) \cdot h_{kp} - \bar{h}_0(V_i, S_j)} \cdot V_i \cdot S_j \cdot T(V_i, S_j) \right) \right). \quad (4.8)$$

4.2. Моделирование изменения состояния технологической системы с течением времени.

Построенные в предыдущих главах работы зависимости, учитывают ряд параметров изменения состояния технологической системы с учетом ее изменения во времени, что позволяет приблизиться к границам допустимых режимов обработки и строить предельные граничные циклы управления операцией сверления. Граничный цикл управления фактически является управляющей программой, т.е. номинальным программным управлением.

Как следует из анализа циклов, применяемых на производстве [13, 15], управляющими воздействиями для технологической системы процесса сверления являются: осевая подача и скорость вращения сверла. Основными характеристиками системы являются – взаимное расположение поверхности заготовки, инструмента и параметры их взаимодействия. При включении осевой подачи инструмент приближается и входит в контакт с заготовкой. В первый период времени (этап врезания), съем материала и износ сверла минимальны. Подача почти полностью расходуется на приращение упругих деформаций системы и глубины резания. Поведение системы моделируется уравнением баланса перемещений [56] (рисунок 4.2):

$$\Delta A_{s\ j} = \Delta t_{f\ j} + \Delta l_j + \Delta h_{\text{заг}\ j-1} + \sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk} + \sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}, \quad (4.9)$$

где $\Delta A_{s\ j}$ и $\Delta t_{f\ j}$ – изменение расстояния от базовой поверхности инструмента до плоскости стола станка и приращение глубины резания соответственно;

Δl_j и Δr_{j-1} – износ сверла и съем материала в ранее принятые интервалы времени (обороты);

$\sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk}$ и $\sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}$ – суммы приращений упругих и температурных

деформаций элементов технологической системы. Знак плюс присваивается, если приращение уменьшает глубину резания и знак минус – если увеличивает.

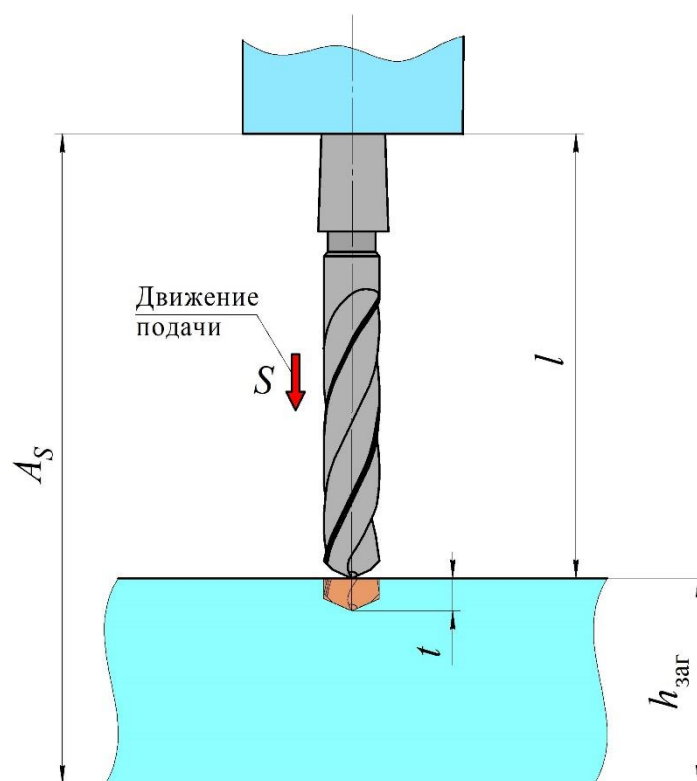


Рисунок 4.2. К расчету баланса перемещений.

4.3. Формирование технических ограничений

К основным техническим ограничениям применительно к операции сверления можно принять следующие факторы.

Ограничение 1. Начальное состояние рабочей поверхности инструмента определяется параметрами, полученными после заточки, конечное – в конце стойкости инструмента. Последнее характеризуется максимально допустимым износом $h_{\text{кр. max}}$, при котором не обеспечивается заданное качество обработанной поверхности. Износ сверла зависит от режима обработки, свойств взаимодействующих материалов и кинематических параметров [41, 23, 14, 22]. При этом величина размерного износа должна быть меньше значения критерия притупления $h_{\text{кр}}$. Аналитически эти условия могут быть записаны в виде неравенства:

$$h_z \leq h_{\text{кр. max}}. \quad (4.10)$$

С учётом полученной ранее теоретической зависимостью выражение (4.10) запишется в виде:

$$\frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{A e^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_{in}} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \leq h_{кр max} , \quad (4.11)$$

или по эмпирической формуле:

$$-0,012 V^{0,463} S^{-0,379} \leq h_{кр max} . \quad (4.12)$$

Ограничение 2. Состояние заготовки, после j -го оборота инструмента задается текущей толщиной r_j и пространственными отклонениями отверстия Δ_j .

Текущая глубина отверстия после j -го оборота вычисляется по ее значению после $j-1$ -го оборота сверла и величине съема материала Δr_j .

$$r_j = r_{j-1} - \Delta r_j . \quad (4.13)$$

Начальное состояние объекта (0) соответствует параметрам заготовки в момент ее установки на станок:

$$r_o = r_{заг} ; \quad \Delta_o = \Delta_{заг} ; \quad h_{d0} = f(T) . \quad (4.14)$$

Конечное состояние (k) объекта должно соответствовать техническим требованиям на деталь

$$r_k \leq r_{max d} , \quad r_k \geq r_{min d} ;$$

где $r_{max d} - r_{min d} = \delta$, δ – допуск на изготовление отверстия в детали.

$$\Delta_k \leq \Delta_d ; \quad (4.15)$$

Неравенства (4.15) справедливы для конца цикла обработки детали, после того как будет полностью просверлено отверстие. В процессе обработки параметры качества изделия могут отличаться от требований чертежа. Однако они на протяжении всего цикла должны находиться в заданной области значений, при которых достижимы требуемые параметры качества детали.

Ограничение 3. Скорость вращения сверла, ограничивается предельными значениями технических возможностей станка:

$$V_u \leq V_{u max} . \quad (4.16)$$

Ограничение 4. Максимальная скорость резания при сверлении.

Скорость резания при сверлении можно рассчитать с учетом величины подачи инструмента и его периода стойкости в общем виде по формуле:

$$V_p = \frac{D}{T \cdot S} \quad (4.17)$$

где T – период стойкости сверла, мин.

S – подача сверла.

Максимальная скорость резания при сверлении должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $V_{p\max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\max}}{60 \cdot 1000}$. Для нашего случая если в зависимость (4.17) подставить ранее полученное эмпирическим путем формулу по определению стойкости режущего инструмента, учитывающая износ инструмента получим:

$$\frac{D}{3,702 C_{COTC}^{0,375} C_{прис}^{1,708} h_3^{2,292} \cdot S} \leq V_{p\max}. \quad (4.18)$$

Ограничение 5. Минимальная скорость резания при сверлении.

Минимальная скорость резания должна быть больше или равна минимальной допускаемой кинематикой станка $V_{p\min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\min}}{60 \cdot 1000}$:

$$\frac{D}{3,702 C_{COTC}^{0,375} C_{прис}^{1,708} h_3^{2,292} \cdot S} \geq V_{p\min}. \quad (4.19)$$

Ограничение 6. Осевая составляющая силы резания, пределом которой является условие:

$$P_0 \leq P_{0\text{доп}} \quad (4.20)$$

Аналогичные ограничения накладываются кинематикой станка на скорости перемещения стола станка (от отверстия к отверстию) детали, сверла и осевую подачу:

$$V_u \geq V_{u\min}; \quad V_u \leq V_{u\max}; \quad (4.21)$$

Ограничение 7. Наибольшая подача сверла. Наибольшая подача режущего инструмента при сверлении должна быть меньше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{\max}$:

$$S \geq 0; \quad S \leq S_{\max}. \quad (4.22)$$

Ограничение 8. Наименьшая подача режущего инструмента должна быть больше или равна максимально допускаемой кинематикой станка $S_{\min}$:

$$S \geq S_{\min}. \quad (4.23)$$

Ограничение 10. Допустимый крутящий момент. Он зависит свойств обрабатываемого материала и при этом не должен превышать крутящего момента, связанный с мощностью станка.

Учитывая, что крутящий момент не должен превышать крутящий момент, развиваемый станком, получим неравенство в виде:

$$\left[\left(\frac{d \cdot a \cdot \cos \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{d \cdot K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s \right] / 2 \leq M_{крст}. \quad (4.24)$$

Ограничение 11. Мощность электродвигателя привода шпинделя станка.

Необходимо установить взаимосвязь между развиваемой мощностью электродвигателя станка и мощностью, требуемой по тангенциальному усилию:

$$P_z \cdot V_p \leq N_{\varepsilon} \cdot \eta, \quad (4.25)$$

где N_{ε} – мощность электродвигателя привода станка, кВт;

η – коэффициент полезного действия передачи.

Тангенциальное усилие при сверлении с учетом износа сверла описывается уравнением:

$$P_z = \left(\frac{a \cdot \cos \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s. \quad (4.26)$$

Подставляя в неравенство (4.25) значение из уравнения (4.26) после преобразования получим:

$$\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_{и}} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s \leq N_{\Theta} \cdot \eta. \quad (4.27)$$

Ограничение 12. Допустимая температура резания при сверлении.

Температура резания при сверлении зависит от многих факторов, таких как скорость резания, величина подачи, износа режущего инструмента, свойства обрабатываемого материала, вида СОТС и т.д. которая должна быть меньше или равной допустимой температуре резания. Таким образом, температуру резания с учетом износа инструмента и подачи СОТС запишем в виде неравенства:

$$T = \left[\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_{и}} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \frac{b \tau^2}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H \cdot \theta}{M \cdot C} \right] \times \\ \times (1 - \exp(-\theta \tau)) \leq T_{доп}. \quad (4.28)$$

Ограничение 13. Допустимая частота собственных колебаний f , которая не должна превышать нормативных значений и можно представить в виде неравенства:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot L_0 \cdot f_0}{L_C \cdot \sqrt{4 \cdot \pi^2 - \lambda^2}} \leq f_{доп}. \quad (4.29)$$

Ограничение 14. Допустимая статистическая жесткость технологической системы, ограничивается предельными значениями технических возможностей станка:

$$C \leq C_{max}. \quad (4.30)$$

Аналогичные ограничения накладываются и на приведенную массу и коэффициента демпфирования:

$$\frac{C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} \leq M_{max}; \quad (4.31)$$

$$\frac{\lambda \cdot C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} \leq H_{max}. \quad (4.32)$$

Ограничение 15. Прочность механизма подачи станка.

Усилие подачи (осевая сила) P_0 действующее на сверло должна быть равна или быть меньше усилия подачи станка $P_{\text{под.ст.}}$, определяемой кинематикой станка и может быть записана в виде неравенства:

$$\sqrt{\left(\frac{ab\tau_s}{\sin\beta_1}\right)^2 \cdot (1+K^2) - (P_z^2 + P_Y^2)} \leq P_{\text{под.ст.}}, \quad (4.33)$$

отсюда

$$S^y \leq \frac{P_{\text{под.ст.}}}{\sqrt{\left(\frac{ab\tau_s}{\sin\beta_1}\right)^2 \cdot (1+K^2) - (P_z^2 + P_Y^2)}}. \quad (4.34)$$

Ограничение 16. Относительный увод сверла. На него аналогически накладывается ограничение по максимальному допустимому значению, которое можно представить в виде неравенства:

$$\Delta_0 \leq \Delta_{0\max} \quad (4.35)$$

Относительный увод сверла определяется по формуле:

$$\Delta_0 = \sqrt{y^2(x) + z^2(x)}. \quad (4.36)$$

Подставляя формулу (4.36) в неравенство (4.35) получим:

$$\sqrt{y^2(x) + z^2(x)} \leq \Delta_{0\max}. \quad (4.37)$$

Ограничение 17. Скорость износа инструмента.

Ранее было установлено, что фактическое значение износа по задней поверхности намного превалируют нормативные значения, при котором наступает катастрофический износ спиральных сверл.

На рисунке 4.3 схематически представлен процесс износа по задней поверхности сверла по периферии главных режущих кромок.

Участок I соответствует процессу приработки инструмента, с временем приработки T_0 и начальным износом h_0 . Приработка по времени проходит в очень короткий период и составляет доли минуты [87, 47, 12].

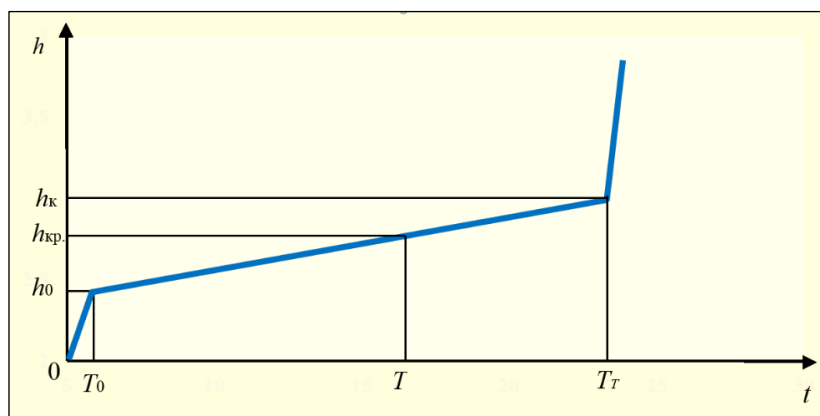


Рисунок 4.3. Процесс износа спирального сверла по задней поверхности

Участок II является зоной нормального износа, которая занимает основное время работы, характеризующаяся в сравнении с участками приработки и катастрофического износа, малой скоростью износа режущего инструмента. Традиционно, обработку производят до момента времени T , соответствующее значению критерия притупления $h_{кр}$.

Скорость износа сверла, ограничивается предельными его значениями, которую можно выразить в виде неравенства:

$$V_{II} \leq V_{II\max} \quad (4.38)$$

Рассматривая зону нормального износа можно определить скорость износа режущего инструмента следующим выражением:

$$V_{II} = \frac{h_{кр} - h_0}{T - T_0}. \quad (4.39)$$

Так как время приработки режущего инструмента T_0 несущественно по сравнению с временем нормальной работы T (нормативной стойкостью) выражение (4.39) примет вид:

$$V_{II} = \frac{h_{кр} - h_0}{T}. \quad (4.40)$$

или в виде неравенства путем подстановки выражения (4.40) в (4.38):

$$\frac{h_{кр} - h_0}{T} \leq V_{II\max}. \quad (4.41)$$

Ограничение 18. Время работы инструмента.

Выше было отмечено, что катастрофический износ режущего инструмента наступает при величине износа h_k намного превышающих нормативное значение критерия притупления $h_{кр}$.

Время работы сверла, ограничивается максимальной величиной периода стойкости, которую можно выразить в виде неравенства:

$$T_T \leq T_{T\max} \quad (4.42)$$

Приняв скорость износа инструмента по всему участку нормального износа постоянной, время работы режущего инструмента до наступления катастрофического износа T_T определится по формуле:

$$T_T = \frac{h_k - h_0}{V_{II}}. \quad (4.43)$$

Подставив выражение значение скорости износа (4.39) в (4.43) получим:

$$T_T = \frac{h_k - h_0}{h_{кр} - h_0} \cdot T. \quad (4.44)$$

Полученная зависимость времени работы режущего инструмента (4.44) до наступления катастрофического износа включает в себя величину износа у уголков сверла. Переход к величине среднего износа вдоль режущих кромок от абсолютных величин износа у уголков позволит использовать данную зависимость для определения предельного износа инструмента. Полученные ранее экспериментальные данные (см. рисунки 3.8-3.11) показывают, что скорость линии среднего износа инструмента и износа у уголков на участке нормального износа различна.

Ограничение 19. Величина среднего износа инструмента.

Связь среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков в виде схемы представлена на рисунке 4.4.

Продолжив линию среднего износа и износа у уголков от участка нормального износа получим их пересечение в точке, расположенной выше оси t на расстоянии a .

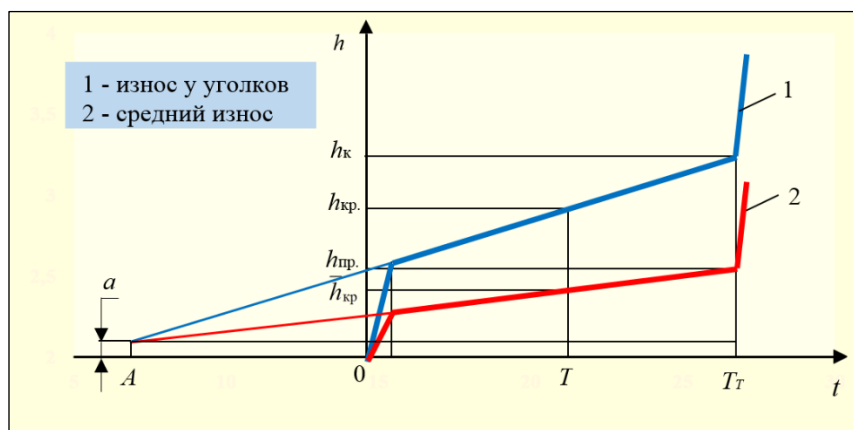


Рисунок 4.4. Взаимодействие износа у уголков и среднего износа по задней поверхности сверла.

Применив свойство подобия треугольников, получим следующие выражения:

$$\frac{h_{кр} - a}{h_k - a} = \frac{AT}{AT_T}; \quad \frac{\bar{h}_{кр} - a}{\bar{h}_{кр} - a} = \frac{AT}{AT_T}. \quad (4.45)$$

Затем приравняв выражения между собой зависимость (4.45) примет вид:

$$\frac{h_{кр} - a}{h_k - a} = \frac{\bar{h}_{кр} - a}{\bar{h}_{кр} - a}. \quad (4.46)$$

Величина параметра a , полученная экспериментальным путем, незначительна по сравнению с величинами износа h_k , $h_{кр}$, $h_{пр}$, $\bar{h}_{кр}$, поэтому им можно пренебречь и выражение (4.46) запишется в виде:

$$\frac{h_{кр}}{h_k} = \frac{\bar{h}_{кр}}{\bar{h}_{кр}}. \quad (4.47)$$

Анализ данной зависимости показывает, что на участке нормального износа отношение абсолютных значений износа по задней поверхности инструмента у уголков и средних значений износа вдоль главных режущих кромок остается постоянной величиной (если параметр a принимает малые значения). Назовем данную постоянную величину коэффициентом среднего износа $K_{и}$, определяемая отношением:

$$K_{и} = \frac{h_{кр}}{h_k}. \quad (4.48)$$

Таким образом, величина среднего износа инструмента ограничивается максимальной его величиной, которую можно выразить в виде неравенства:

$$\frac{h_{np}}{h_{\kappa}} \leq K_{Hmax} . \quad (4.49)$$

На величину коэффициента среднего износа оказывают влияние такие факторы как материал режущего инструмента и заготовки, режимы обработки, СОТС и др. факторы.

Таким образом, время работы режущего инструмента до наступления катастрофического износа (4.44) с учетом зависимостей (4.47) и (4.48) примет вид:

$$T_T = \frac{h_{np} - \bar{h}_0}{K_H \cdot h_{\kappa p} - \bar{h}_0} \cdot T , \quad (4.50)$$

где $\bar{h}_0 = h_0 \cdot K_H$ – среднее значение износа инструмента на участке приработки вдоль главных режущих кромок.

Подставив в неравенство (4.42) зависимость (4.50) получим следующее неравенство:

$$\frac{h_{np} - \bar{h}_0}{K_H \cdot h_{\kappa p} - \bar{h}_0} \cdot T \leq T_{Tmax} . \quad (4.51)$$

По зависимости (4.50) зная нормативное значение критерия притупления режущего инструмента, определяемая стойкостной зависимостью $T = f(V, S, \dots)$ при заданных условиях обработки, можно определить время работы инструмента до наступления катастрофического износа T_T , определив значения среднего износа за период приработки $\bar{h}_0$, предельного износа h_{np} и коэффициента среднего износа K_H .

В случае малых скоростей резания значения предельного износа незначительны (см. рисунок 3.16) и могут быть меньше значения среднего износа, соответствующая критерию притупления, которая определяется стойкостной зависимостью $T = f(V, S, \dots)$. Следовательно, катастрофический износ режущего инструмента наступит раньше расчетного времени T .

Зависимости по определению стойкости режущего инструмента являются оптимальными, с точки зрения авторов этих зависимостей, и справедливы только

для некоторых диапазонов обработки. Следовательно, необходимо производить обработку на таких режимах, при которых предельный износ должен быть больше или равен среднему износу, соответствующий критерию притупления. Это в свою очередь позволит повысить период стойкости режущего инструмента.

Величина увеличения стойкости ΔT определится зависимостью:

$$\Delta T = T_T - T \quad \text{или} \quad \Delta T = \frac{h_{np} - K_H \cdot h_{kp}}{K_H \cdot h_{kp} - \bar{h}_0} \cdot T. \quad (4.52)$$

Зависимость (4.52) показывает, что чем ближе значение среднего износа, соответствующая критерию притупления $K_H \cdot h_{kp}$ к среднему значению износа за период приработки $\bar{h}_0$, тем выше величина увеличения стойкости ΔT .

Как было установлено ранее (см. рисунок 3.7), с ростом подачи снижается величина предельного износа, а с увеличением скорости резания увеличивается. Полученный результат с технологической точки зрения позволяет ввести новое определение – «переменный предельный износ инструмента».

Таким образом можно предположить, что, управляя процессом резания путем изменения подачи и скорости резания, возможно сместить величину предельного износа в сторону увеличения. Это в свою очередь позволит увеличить стойкость режущего инструмента.

Вышеизложенное позволило нам разработать модель процесса износа инструмента с изменяющимися режимами обработки.

Все рассмотренные выше технические ограничения и выбранная функция оптимизации представляют в совокупности математическую модель процесса сверления, представленная в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Математическая модель процесса сверления спиральными сверлами

№	Ограничения режима сверления	Неравенство
1.	Баланс перемещений	$\Delta A_{s j} = \Delta t_{f j} + \Delta l_j + \Delta h_{заг j-1} + \sum_{k=1}^n \Delta y_{yjk} + \sum_{k=1}^m \Delta y_{qjk}$
2.	Начальное состояние рабочей поверхности инструмента	$h_3 \leq h_{кр. max}$ $\frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k} \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_{и}} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}} \leq h_{кр max}$ $-0,012V^{0,463} S^{-0,379} \leq h_{кр max}$
3.	Состояние заготовки	$r_j = r_{j-1} - \Delta r_j$ $r_o = r_{заг}; \quad \Delta_o = \Delta_{заг}; \quad h_{d0} = f(T)$ $r_k \leq r_{maxd}, \quad r_k \geq r_{mind};$ $\Delta_k \leq \Delta_d.$
4.	Скорость вращения сверла	$V_u \leq V_{u max}$
5.	Максимальная скорость резания при сверлении	$\frac{D}{3,702 C_{COTC}^{0,375} C_{прис}^{1,708} h_3^{2,292} \cdot S} \leq V_{p max}$
6.	Минимальная скорость резания при сверлении	$\frac{D}{3,702 C_{COTC}^{0,375} C_{прис}^{1,708} h_3^{2,292} \cdot S} \geq V_{p min}$
7.	Осевая составляющая силы резания	$P_0 \leq P_{0 доп}$
8.	Скорость перемещения стола станка (от отверстия к отверстию) детали	$V_u \geq V_{u min}; \quad V_u \leq V_{u max}$
9.	Наибольшая подача сверла	$S \geq 0; \quad S \leq S_{cm max}.$
10.	Наименьшая подача режущего инструмента	$S \geq S_{min}$
11.	Заданная производительность станка	$n \cdot S \geq \frac{\left(\frac{60 \cdot K_3}{R} - T'_B \right) \cdot 240 \cdot K_3}{\pi \cdot d^2 \cdot R}$
12.	Допустимый крутящий момент	$\left[\left(\frac{d \cdot a \cdot \cos \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{d \cdot K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k} \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_{и}} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s \right] / 2 \leq M_{крст}$

№	Ограничения режима сверления	Неравенство
13.	Мощность электродвигателя привода шпинделя станка	$P_z \cdot V_p \leq N_{\Sigma} \cdot \eta$ $\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s \leq N_{\Sigma} \cdot \eta$
14.	Допустимая температура резания при сверлении	$T = \left[\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \frac{b \tau^2}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{\text{вн}} \cdot \Delta H \cdot \theta}{M \cdot C} \right] \times$ $\times (1 - \exp(-\theta \tau)) \leq T_{\text{доп}}.$
15.	Допустимая частота собственных колебаний	$\frac{2 \cdot \pi \cdot L_0 \cdot f_0}{L_C \cdot \sqrt{4 \cdot \pi^2 - \lambda^2}} \leq f_{\text{доп}}$
16.	Допустимая статистическая жесткость технологической системы, приведенная масса и коэффициент демпфирования	$C \leq C_{\max}$ $\frac{C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} \leq M_{\max}$ $\frac{\lambda \cdot C}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} \leq H_{\max}$
17.	Прочность механизма подачи станка.	$\sqrt{\left(\frac{ab \tau_s}{\sin \beta_1} \right)^2 \cdot (1+K^2) - (P_z^2 + P_Y^2)} \leq P_{\text{под.ст}}$ $S^y \leq \frac{P_{\text{под.ст}}}{\sqrt{\left(\frac{ab \tau_s}{\sin \beta_1} \right)^2 \cdot (1+K^2) - (P_z^2 + P_Y^2)}}$
18.	Относительный увод сверла	$\Delta_0 \leq \Delta_{0\max}$ $\sqrt{y^2(x) + z^2(x)} \leq \Delta_{0\max}$
19.	Скорость износа инструмента	$V_{II} \leq V_{II\max}$ $\frac{h_{kp} - h_0}{T} \leq V_{II\max}$
20.	Время работы инструмента	$T_T \leq T_{T\max}$ $\frac{h_k - h_0}{h_{kp} - h_0} \cdot T \leq T_{T\max}$
21.	Величина среднего износа инструмента	$\frac{h_{np}}{h_k} \leq K_{II\max}$ $\frac{h_{np} - \bar{h}_0}{K_{II} \cdot h_{kp} - \bar{h}_0} \cdot T \leq T_{T\max}$

№	Ограничения режима сверления		Неравенство
22.	Функция оптимизации	Производительность процесса сверления	$f_{01} = T_M = \frac{Q_M}{W} = \frac{S \cdot n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot R}{240 \cdot K_3}$
		Себестоимость обработки отверстий	$f_{02} = C_{об} = \frac{1}{N_{отв}} \cdot (E \cdot (T_M + T_{ин} + T_B) \cdot S_{и})$

Совокупность зависимостей и ограничений, сведенных в таблицу 4.1, представляют описание свойств технологической системы.

4.4 Расчет циклов программного управления

Представленная в таблице 4.1 модель баланса перемещений связывает соответствующие разности подачи инструмента и разности фактической глубины резания.

В качестве начального приближения (начальных условий для моделирования) используются справочные данные и существующие технологические рекомендации для соответствующих процессов.

Если при этом выполняются условия не нахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения системы таблицы 4.1 определяет, как закон изменения величины подачи инструмента, так и законы изменения величин съема материала, в соответствии с заданными показателями качества, указанное позволяет решать задачи оптимизации технологического процесса известными численными методами по различным формализованным критериям, например, по критерию быстродействия [52, 51, 99] (критерий штучного времени производства детали), себестоимости, приведенных затрат и др. Это соответствует решению задачи построения граничных циклов программного управления.

Необходимо отметить, что при решении этих задач необходимо учитывать тот факт, что состояние технологической системы несвободно от наследования параметров, определяемых результатами обработки предыдущего отверстия, т.е. в качестве начальных данных при моделировании граничного цикла обработки каждого последующего отверстия используются как данные о начальном состоянии системы (например, параметры сверла после заточки), так и финальные параметры (например, состояния инструмента с учетом его износа). Указанное определяет наличие семейства оптимальных граничных циклов.

При построении расчетных соотношений для конкретных задач модель дискредитировалась по времени – периодам стойкости инструмента. При этом параметры рассматривались как непрерывные величины и функции. вышесказанное позволило применить как численные методы решения разностных уравнений, так и численные методы теории оптимизации для функций с ограничениями типа неравенств.

Основные целевые функции, для которых проводились расчеты, приведены в таблице 4.1.

При оптимизации по быстродействию одним из наиболее предпочтительных оказался алгоритм покоординатного спуска Пауэлла в силу простоты реализации и достаточно высокой скорости сходимости [124, 126]. При нахождении наилучшего решения по себестоимости – метод динамического программирования Белмана [112, 113].

Данные алгоритмы позволяют решить задачу построения граничных циклов управления операцией сверления, при которых обеспечивается минимально возможное машинное время или минимальная себестоимость обработки деталей при ограничениях качества поверхности изделия.

Апробация предложенной методики, осуществлялось в рамках научной темы кафедры автомобильного транспорта «Разработка экологобезопасных, ресурсо- и энергосберегающих технологий в машиностроении и автомобильном транспорте».

При расчете циклов было принято следующее допущение: при каждом обороте участок поверхности заготовки контактирует с измененным, но постоянным на обороте слоем рабочей поверхности инструмента.

Полученные в результате расчета циклы для определения периода стойкости, представлены на рисунках 4.5 и 4.6 при изменении скорости резания и подачи сверла, учитывающие износ инструмента.

При расчете циклов учитывался износ инструмента, поэтому продолжительность каждого последующего расчетного цикла оказалась больше продолжительности предшествующего.

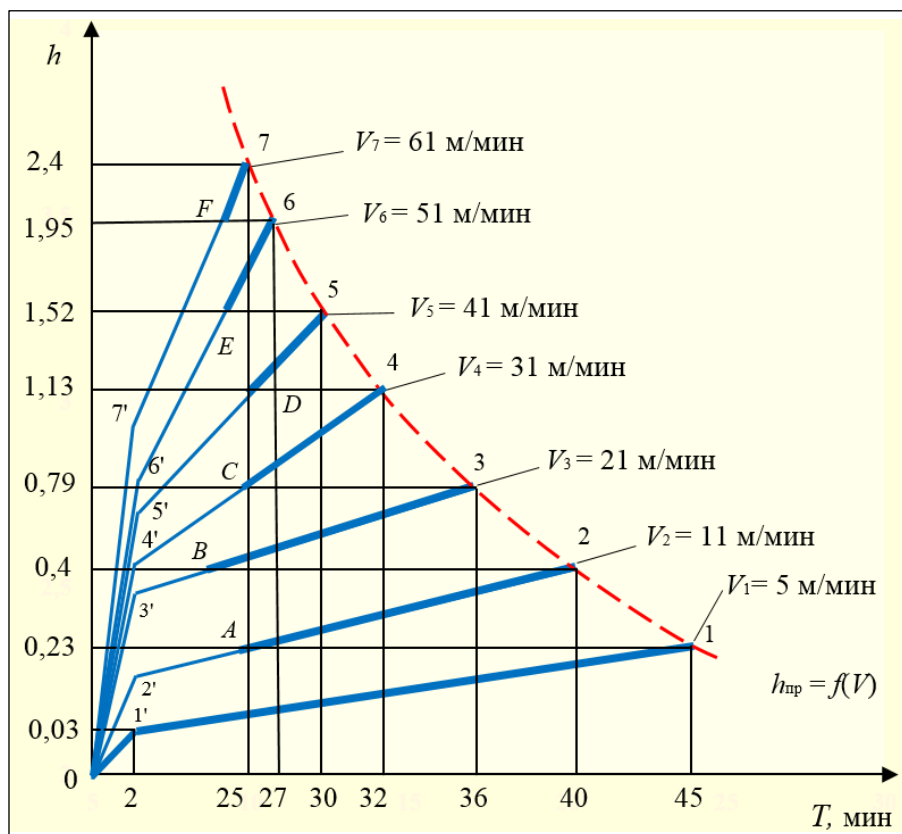


Рисунок 4.5. Граничные циклы управления скоростью резания, учитывающие изменение состояния технологической системы за счет износа режущих кромок сверла за период стойкости.

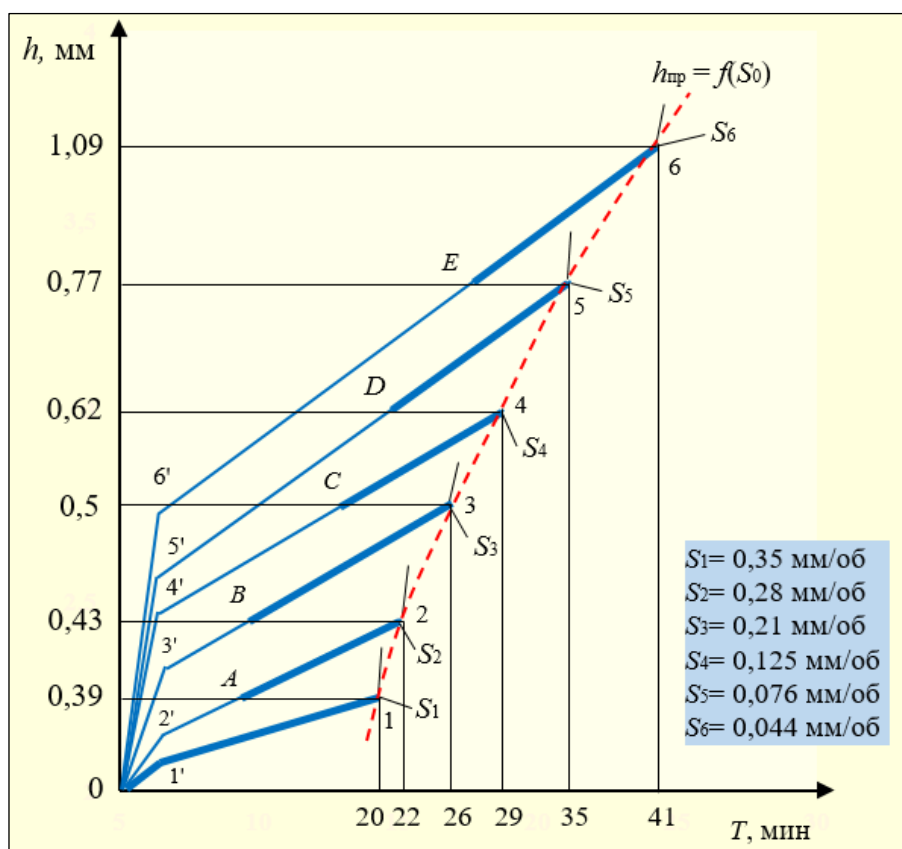


Рисунок 4.6. Граничные циклы управления величиной подачи, учитывающие изменение состояния технологической системы за счет износа режущих кромок сверла за период стойкости.

По рисунку 4.5 видно, что средний износ режущих кромок при сверлении с переменной скоростью резания $V_p = 5, 11, 21, 31, 41, 51$ и 61 м/мин и при постоянной подаче ($S = 0,076$ мм/об) будет формироваться по кривым $0 - 1' - 1$ ($V_{p1} = 5$ м/мин), $0 - 2' - 2$ ($V_{p2} = 11$ м/мин), $0 - 3' - 3$ ($V_{p3} = 21$ м/мин), $0 - 4' - 4$ ($V_{p4} = 31$ м/мин), $0 - 5' - 5$ ($V_{p5} = 41$ м/мин), $0 - 6' - 6$ ($V_{p6} = 51$ м/мин) и $0 - 7' - 7$ ($V_{p7} = 61$ м/мин).

Высокая скорость резания способствует большей скорости износа режущего инструмента $V_{и}$. Предельный износ инструмента в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 для соответствующих скоростей резания и при постоянной подаче будет соответствовать началу катастрофического износа.

Проведя линию через данные точки, получим кривую зависимости предельного износа режущего инструмента от изменения скорости резания при постоянной подаче.

При увеличении скорости резания наблюдается рост предельного износа инструмента, что подтверждают ранее полученные теоретические результаты (см. рисунок 3.16) и снижение периода стойкости инструмента T_T .

Таким образом, при сверлении с различными скоростями резания и с учетом особенности развития износа, возможно вести обработку так, чтобы суммарная стойкость режущего инструмента была выше значений стойкости, при соответствующих скоростях резания.

Сверление отверстий при постоянной подаче инструмента ($S=0,076$) начинается со скорости резания 5 м/мин. Следовательно, развитие среднего износа режущих кромок будет формироваться по кривой 0 – 1' – 1 (рисунок 4.5). Далее при достижении предельного износа ($h_{пр1} = 0,23$ мм) с неизменными режимами обработки начинается катастрофический износ, и необходимо произвести изменение скорости резания с 5 на 11 м/мин.

Если обработка заготовки производится сверлом прошедшим переточку, то средний износ будет протекать по кривой 0 – 2' – 2. Учитывая, что инструмент уже обладает износом, ему соответствует положение точки A на кривой 0 – 2' – 2, и дальнейшее формирование износа со скоростью резания 11 м/мин будет проходить по участку A – 2. Аналогично при достижении нового предельного износа ($h_{пр2} = 0,4$ мм) для скорости резания 11 м/мин осуществляется следующее изменение скорости резания с 11 на 21 м/мин, сдвигая тем самым в большую сторону значение предельного износа.

Далее развитие износа инструмента будет протекать со скоростью износа $V_{и3}$ (где $V_{и3} > V_{и2}$) по кривой 0 – 3' – 3 на участке B – 3. Положение точки B соответствует предельному износу, сформировавшийся при обработке со скоростью резания 11 м/мин.

Дальнейшая обработка проходит аналогичным образом с изменением скорости резания с 21 до 31 м/мин. Обработку завершают, когда предельный износ достигает значения ($h_{пр7} = 2,4$ мм), провоцирующий высокие скорости износа инструмента $V_{и}$ и процесс сверления становится не рациональным.

При изменении скорости резания с 5 до 61 м/мин на всем этапе процесса сверления развитие износа режущих кромок будет проходить по участкам $(0-1'-1)-(A-2)-(B-3)-(C-4)-(D-5)-(E-6)-(F-7)$ соответственно.

Время работы инструмента при постоянной подаче и с различными скоростями резания определится как сумма времени работы сверла с учетом развития износа на каждом из рассмотренных участков.

Рассматривая второй способ обработки (рисунок 4.6) с постоянной скоростью резания ($V_p = 21$ м/мин), но с различными величинами подачи $S = 0,044, 0,076, 0,125, 0,21, 0,28$ и $0,35$ мм/об значение среднего износа режущих кромок, будет формироваться по кривым $(0 - 1' - 1)$, $(0 - 2' - 2)$, $(0 - 3' - 3)$, $(0 - 4' - 4)$, $(0 - 5' - 5)$ и $(0 - 6' - 6)$.

Из схемы обработки видно, что меньшее значение скорости износа V_{II} режущих кромок достигается при больших величинах подачи инструмента.

Значения предельного износа при обработке сверлением с постоянной подачей S соответствуют точки 1, 2, 3, 4, 5 и 6 проводя через которых кривую, получим зависимость предельного износа режущего инструмента от величины подачи S (изменяемого параметра) для постоянной скорости резания.

При уменьшении подачи возрастает значение предельного износа, подтверждаемая ранее полученной теоретической зависимостью (см. рисунок 3.16) и наблюдается увеличение стойкости режущего инструмента T_T .

При сверлении с изменяемыми значениями подачи, как и в случае сверления с различными значениями скоростей резания, возможно вести обработку так, чтобы суммарная стойкость режущего инструмента была выше значения стойкости, которые соответствуют постоянным значениям подачи.

При сверлении с постоянной скоростью резания, подачу инструмента S_1 начинают с больших значений, а развитие среднего износа режущих кромок будет формироваться по кривой $0 - 1' - 1$ (см. рисунок 4.6).

При достижении предельного износа ($h_{пр1} = 0,39$ мм) с неизменными режимами обработки начнется катастрофический износ, и необходимо произвести изменение подачи с $S_1 = 0,35$ на $S_2 = 0,28$ мм/об. Последующее развитие среднего

износа будет протекать на кривой $0 - 2' - 2$ по участку $A - 2$, пока не достигнет значения ($h_{\text{пр}2} = 0,43$ мм). Далее по аналогии, изменение подачи ведут до достижения значения $S_6 = 0,044$ мм/об и достижения предельного износа ($h_{\text{пр}6} = 1,09$ мм).

При сверлении с изменением величины подачи с $S_1 = 0,35$ до $S_6 = 0,044$ мм/об износ режущих кромок будет проходить по участкам $(0-1'-1)-(A-2)-(B-3)-(C-4)-(D-5)-(E-6)$.

Таким образом, общее время обработки первой детали в 1,32 раза меньше цикла обработки в конце периода стойкости инструмента. При обработке 2-й, 3-й и 4-й деталей основное время снижается в 1,25; 1,17; 1,1 раза, по сравнению с постоянными значениями обработки.

При оптимизации процесса по экономическому критерию получены диапазоны регулирования по скорости резания (D_V) и по подаче (D_S). Данные сведены в таблицы 4.2 и 4.3. Графически диапазоны регулирования представлены на рисунке 4.7.

Таблица 4.2

Диапазоны регулирования по скорости резания (D_V)

D_V	V , м/мин				
1	11	—	—	—	—
2	11	16	21	—	—
3	11	16	21	26	31
4	—	—	21	26	31
5	—	—	—	—	31

Таблица 4.3

Диапазоны регулирования по подаче (D_S)

D_S	S , мм/об				
1	—	—	—	—	0,076
2	—	—	0,21	0,125	0,076
3	0,35	0,28	0,21	0,125	
4	0,35	0,28	0,21	—	—
5	0,35	—	—	—	—

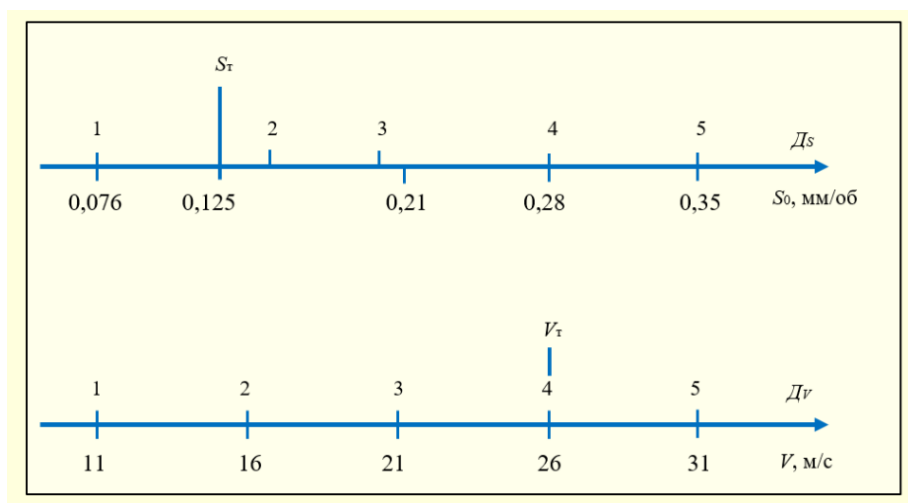


Рисунок 4.7. Положение центров диапазонов регулирования режимов обработки относительно рекомендуемых значений по подаче S_T и скорости резания V_T .

Таким образом, сверление с рекомендуемыми сочетаниями диапазонов регулирования режимов обработки, позволило повысить стойкость спиральных сверл в 1,4 – 3,5 раза по сравнению с постоянными (табличными) режимами. При этом также выросла производительность процесса резания в 1,3 – 2,7 раза и снизилась себестоимость обработки в 1,4 – 2,8 раза, связанные с увеличением срока службы инструмента.

С точки зрения экономической эффективности наиболее приемлемыми сочетаниями диапазонов регулирования режимов обработки являются: по подаче $S = 0,35; 0,28; 0,21; 0,125$ мм/об и по скорости резания $V = 16; 21; 26; 31$ м/мин.

Такое сочетание диапазонов регулирования в процессе сверления при подаче разработанной СОТС по сравнению с постоянными режимами обработки ($V_T, S_T, h_{кр}$), позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5 раза, увеличить производительность обработки в 2,1 раза, и соответственно, снизить себестоимость в 2,3 раза.

Выполненные расчеты позволили определить программное управление, относительно которого необходимо осуществлять стабилизацию параметров технологического процесса.

4.5 Перспективы внедрение результатов исследований в промышленность

Разработана модель, учитывающая изменения состояния технологической системы с течением времени, циклы программного управления процесса сверления, учитывающие износ режущего инструмента и приведен алгоритм повышения качества процесса сверления (приложение А.1).

На основе разработанных моделей и алгоритма написана управляющая программа для обработки деталей сверлением (приложение А.2), которая может быть использована на станках с ЧПУ.

Предложен новый состав масляной СОТС с улучшенными триботехническими свойствами (патент UA №82068 U) (приложение Б.1), снижающий энергозатраты, снижение шероховатости обработанных поверхностей и повышающим стойкость сверла.

Разработана конструкция для определения коэффициента трения смазочных материалов (патент RU №192398 U1) (приложение Б.2), позволяющая с высокой степенью точности проводить экспериментальные исследования, материалы которых могут применяться близким к материалу имитирующих процесс резания.

Разработано устройство для подачи смазывающих технологических сред (патент RU №202898 U1) (приложение Б.3) в зону резания в виде аэрозоля, под давлением, поливом и свободно падающей струей в зависимости от требований технологической операции. Отличием данного устройства от других заключается в простоте конструкции, универсальностью и минимальной стоимости, также данное устройство позволяет барботировать подаваемую СОТС.

Результаты диссертационного исследования, а именно, методика обработки отверстий с предложенными циклами обработки с подачей разработанного состава СОТС на операциях сверления спиральными сверлами, учитывающая износ режущих кромок, позволяет получить изделия с необходимыми параметрами качества и меньшей вероятности возникновению брака, внедрены в ФГБУН «НИИСХ Крыма» (г. Симферополь). Предполагаемый годовой экономический

эффект от внедрения в условиях производства составляет 127 500 рублей (приложение В.1).

Внедрение в производство разработанной методики сверления отверстий и применение нового состава СОТС используется в технологическом процессе изготовления гидроцилиндров, в условиях основного производства предприятия АО «Пневматика» (г. Симферополь). Использование результатов диссертационной работы позволяет получить изделия с необходимыми параметрами точности отверстий, повысить производительность технологического процесса, сократить затраты на изготовление, а также снизить себестоимость выпускаемой продукции предприятия. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 115 000 руб. (приложение В.2).

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при проведении практических занятий и лабораторных работ при изучении дисциплин «Теория резания», «Процессы и операции формообразования» и «Основы ремонта автомобилей и навесного оборудования», а также написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров (приложение В.3).

Выполненные исследования процесса сверления могут быть использованы при решении практических задач при обработке деталей на автоматизированном оборудовании.

Оптимизация циклов осевой подачи инструмента и скорости резания операции сверления проведена методом полного перебора параметров цикла по всем основным ограничениям целевой функции, связанным с техническими требованиями на готовую деталь (точность, качество), конструктивными параметрами станка (податливость технологической системы, параметры режимов резания), характеристикой режущего инструмента (износ режущих кромок, осевая жесткость).

Для обеспечения требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности отверстий при сверлении партии деталей, разработан оптимальный цикл сверления (управления скоростью резания и величиной подачи), устойчивый

к воздействию внешним переменным технологическим факторам (радиальное биения сверла, износ режущих кромок, переменная податливость технологической системы).

Экспериментальная проверка методики оптимизации разработанных циклов по скорости резания и величины подач, проводилась путем сравнения погрешности обработки деталей при двух технологий, когда партия деталей обрабатывалась по заводской технологии с подачей традиционной заводской СОТС и когда партия деталей обрабатывались по предлагаемой технологии с применением разработанной СОТС, основанной на предложенной методике оптимизации циклов.

В соответствии с программой граничного цикла при сверлении ответственных деталей эксперименты проводились для партии деталей из 30 штук с целью учета нестабильных условий сверления, имеющих место при обработке партии деталей.

Процесс сверления выполнялся сверлом из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 22 мм при осевой подаче $S = 0,125$ мм/об и с изменением скорости резания V_p от 11 до 31 м/мин и при с постоянной скорости резания $V_p = 21$ м/мин, с изменением величины подачи S от 0,125 до 0,28 мм/об. Данные режимы обработки ограничивались особенностью конструкции детали.

Все детали, просверленные с граничными циклами обработки, по шероховатости поверхности, допуску на изготовление и отклонениям от округлости соответствовали требованиям технологической документации.

Проверка адекватности предложенной методики граничных циклов управления осевой подачи и скорости резания выполнялась путем сравнения существующей и предлагаемой технологиям.

Наблюдается повышение стабильности показателей качества (таблица 4.4) операции сверления. По сравнению с обработкой по заводской технологии, без стабилизации цикла дисперсия по округлости сечения уменьшается в 1,75 раза, а по погрешности диаметра в 1,47 раза.

Время обработки деталей снижается в 1,32-1,4 раза, производительность операции сверления в среднем повышается на 20%.

Таблица 4.4

Сравнительные результаты качества поверхностей обработанных отверстий по существующей и предлагаемой технологиям.

По заводской технологии						
№ партии	Округлость сечения – Δ , мкм			Погрешность диаметра – Δ_d , мкм		
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	25	10	6,25	52	30	13,44
2	23	9	5,44	49	22	20,25
3	24	12	4,0	51	28	14,69
Σ_i	24	10,33	5,23	50,68	26,67	16,13
По предлагаемой технологии						
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	20	9	3,36	45	29	7,11
2	14	5	2,25	42	21	12,25
3	19	8	3,36	43	21	13,44
Σ_j	17,67	7,33	2,99	43,33	23,67	10,935
$\frac{\Sigma_i}{\Sigma_j}$	1,35	1,41	1,75	1,17	1,13	1,47

Таким образом, выполненные в производственных условиях экспериментальные исследования подтверждают достаточно высокую эффективность управления циклом и возможность применения разработанной методики в автоматизированном производстве.

Исследование циклов управления операцией сверления производилось при обработке деталей из стали 12X18H10T на базе вертикально-фрезерного станка Haas VF-4 с ЧПУ.

Выводы по главе.

1. Эффективность механической обработки на операциях сверления повышается за счет применения разработанных способов управления процессом сверления, устанавливающих связь между величиной предельного износа инструмента с режимами обработки, позволяющих повысить точность и качество обрабатываемых деталей, а также увеличить период стойкости режущего инструмента.

2. Получена аналитическая зависимость определения периода стойкости режущего инструмента с учетом предложенных циклов обработки, величины подачи и скорость резания до достижения сверлом предельной величины износа.

3. Производственные испытания показывают, что при обработке изделий по предложенной методике на операциях сверления по сравнению с традиционными методами обеспечивается более высокое качество поверхностей. При сверлении отверстий дисперсия по округлости сечения уменьшается в 1,75 раза, а по погрешности диаметра поверхности в 1,47 раза. Одновременно повышается производительность операции сверления в среднем на 20%.

4. Осуществлено внедрение результатов проведенных исследований на ФГБУН «НИИСХ Крыма», где годовой экономический эффект составляет 127 500 рублей и на АО «Пневматика» с предполагаемым годовым экономическим эффектом от внедрения составляет 115 000 руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана динамическая математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе. Проведенные расчеты показывают, что деформация сверла оказывает значительное влияние на точность обработанного отверстия. Для компенсации этого эффекта разработана модель, учитывающая изменение состояния технологической системы с течением времени, что позволило прогнозировать формирование таких показателей качества поверхностей детали как точность размера и шероховатость.

2. Получены аналитические зависимости для расчёта составляющих сил резания, учитывающие износ режущих кромок сверла. Установлены закономерности изменения энтальпии присадки наноглинистого минерала от температуры СОТС и ее влияние на снижение температуры в зоне резания.

Получены математические выражения, позволяющие осуществлять расчет температур в зоне контакта, за период стойкости инструмента, а также зависимости для расчёта составляющих сил резания, учитывающее износ режущих кромок сверла

3. Проведенная качественная и количественная оценка математической модели процесса сверления свидетельствуют об её адекватности реальному процессу. Отклонения экспериментальных значений от расчетных составили не более 10%, что позволяет использовать модели для управления показателями процесса сверления в рассмотренных диапазонах варьирования режимов резания.

4. Эффективность механической обработки на операциях сверления повышается за счет применения разработанных способов управления процессом, которые устанавливают связь между величиной предельного износа инструмента с режимами обработки, позволяют повысить точность и качество обрабатываемых деталей, а также увеличивают период стойкости режущего инструмента.

5. Получена аналитическая зависимость определения периода стойкости режущего инструмента с учетом предложенных циклов обработки, величины подачи и скорость резания до достижения сверлом предельной величины износа.

6. Производственные испытания показывают, что при обработке изделий по предложенной методике на операциях сверления по сравнению с традиционными методами показывает более высокое качество поверхностей. При сверлении отверстий дисперсия по округлости сечения уменьшается в 1,75 раза, а по погрешности диаметра поверхности в 1,47 раза. Одновременно повышается производительность операции сверления в среднем на 20%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абдулгасис Д.У. Анализ математических моделей технологического процесса сверления, описывающих аспекты обеспечения качества обработки / Д.У. Абдулгасис, Э.Д. Умеров, У.А. Абдулгасис // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(60), 2018. – С.200-204.
2. Абдулгасис Д.У. О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры / Д.У. Абдулгасис, Э.Д. Умеров // Известия Волгоградского технического университета. Серия: «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. №5(184). 2016. – С. 7-11.
3. Абдулгасис Д.У. Улучшение теплофизической обстановки в зоне резания при сверлении за счет эндотермических возможностей наноглинистых минеральных присадок к масляным СОТС / Д.У. Абдулгасис, Э.Д. Умеров, У.А. Абдулгасис // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(56), 2017. – С.63-69.
4. Александров А.В. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов / А.В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин; Под ред. А. В. Александрова. – 3-е изд. Испр. – М: Высш. Шк., 2003. – 560.
5. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров – М.: Машиностроение, 2003. – 736 с.
6. Балла, О.М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология / О.М. Балла – Санкт-Петербург: Лань, 2017. – 368 с.
7. Бармин Б.П. Вибрации и режимы резания / Б.П. Бармин – М: Машиностроение, 1972. – 72 с.
8. Барташев Л. В. Технолог и экономика / Л.В. Барташев. – М. : Машиностроение, 1983. – 152 с.
9. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2013. – 568 с.
10. Братан С.М. Математическая модель силовой составляющей процесса

сверления, учитывающая её изменение во времени / С.М. Братан, П.А Новиков, Э.Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ имени Февзи Якубова, № 3(69), 2020. – С.212-219.

11. Великанов К. М. Расчеты экономической эффективности новой техники. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

12. Внуков Ю. Н. Износостойкость инструментов из быстрорежущей стали / Ю. Н. Внуков. – Запорожье, 2011. – 412 с.

13. Вороненко, В.П. Машиностроительное производство: Учебник для спец. сред. уч. завед.; Под ред. Ю.М. Соломенцева / В.П. Вороненко – М.: Высшая школа, 2001. – 304 с.

14. Вульф А. М. Резание металлов / А.М. Вульф – Изд. 2-е. – Л.: Машиностроение. – 1973. – 496 с.

15. Гавриш А.П. Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства / А.П. Гавриш, А.И. Ефремов. – К.: Техника, 1982. – 215 с.

16. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. – 9-е изд. / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

17. Головин В.И. Повышение надежности сверления электроинструментом глубоких отверстий дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / Василий Игоревич Головин. – Севастополь, 2008. – 167 с.

18. Горбунов И.В. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ системах. механообработки / И.В. Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, А.Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. № 4–4. – С. 846-853.

19. Горелова А.Ю. Методы повышения точности обработки глубоких отверстий / А.Ю Горелова, А.А. Плешаков //Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – №7(2). – С.363-370.

20. ГОСТ 2034-80. Сверла спиральные. Технические условия. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.

21. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введен 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
22. Грановский Г. И. О природе износа резцов из быстрорежущей стали дисперсионного твердения / Г.И. Грановский, Н.А. Шмаков // Вестник машиностроения. – 1971. – №11. – С.65-70.
23. Грановский Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский – Высшая школа, 1985. – 304 с.
24. Гузеев В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / В.И. Гузеев – М.: Машиностроение, 2005. – 368 с.
25. Гуськов А.М. Экспериментальное определение сил резания при сверлении на основе методов анализа размерностей и теории подобия / А.М. Гуськов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 9. – С. 57-82.
26. Дашченко А. Ф. Теоретические основы инженерной механики: учебник / А.Ф. Дашченко, И.М. Белоконов, Л.В. Коломиец, Ю.Н. Свиначев. – Одесса: Стандартъ, 2005. – 656 с.
27. Дерябин И.П. Исследование влияния перемычки сверла на точность обработки отверстий / И.П. Дерябин, С.И. Павличук // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. – Челябинск, 2014. – С. 1437-1440.
28. Дерябин И.П. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе компьютерного моделирования процессов обработки отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. на соиск уч. ст. канд. техн. наук / И.П. Дерябин. – Челябинск, 1996. – 22 с.
29. Добровидов А.Н. Экспериментальное исследование методов повышения стойкости режущих инструментов / А.Н. Добровидов, А.М. Розенберг, А.Н. Еремин // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. 1948, Т.61, Вып. 3. – С. 41-63.
30. Древаль А.Е. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства / А.Е. Древаль, Н.А. Рагрин, В.А. Самсонов //

Наука и образование (77-30569/250866). 2011, №10. – С. 1-16.

31. Дрожжин В. В. Сборник заданий по теоретической механике. Кинематика : учебное пособие / В. В. Дрожжин. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 192 с.

32. Дунаев П. Ф. Расчёт допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М.: Машиностроение, 1984. – 189 с.

33. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков – М: Машиностроение, 1986. – 184 с.

34. Житомирский В. К. Механические колебания и практика их устранения / В. К. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1966. – 175 с.

35. Каллиоппин В.В. Механика волны при резании / В.В. Каллиоппин – Минск: Наука и Техника, 1969. – 170 с.

36. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

37. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопрофильных деталей: автореф. дис. на соиск уч. ст. канд. техн. наук / И.А. Киселев. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 21 с.

38. Кожевников Д.В. Резание материалов / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов – М.: Машиностроение, 2007. – 304 с.

39. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М: Машиностроение, 1974. – 280 с.

40. Кравченко К.Ю. Разработка и обоснование новых режимов резания в технологии концевого фрезерования при условии обеспечения устойчивого резания: автореф. дис. на соиск уч. ст. канд. техн. наук / К.Ю. Кравченко – УРФУ. Екатеринбург, 2016. – 18 с.

41. Крагельский И. В. О трении не смазанных поверхностей: тезисы Всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. – М.: АН СССР, 1939. – Т.1. – С.543-561. 120

42. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М: Машгиз, 1962. – 383 с.

43. Кумабе Д. Вибрационное резание / Д. Кумабе. – М.: Машиностроение,

1985. – 224 с.

44. Лазарев Г.С. Автоколебания при резании металлов Г.С. Лазарев – М.: Высшая школа, 1971. – 243 с.

45. Латышев В. Н. Влияние состава СОЖ на величину крутящих моментов и стойкость сверл / В.Н. Латышев, А.А. Шлыков // Сб. Технология машиностроения – №4 – 1967. – С. 25-29.

46. Линчевский П. А. Расчет износа инструмента на основе динамической модели механической обработки / П.А. Линчевский, С.С. Фотти, В.И. Попов // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – № 2. – С. 122-124.

47. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машгиз, 1958. – 536 с.

48. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.

49. Лукашенко В. А., Лобадырев А. А. Расчет погрешностей расположения осей отверстий при их обработке на сверлильных станках // Весник Беларуска-Российского университета. 2008. №2 (19) С. 67– 75.

50. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.

51. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

52. Малкин А. Я. Скоростное точение закаленных сталей. / А.Я. Малкин - М.: Оборонгиз, 1951. – 185 с.

53. Металлорежущий инструмент Sandvik Coromant. Основной каталог. Швеция, типография Elanders, 2008. – 1144 с.

54. Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

55. Назаренко Д. В. Оптимизация процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра. Автореф. дисс. на соиск. канд.техн. наук. Ростов-на-Дону: Донской госуд. техн. университет. – 1998. – 18 с.

56. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при

абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.

57. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников, А. А. Шаманин, Ф. М. Дроздов / Под общ. ред. Н. Ф. Уткина. – Л.: машиностроение, 1988. – 269 с.

58. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден – М.: Мир, 1976. – 464 с.

59. Орликов М.Л. Динамика станков. 2–е изд., перераб. и доп. / М.Л. Орликов – Киев: Высшая школа, Головное издательство, 1989. – 272 с.

60. Павлова Т.А. Экспериментальные зависимости для определения силы резания и стойкости сверл при обработке отверстий в марганцовистых сталях / Т.А. Павлова // Вестник приазовского государственного технического университета. 2002, №12. – С. 1-3.

61. Пановко, Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко – М.: Наука. 1971. – 239 с.

62. Патент на полезную модель №192398 РФ, МПК G01N 19/02. Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов / Умеров Э.Д., Скакун В.В., Абдулгазис У.А., Ягьяев Э.Э.; заявители и патентообладатели – авторы. – Заявка №2019106941; заявлено 13.03.2019; опубл. 16.09.2019, Бюл. №26.

63. Патент на полезную модель №202898 РФ, МПК B05D 1/02. Устройство для подачи смазывающих технологических сред / Скакун В.В., Джемалядинов Р.М., Умеров Э.Д.; заявители и патентообладатели – авторы. – Заявка №2020132424; заявлено 29.09.2020; опубл. 12.03.2021, Бюл. №8.

64. Патент на полезную модель №82068 (Украина), МПК C10M 173/00 (2013.01). Смазочно-охлаждающее технологическое средство / Умеров Э.Д., Абдулгазис У.А., Подзноев Г.П., Абдулгазис Д.У., Ягьяев Э.Э. // Заявители и патентообладатели – авторы. Заявка № u2012 13241; заявл. 20.11.2012; опубл. 25.07.2013. Бюл. №14.

65. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийным инструментом / С.И. Метрушин. – Томск: Изд. ТГУ, 2003. – 172 с.

66. Процессы и операции формообразования поверхностей при механической обработке. Теоретические основы и лабораторный практикум / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Е.А. Левченко и [др]. – М: Центркатолог, 2018. – 200 с.

67. Пярых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления / А.С. Пярых, А.В. Савилов // Системы. Методы. Технологии – 2016. – № 2 (30). – С. 69-73.

68. Пярых А.С. Совершенствование процесса получения точных отверстий в деталях из алюминиевых сплавов на высокопроизводительном оборудовании: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Пярых Алексей Сергеевич. – Иркутск, 2018. – 181 с.

69. Развитие науки о резании металлов / [Ф.В. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 415 с.

70. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1978. – 72 с.

71. Резников А. Н. Теплообмен при резании и охлаждение режущих инструментов. / А.Н. Резников – М.: Машгиз, 1963. – 200 с.

72. Розенберг Ю. А. Резание материалов: учебник / Ю. А. Розенберг. – Курган: Зауралье, 2007. – 294 с.

73. Руководство по обработке отверстий. Sandvik Coromant. Швеция, типография Sandvikens Tryckeri, 2006. – 240 с.

74. Савилов А.В. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А.В. Савилов, А.С. Пярых, С.А. Тимофеев. – Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – № 6–2. – С. 476-479.

75. Салабаев Д.Е. Повышение точности при сверлении отверстий путем динамической настройки технологической системы: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук / Д.Е. Салабаев – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2005. – 19 с.

76. Самоподнастраивающиеся станки / Под. ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1970. – 414 с.

77. Сергеев С.В. Повышение точности при сверлении отверстий спиральными сверлами путем управления динамическими составляющими процесса: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / С.В. Сергеев. – Челябинск, ЧГТУ. 1995. – 19 с.

78. Сидоров Д.Е. Влияние деформаций рабочей части спирального сверла на точность отверстий / Д. Е. Сидоров, Э.Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 1(63), 2019. – С. 267-273.

79. Симсиве Ж.В. Оценка износа твердосплавного режущего инструмента при механической обработке / Ж.В. Симсиве, А.В. Кутышкин, Д.Ц. Симсиве // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. 2012, №1(54). – С. 50-55.

80. Сипайлов А.Г. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для студентов вузов по специальности "Электромеханика" / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М: Высшая школа, 1989. – 238 с.

81. Соколовский А. П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках / А.П. Соколовский. – М.: Машгиз, 1952. – 288 с.

82. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю.Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.

83. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 2003 – 994 с.

84. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. –Т. 1. – 656 с.

85. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. –Т. 2. – 496 с.

86. Сулов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Сулов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов, С.Г. Бишутин – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

87. Талантов Н.В., Черемушников Н.П. Дудкин М.Е. Исследование характера взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом // Сборник «Труды Волгоградского политехнического института». – Изд. ВПИ, 1978. – С. 74 – 78.

88. Татьянченко А. Г. Уравнение изогнутой оси при продольно-поперечном изгибе сжато-закрученного стержня / А. Г. Татьянченко, Т. М. Брижан // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк, 2011. – вип. 8(190) . – С. 182-188.

89. Тверской М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М. М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.

90. Техничко-економический анализ машин и приборов / под общей ред. М. И. Ипатова – М. : Машиностроение, 1985. – 248 с.

91. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление / Н.Д. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1982. – 208 с.

92. Умеров Э. Д. Моделирование оптимального состава наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС / Э.Д. Умеров, А.М. Сухтаева, Д.Д. Гельфанова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 169-175.

93. Умеров Э.Д. Влияние на коэффициент трения присадки к масляной субстанции СОТС в виде наноглинистого минерала / Э.Д. Умеров, Ш.Т. Мевлют, Д.У. Абдулгасис, У.А. Абдулгасис // Вестник современных технологий. Издательство: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" (Севастополь). – №2(18), – 2020 . С.4-9.

94. Умеров Э.Д. Влияние наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС на формирование стружки и качество обработанной поверхности при сверлении конструкционных сталей / Э.Д. Умеров, Д.У. Абдулгасис, У.А. Абдулгасис // Сборник статей «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь 2015»: материалы Международной научно-технической конференции 14-15 сентября 2015 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2015. – С. 73-79.

95. Умеров Э.Д. Использование системного подхода при моделировании технологического процесса сверления / Э.Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(64), 2019. – С.271-275.

96. Умеров Э.Д. Повышение стойкости режущего инструмента применением экологически безопасных присадок к масляным СОТС с эндотермическими и триботехнологическими свойствами / Э.Д. Умеров, Д.У. Абдулгазис, У.А. Абдулгазис // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сборник статей Всероссийской заочной научно-практической конференции с международным участием. / ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». Екатеринбург, 2015. – С.24-31.

97. Холмогорцев Ю. П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю.П. Холмогорцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.

98. Чашкин Ю.Р. Математическая статистика. Анализ и обработка данных: Учебное пособие / Ю.Р. Чашкин; Под. ред. С.Н Смоленский. – Рн/Д: Феникс, 2010. – 236 с.

99. Шишмарёв В.Ю. Автоматика: учебник для академического бакалавриата / В. Ю. Шишмарёв. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 284 с.

100. Эффективные технологические решения. [Электронный ресурс] URL: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/brochures/ru-ru/C-2940-131.pdf>.

101. Якобс Г.Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. – М.: «Машиностроение», 1981. – 279 с.

102. Яковлев М.Г. Повышение производительности токарной обработки маложестких деталей из никелевых сплавов на основе моделирования динамики процесса резания: автореф. дис. на сосиск. уч. ст. канд. тех. наук. / М.Г. Яковлев. Москва, МГТУ «Станкин», 2009. – 21 с.

103. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч.Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.

104. Янюшкин А.С. Качество обработанной поверхности композиционных материалов фрезерованием / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. материалы I-ой Международной научно-практической конференции. 2015. – С. 277-285.

105. Ящерицын П.И. Основы резания металлов и режущий инструмент. / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко – Мн.: Выш. школа, 1981. – 560 с.

106. Abdulgazis D. Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects / Dilyaver Abdulgazis, Ervin Umerov, Umer Abdulgazis // MATEC Web of Conferences 224, 01126 (2018) *ICMTMTE 2018*. doi.org/10.1051/mateconf/201822401126.

107. Abdulgazis D. Development of Endothermic Properties and Improvement of Tribotechnological Properties in Oil Cutting and Cooling Lubricants / Dilyaver Abdulgazis, Ervin Umerov, Umer Abdulgazis // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering Volume 206 (2017). – P. 1503–1507. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.669>.

108. Abdulgazis D. Improvement of tribotechnological properties of oil-based cutting fluids by adding dry lubricants / Dilyaver Abdulgazis, Ervin Umerov, Umer Abdulgazis // MATEC Web of Conferences Volume 129, 01068 (2017). *ICMTMTE 2017*. DOI: 10.1051/mateconf/201712901068.

109. Ahmadi K. Identification of Machining Process Damping Using Output–Only Modal Analysis / K. Ahmadi, Y. Altintas // Journal of Manufacturing Science and Engineering – 2014. – Vol. 136. №5. – P. 1-13.

110. Ahmadi K. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills / K. Ahmadi, A. Savilov // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Vol. 89. – P. 208-220.

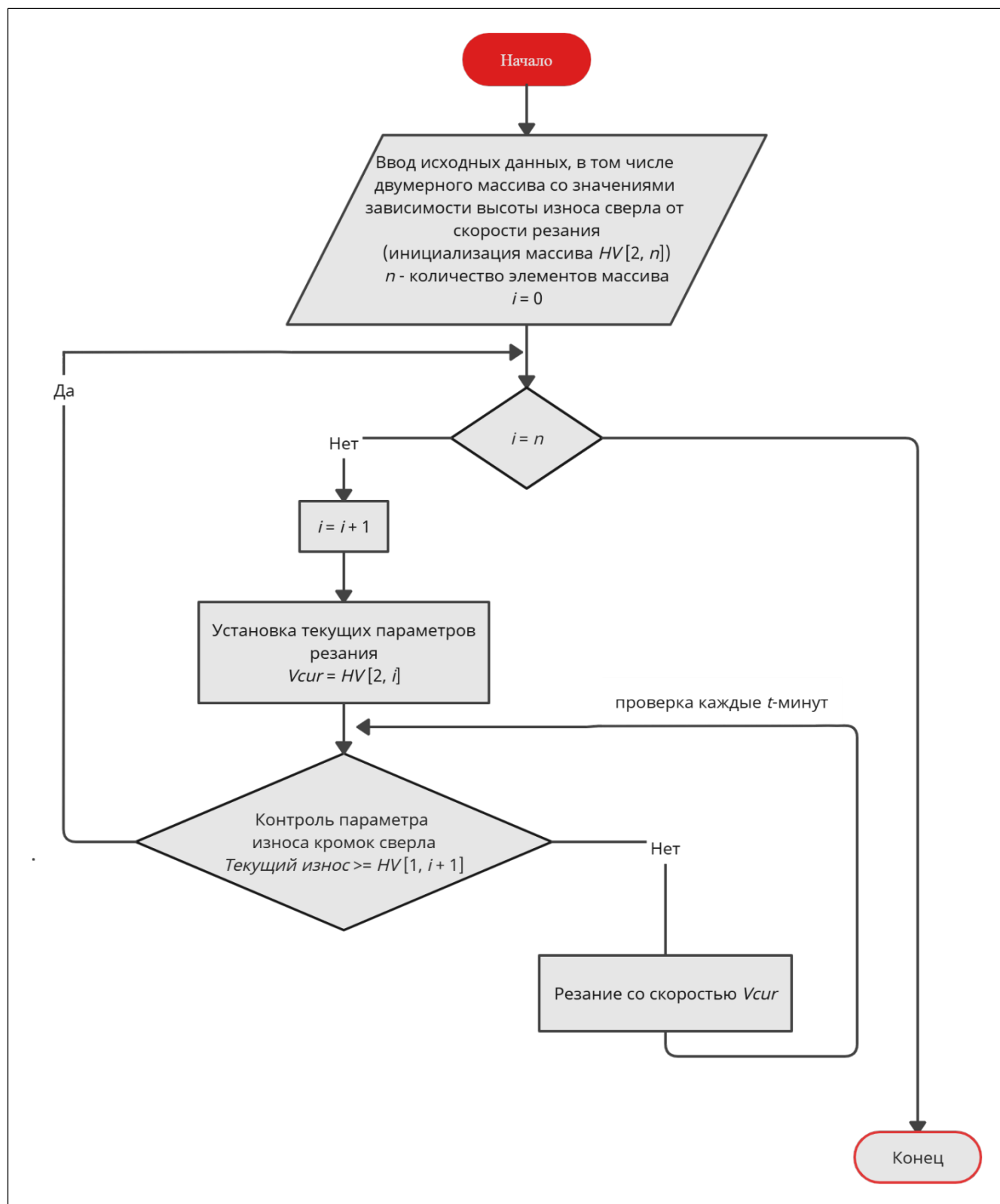
111. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas – Cambridge University Press. – 2012. – 366 p.

112. Bellman R. Adaptive Control Processes, A Guided Tour. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1961.

113. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
114. Ema S. Chatter vibration in drilling / S. Ema, H. Fujii, E. Marui // Journal of Engineering for Industry. – 1998. – №110. – P. 309-314.
115. Genta G. Dynamics of Rotating Systems / G. Genta // Springer. – 2005. Vol. 658.
116. Haggerty W. A. Effects of Point Geometry and Dimensional Symmetry on Drill Performance / Haggerty W. A. // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1961. – Vol.1. – P. 41-58.
117. Jiménez A. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole / Jiménez A. Arizmendi M. Cumbicus W.E. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2018. – Vol. 96. – Issue 5-8. – P. 1971-1990.
118. Lee S.J. An analysis of the drill wandering motion / S.J. Lee, Eman K.F., Wu S.M. // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1986. – Vol. 109. – Issue 4. – P. 297-305.
119. Pirtini M. Forces and hole quality in drilling / M. Pirtini, I. Lazoglu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 99. – P. 1271-1281.
120. Roukema J. C. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation / J. C. Roukema, Y. Altintas // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – P. 1455-1473.
121. Sakuma K. Self-guiding action of deep-hole-drilling tools / K. Sakuma, K. Taguchi, A. Katsuki // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1981. – Vol. 30. – Issue 1. – P. 311-315.
122. Self-oscillation suppression when turning non-rigid shafts using spring tools and the spring headstock center/ V. Svinin, A. Samsonov, A. Savilov, A. Pyatykh // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. – 2018. – Vol. 224.

123. Stephenson D. Metal Cutting Theory and Practice / D. Stephenson, J. Agapiou // CRC Press. – 2016. – P. 931.
124. Tlusty, I. Chipping and breakage of carbide tools / Tlusty I., Masood Z. // Trans. ASME. J.Eng.Eng. - 1978, V. 100, № 4, P. 403 – 412.
125. Umerov E.D. Application of system approach to drilling process simulating / E.D. umerov // Materials Today: Proceedings Volume 38, 2021. Pages 1824–1826. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.428>.
126. Wardle, F.P., Poon S.Y. Rolling bearing noise/ - Cause and cure // Chrt. Mech. Eng. 1983.1 Vol.30. - №7/8. P.36-40.

Блок-схема алгоритма управления циклом управления величиной подачи



Приложение А.2**Управляющая программа для обработки деталей сверлением
для станков с ЧПУ.**

O0015;
N10 G21 G55 (SVERLOD22);
N20 G40 G49 G80 G90 G95;
N30 T01 M06;
N40 G00 G43 H01 Z80.;
N50 G00 X0 Y50.;
N60 G96 S5 M03;
N70 Z50.;
N80 G73 G99 X0 Y50. Z-55. Q4. R2. F0.076. K5. M08;
N90 G80;
N100 G65 P9921 M22. D22. T1. (IZMERENIE);
N110 S11 M03;
N120 G73 G99 X50. Y0 Z-55. Q4. R2. F0.076. K9. M08;
N120 G80;
N130 G65 P9921 M22. D22. T1.;
....
G65 P9921 M22. D22. T1.
S61 M03;
G73 G99 X50. Y50. Z. Q4. R2. F0.076. K9. M08;
Z80;
M05 M09;
G91 G28 Z0;
G28 X0 Y0;
M30.

Смазочно-охлаждающее технологическое средство





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **82068** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
C10M 173/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2012 13241 (22) Дата подання заявки: 20.11.2012 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.07.2013 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.07.2013, Бюл.№ 14	(72) Винахідник(и): Умеров Ервін Джеватович (UA), Абдулгасіс Умер Абдуллайович (UA), Подзносєв Геннадій Петрович (UA), Абдулгасіс Ділявер Умерович (UA), Ягьяєв Ельмар Енверович (UA) (73) Власник(и): Умеров Ервін Джеватович, вул. Пушкіна, 37, с. Ільчово, Ленінський р-н, АР Крим (UA), Абдулгасіс Умер Абдуллайович, вул. Дюльбер, 16, м. Сімферополь, АРКрим, 95024 (UA), Подзносєв Геннадій Петрович, вул. Алмазарська, 48/36, м. Сімферополь, АР Крим, 95010 (UA), Абдулгасіс Ділявер Умерович, вул. Дюльбер, д. 18, м. Сімферополь, АР Крим, 95024 (UA), Ягьяєв Ельмар Енверович, вул. Молочна, 8, с. Молочне, Сімферопольський р-н, АР Крим, 97560 (UA)
--	---

(54) МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЗАСІБ

(57) Реферат:

Мастильно-охолоджуючий технологічний засіб містить речовину, що змащує у вигляді рослинного масла та кристалогідрат. Як кристалогідрат використовують наночастинки бентоніту.

UA 82068 U

Корисна модель належить до мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ), які подають у зону різання металорізального інструмента, для охолодження й змащення ріжучих крайок при механічній обробці деталей.

Відомі емульсійні МОТЗ, приготовані на основі мінерального масла й присадок [Ф.Н. Абрамов. Довідник по обробці металів різанням. Київ, "Техніка", 1963 р. с 660. Аналог].

Відомі МОТЗ малоефективні при швидкісній обробці важкооброблюваних металів, тому що недостатньо ефективно відводять тепло із зони різання через малу теплоємність. Це істотно знижує стійкість металорізального інструмента і продуктивність праці.

Відомо МОТЗ для механічної обробки металів різанням, що містить рослинне масло і кристалогідрат у вигляді гідрокарбонату натрію $\text{NaHCO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (харчова сода). Як рослинну олію використовують соняшникову олію [Патент України № 61421 МПК. Кл. С10М 173/00. 2002 р.]. Обраний як найближчий аналог. Змащувальний матеріал і гідрокарбонат натрію, який хоча і вище по теплоємності, але його використання недостатньо ефективно для виконання високотехнологічних швидкісних операцій, що знижує стійкість різального інструменту.

Зазначене МОТЗ забезпечує відведення тепла в процесі механічної обробки металу, що не перевищує температуру 100-150 °С. Однак при підвищенні температури вище 150 °С, що виникає при силовому або швидкісному різанні металу, воно не ефективно. Це пов'язано з утворенням в зоні різання плівки рослинної олії, що знижує тепловідвід, з малим часом контакту МОТЗ із зоною різання і малим теплопоглинальним ефектом харчової соди (1755 кДж), а також досить великим ступенем її роздрібнювання. Крупно роздрібнена харчова сода має малу поверхню обволікання рідкою фазою її частинок, що знижує ефект гідратації.

В основу корисної моделі поставлено задачу - створення МОТЗ підвищеної теплоємності.

Поставлена задача вирішується тим, що підвищення швидкості різання металів і підвищення тепловідведення із зони різання, здійснюється за рахунок підвищення стійкості ріжучого інструменту і поліпшення якості обробки поверхні деталей. Технічний результат досягається тим, що в МОТЗ міститься змащувач речовина і бентоніт (роздроблений до розміру наночастинок), у співвідношенні: рослинна олія - 75...85 %, бентоніт (60...70 % монтморилоніту $\text{Al}_2 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) - 25...15 %, утворюючи підвищену теплоємність МОТЗ, що представляє листовий силікат з розширювальною структурною осередком, а як змащувальну речовину використовують соняшникову олію.

Зазначені ознаки необхідні і достатні для здійснення корисної моделі та досягнення технічного результату при її використанні для охолодження металорізального інструмента при силовому або швидкісному різанні металу.

Причинно-наслідковий зв'язок нових ознак корисної моделі і технічного результату, що досягається полягає в наступному:

- використання в МОТЗ природного мінералу - бентоніту (роздробленого до розміру наночастинок), дозволяє підсилити ефект тепловідведення, за рахунок збільшеної кількості молекул води, із зони різання металу і за рахунок цього знизити температуру на ріжучих кромках інструменту;

- роздроблення мінералу до розміру наночастинок дозволило збільшити поверхню обволікання речовиною, що змазує, що прискорило процес гідрування.

Охолодження металорізальних інструментів при швидкісній механічній обробці металів композитним охолоджувачем, який представляє собою суміш тонко роздрібненого до розміру наночастинок бентоніту і рослинної олії, яка більш ефективно, порівняно з вищевикладеним прототипом.

МОТЗ містить змащувач речовину у вигляді рослинного масла і бентоніту, в подрібненому вигляді до фракцій наночастинок, які змішуються у співвідношенні: рослинна олія - 75...85 %, бентоніт (60...70 % монтморилоніту $\text{Al}_2 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) - 25...15 %. При виконанні технологічних операцій цей склад подається в зону різання металів.

При контакті МОТЗ з поверхнею різального інструменту, поглинається тепло маслом і вступає в реакцію кристали бентоніту, які проявляють ендотермічний ефект.

В результаті цього забезпечується спрямоване і постійне оновлення контакту охолоджуючого субстрату з поверхнею металу, нагрівається і поглинається тепло за рахунок трансформації кристалічної структури кристалогідратів і виділення пов'язаної в ньому води.

Випробування МОТЗ проводилися при свердлінні металу сталь 45 (ГОСТ 1050-88) свердлом Р6М5К5. При використанні МОТЗ, що заявляється, осьова сила при цьому знизилася на 6,0...7,0 %. Зниження крутного моменту від застосування даного МОТЗ склало 17...20 %, а також покращилася якість шорсткості оброблюваної поверхні.

Застосування МОТЗ заявленого складу суттєво знижує температуру на ріжучих кромках інструменту при силовому або швидкісному різанні металу, що збільшує термін їх служби.

UA 82068 U

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 1. Мазильно-охолоджуючий технологічний засіб, що містить речовину, що змащує у вигляді рослинного масла і кристалогідрат, який **відрізняється** тим, що як кристалогідрат використовують наночастинки бентоніту (60...70 % монтморилоніту - $\text{Al}_2 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).
2. Мазильно-охолоджуючий технологічний засіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що співвідношення компонентів МОНЗ приймається:
- | | |
|---|------------|
| рослинна олія | 75...85 % |
| бентоніт (60...70 % монтморилоніту - $\text{Al}_2 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) | 25...15 %. |

 Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

 Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

 ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

192 398⁽¹³⁾ U1(51) МПК
G01N 19/02 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 19/02 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2019106941, 11.03.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.03.2019

Дата регистрации:
16.09.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.03.2019

(45) Опубликовано: 16.09.2019 Бюл. № 26

Адрес для переписки:
295015, Респ. Крым, г. Симферополь, пер.
Учебный, 8, Кафедра автомобильного
транспорта, Умеров Эрвин Джеватович

(72) Автор(ы):
Умеров Эрвин Джеватович (RU),
Скакун Владимир Владимирович (RU),
Абдулгасис Умер Абдуллаевич (RU),
Ягьяев Эльмар Энверович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Умеров Эрвин Джеватович (RU),
Скакун Владимир Владимирович (RU),
Абдулгасис Умер Абдуллаевич (RU),
Ягьяев Эльмар Энверович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 983522 A1, 23.12.1982. RU 2452642
C1, 10.06.2012. WO 2011019787, 17.02.2011. RU
104722 U1, 20.05.2011.

(54) Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области машиностроения, а именно к методам исследования коэффициента трения различных по составу смазочных материалов. Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов содержит втулку с коническим отверстием (контртело), втулку из фторопласта, неподвижный вал, фиксирующие винты, индентор, нагружающие винты, одновременно служащие для фиксации втулки с коническим отверстием (контртела), упорного кольца, винты

для фиксации упорного кольца, упорного подшипника, глухих отверстий, расположенных на втулке, втулки для передачи крутящего момента, винты, фиксирующие устройство, основание для установки устройства, направляющих шпилек, стола, шкива, рукоятки, приводной трос, динамометра и рычага. Техническим результатом полезной модели является повышение точности определения коэффициента трения смазочных материалов. 2 ил.

RU 192 398 U1

RU 192 398 U1

RU 192 398 U1

Полезная модель относится к области машиностроения, а именно к методам исследования коэффициента трения различных по составу смазочных материалов.

Известно устройство для испытания трущихся материалов и масел (А.с. СССР №983522, МПК G01N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел. Бюл. №47, 1982 г. Аналог), содержащее станину, установленные на ней держатели образца и контробразца, узлы измерения момента трения и нагружения образцов и привод вращения образцов, плиту, установленную перпендикулярно к станине с возможностью перемещения вдоль нее, три платформы, из которых средняя закреплена на плите шарнирно, а две другие расположены под углом 45° к средней, расположенные на платформах и взаимодействующие с держателями контробразцов, направляющие и поджимные ролики, установленные на плите с возможностью поворота в плоскости держателей, передаточные звенья, взаимодействующие через подшипники качения соответственно с держателями контробразцов и узлами нагружения, а последние снабжены штоками, имеющими две степени свободы (механизмы для передачи нагрузки на контробразцы).

Основной недостаток известного устройства заключается в сложной и точной установке передаточных звеньев под прямым углом к направляющим, что приводит к большим погрешностям полученных результатов при испытаниях.

Наиболее близким по технической сущности является устройство для испытания материалов на трение и износ в условиях космоса, содержащий узел трения «диск-индентор», который представляет собой диск с двумя поверхностями трения и по которым скользят два полусферических индентора (см. Журнал «Трение и износ», т. 24, №6, 2003 г., с. 626-635. Прототип). При этом диск жестко закреплен на приводном валу, а инденторы - на специальных рычагах. Нагрузка на инденторы осуществляется с помощью тарированной пружины.

Все узлы трения приводятся во вращение с помощью выходного вала привода через зубчатые колеса. Момент трения в паре «диск-индентор» измеряется упругой тензометрической балкой. Электрические сигналы поступают на два тензометрических преобразователя, с которых они передаются на регистрирующий прибор.

Недостатками известного устройства являются сложность конструкции, обусловленная использованием большого количества элементов, сложностью его использования из-за постоянной тарировки нагружающих пружин, влияющие на погрешность измерения, а также невысокие скорости скольжения и удельные давления в контакте индентора и диска.

Техническим результатом полезной модели является повышение точности определения коэффициента трения смазочных материалов.

Это достигается тем, что заявляемое устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов, содержащее основание для установки устройства, неподвижный вал с индентором, втулку с коническим отверстием (контртелом), втулку из фторопласта, нагружающих (фиксирующих) винтов, упорного кольца, упорного подшипника и втулки для передачи крутящего момента, при этом индентор установлен в отверстии, перпендикулярно оси неподвижного вала, взаимодействующий с втулкой и коническим отверстием (контртелом), нагружение которых осуществляется при помощи винтов в широком диапазоне, образуя замкнутый силовой подвижный контур, взаимодействующий с динамометром.

Отличием данного технического решения от прототипа является тот факт, что индентор устанавливается в отверстие, которое расположено перпендикулярно оси вала, а контактные поверхности индентора образуют пару трения с коническим

RU 192 398 U1

отверстием втулки (контртелом), с возможностью замены как индентора, так и втулки с коническим отверстием (контртела) для расширения технических возможностей устройства.

Полезная модель представлена на чертежах:

5 фиг. 1 - конструктивная схема устройства для определения коэффициента трения смазочных материалов в осевом сечении.

фиг. 2 - вид сбоку устройства для определения коэффициента трения смазочных материалов.

Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов содержит
10 втулку с коническим отверстием (контртелом) 1, втулку из фторопласта 2, неподвижный вал 3, фиксирующие винты 4, индентор 5, нагружающие винты 6, одновременно служащие для фиксации втулки с коническим отверстием (контртела) 1, упорного кольца 7, винты для фиксации упорного кольца 8, упорного подшипника 9, глухих отверстий 10 расположенные на втулке 11, втулки для передачи крутящего момента 11, винты,
15 фиксирующие устройство 12, основание для установки устройства 13, направляющих шпилек 14, стола 15, шкива 16, рукоятки 17, приводной трос 18, динамометра 19 и рычага 20.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Втулка с коническим отверстием (контртелом) 1, образует контактную пару с индентором 5 расположенным
20 в отверстии вала 3 перпендикулярно оси конического отверстия. Необходимое усилие контакта обеспечивается при помощи винтов 6 и динамометрического ключа (на фиг. 2 не изображен). Во избежание линейного перемещения втулки 11 в процессе затяжки, на валу установлено стопорное кольцо 7, которое фиксируется винтами 8. Для снижения силы трения между втулкой 11 и стопорным кольцом 7 при вращении, на валу
25 дополнительно установлен упорный подшипник 9. Дополнительно для снижения силы трения между втулкой с коническим отверстием (контртелом) 1 и валом 3, установлена фторопластовая втулка 2. Передача крутящего момента с втулки 11 на втулку с коническим отверстием (контртелом) 1 осуществляется при помощи винтов 6 и специальных шпилек 14, которые дополнительно служат в качестве направляющих.

30 Вращение втулки 11 и втулки с коническим отверстием (контртелом) 1 осуществляется путем изменения угла наклона рычага 20 относительно стола 15 при помощи шкива 16 и рукоятки 17, где момент срыва фиксируется при помощи динамометра 19.

Устройство работает следующим образом: индентор закрепляют в отверстии неподвижного вала устройства и устанавливают втулку с коническим отверстием. При
35 помощи нагружающих (фиксирующих) винтов создается давление на контактную пару и контролируется динамометрическим ключом (на чертеже не изображен). Затем рычаг устанавливается на втулку, при этом на противоположной стороне рычага закрепляется приводной трос с динамометром. Изменение положения угла рычага осуществляется при помощи шкива и рукоятки, при этом система находится в нагруженном состоянии.
40 При вращении устройства в положение измерения, возникающий при вращении индентора момент трения передается посредством рычага на измерительное устройство, по показаниям которого осуществляется определение коэффициента трения.

45 Применение данного технического решения по определению коэффициента трения позволяет с высокой степенью точности проводить экспериментальные исследования и снизить затраты на изготовление установки.

(57) Формула полезной модели

Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов,

RU 192 398 U1

содержащее основание для установки устройства, неподвижный вал с индетором, втулку с коническим отверстием (контртело), втулку из фторопласта, нагружающие (фиксирующие) винты, упорное кольцо, упорный подшипник и втулки для передачи крутящего момента, отличающееся тем, что индетор, установленный в отверстии,
5 перпендикулярно оси неподвижного вала, взаимодействующий со втулкой с коническим отверстием (контртелом), нагружение которых осуществляется при помощи винтов в широком диапазоне, образуя замкнутый силовой подвижный контур, взаимодействующий с динамометром.

10

15

20

25

30

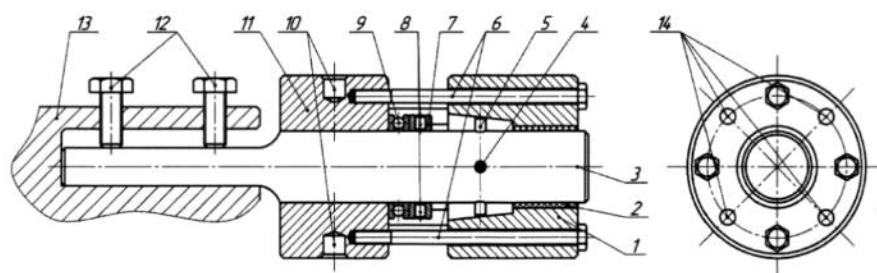
35

40

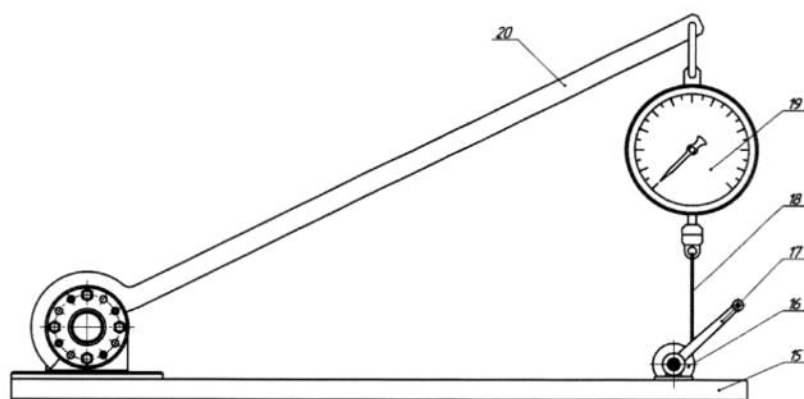
45

RU 192 398 U1

1



Фиг. 1



Фиг. 2

Устройство для подачи смазывающих технологических сред

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 202898**Устройство для подачи смазывающих технологических сред**

Патентообладатели: **Скакун Владимир Владимирович (RU),
Джемалядинов Руслан Марленович (RU), Умеров Эрвин
Джеватович (RU)**

Авторы: **Скакун Владимир Владимирович (RU),
Джемалядинов Руслан Марленович (RU), Умеров Эрвин
Джеватович (RU)**

Заявка № 2020132424

Приоритет полезной модели 29 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 12 марта 2021 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 29 сентября 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

202 898⁽¹³⁾ U1

(51) МПК
B05D 1/02 (2006.01)
B05B 1/02 (2006.01)
B05B 7/00 (2006.01)
B05B 7/02 (2006.01)
B23Q 11/10 (2006.01)
C10M 173/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B05D 1/02 (2021.01); B05B 1/02 (2021.01); B05B 7/00 (2021.01)

(21)(22) Заявка: 2020132424, 29.09.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.09.2020

Дата регистрации:
12.03.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.09.2020

(45) Опубликовано: 12.03.2021 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

295015, Республика Крым, г. Симферополь, пр.
Учебный, 8, Кафедра технологии
машиностроения, Скакун Владимир
Владимирович

(72) Автор(ы):

Скакун Владимир Владимирович (RU),
Джемалядинов Руслан Марленович (RU),
Умеров Эрвин Джеватович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Скакун Владимир Владимирович (RU),
Джемалядинов Руслан Марленович (RU),
Умеров Эрвин Джеватович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 197266 U1, 16.04.2020. RU 200934
U1, 19.11.2020. RU 199706 U1, 15.09.2020. WO
1993025345 A2, 23.12.1993. US 5678466 A1,
21.10.1997.

(54) Устройство для подачи смазывающих технологических сред

(57) Реферат:

Устройство для подачи смазывающих технологических сред (СТС) в зону резания при лезвийной обработке.

Полезная модель относится к области обработки металлов резанием и предназначена для осуществления подачи СТС растительного и животного происхождения в виде аэрозоля, а также поливом, свободно падающей струей и струей под давлением, в зависимости от требований к технологической операции.

Устройство для подачи смазывающих технологических сред содержит выключатель, терморегулятор, каналы для подачи сжатого газа, винты для регулировки подачи сжатого газа, сопло, канал для подачи СТС, винт для регулировки подачи СТС, теплоэлектронагреватели, тигель, огнеупорный теплоизолирующий материал, защитный корпус, термодатчик терморегулятора, крышку, прокладку, фиксирующие винты, манометры, инжектор смеси газов, клапан избыточного давления, сопла для

барботирования СТС.

Техническим результатом полезной модели является возможность подавать СТС растительного и животного происхождения в зону резания в виде аэрозоля, поливом, свободно падающей струей, а также струей под давлением, в зависимости от требований к технологической операции. Простота конструкции и универсальность замены отдельных узлов обуславливает надежность и относительную дешевизну изготовления устройства, а для возможности осуществления барботирования СТС, предусмотрены специальные сопла, которые расположены в тигле. Устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним видом газа так и сочетанием газов, благодаря наличию сопел для барботирования СТС в тигле, и двух отдельных каналов, соединенных с инжектором смеси газов, также для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления. I. фиг.

RU 202 898 U1

Полезная модель относится к области обработки металлов резанием и предназначена для осуществления подачи смазывающих технологических сред растительного и животного происхождения в виде аэрозоля, а также поливом, свободно падающей струей и струей под давлением, в зависимости от требований к технологической операции.

Известен струйный аппарат для проведения процессов в жидких и газообразных средах (А.с. СССР №265075, МПК В05G, опубл. 09.03.1970 г., Бюл. №10 Аналог), в котором возможна регулировка подачи смазки путем увеличения или уменьшения камеры смешения перемещением диффузора относительно сопла при помощи шарикового механизма.

Областью применения аппарата является химическое машиностроение.

Недостатками такого устройства является невозможность применения технологических сред находящихся в твердом агрегатном состоянии.

Известна конструкция форсунки для распыления вязких жидкостей (А.с. СССР №417121, МПК В05b 7/12, опубл. 25.05.1975 г., Бюл. №19 Аналог), позволяющая регулировать подачу смазки установкой трубки на форсунке, соединяющей трубки подвода смазки и воздуха. При смешивании нагретого воздуха с расплавленным смазочным материалом образуется воздушно-капельная смесь, которая в полном объеме транспортируется через нагретую гибкую теплоизолированную форсунку на рабочую поверхность.

Недостатками аналога является отсутствие возможности регулирования температуры нагрева материала, необходимость использования нестандартных комплектующих для создания установки и большие габариты конструкции.

Известна форсунка для нанесения покрытия из агрессивных жидкостей (патент РФ №2008980 С1, МПК⁵ В05В 7/12, опубл. 15.03.1994 г., Бюл. №9. Аналог), в которой узел регулировки кольцевого зазора выполнен в виде гайки и контргайки, размещенных на продуктовой трубке, установленной с возможностью осевого перемещения относительно внутреннего конуса, при этом накидная гайка соединена с наружной поверхностью внутреннего конуса, охватывающая продуктовую трубку, поверхность которого выполнена с проточкой канавки и фиксатором. Взаимодействие потоков закрученного воздуха и жидкой фазы приводит к дроблению жидкости на капли и образованию воздушно-жидкостного факела кольцевого типа.

Недостатком аналога является низкий диапазон регулирования параметров распыляемого факела, а также сложность используемой конструкции.

Известен распылитель (патент РФ №2329873 С2, МПК⁷ В05В 7/00, В05В 7/28, опубл. 27.07.2008 г., Бюл. №7. Аналог), в котором изменение кольцевого зазора за счет осевого перемещения патрубков, соосно расположенного в корпусе, определяет параметры распыляемого газоканельного потока.

Недостатком известного аналога является малый диапазон регулирования газоканельного потока.

Известно устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (А.с. СССР №874320, МПК³, В24В 55/02 // В23Q 11/10, опубл. 23.10.1981 г., Бюл. №39 Аналог), обеспечивающее возможность использования в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) высоковязких масел и смазок. Принцип работы устройства заключается в том, что, с целью обеспечения возможности использования в качестве СОЖ высоковязких масел и смазок, устройство снабжено нагревательным элементом, размещенным внутри сопла.

RU 202 898 U1

Недостатками известного устройства являются малая универсальность и сложность регулировки расхода СОЖ, которая производится при помощи увеличения диаметра и числа выходных отверстий, что создает дополнительные трудности связанные с изготовлением и заменой сопла-дозатора, также отсутствует возможность в широком диапазоне регулировать способ подачи СОЖ, например в виде аэрозоля, эффективность использования которого связана с снижением расхода и высокой проникающей способностью.

Известно устройство для подачи смазывающих технологических сред (СТС) (патент на полезную модель РФ №197266 МПК В23Q 11/10, опубл. 16.04.2020. Бюл. №11. Прототип), предназначенное для осуществления подачи смазывающих технологических сред растительного и животного происхождения в виде аэрозоля, а также поливом, свободно падающей струей и струей под давлением, в зависимости от требований к технологической операции.

Недостатком такого устройства является отсутствие возможности производить барботирование смазывающих технологических сред (СТС).

Техническим результатом полезной модели является возможность подавать СТС растительного и животного происхождения в зону резания в виде аэрозоля, поливом, свободно падающей струей, а также струей под давлением, расширяя тем самым область использования растительных масел и животных жиров в механообрабатывающей промышленности. Простота конструкции и универсальность замены отдельных узлов обуславливает надежность и относительную дешевизну изготовления устройства, а для возможности осуществления барботирования СТС, предусмотрены специальные сопла, которые расположены в тигле. Устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним видом газа так и сочетанием газов, благодаря наличию двух отдельных каналов для подачи сжатого газа, соединенных с инжектором смеси газов. Для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления.

Устройство для подачи смазывающих технологических сред (СТС) в зону резания при лезвийной обработке, содержащее сопло для подачи СТС в зону резания и канал для подачи СТС в сопло, при этом канал оснащен установленными вдоль него теплоэлектронагревателями, также устройство снабжено соединенным с каналом для подачи СТС и расположенным в корпусе с огнеупорным теплоизолирующим материалом тиглем для размещения СТС, закрытым крышкой с прокладкой и фиксирующими винтами, на внешней стороне которого установлены теплоэлектронагреватели, каналом для подачи сжатого газа, соединенным с соплом, выполненным с возможностью смешивания сжатого газа с нагретой СТС с образованием аэрозоля, при этом в тигле установлена термopapa, связанная с терморегулятором, включенным через выключатель в цепь питания теплоэлектронагревателей, а в каналах для подачи сжатого газа и СТС установлены винты для регулировки соответственно подачи сжатого газа и подачи СТС, при этом, для возможности осуществления барботирования СТС, предусмотрены специальные сопла, расположенные в тигле устройства и соединенные с инжектором смеси газов, что позволяет осуществлять барботирование СТС как одним видом газа так и сочетанием газов, при этом, для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления.

Отличием данного технического решения от прототипа является тот факт, что для возможности осуществления барботирования СТС, предусмотрены специальные сопла, которые расположены в тигле. Устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним видом газа так и сочетанием газов, благодаря наличию двух отдельных

RU 202 898 U1

каналов, соединенных с инжектором смеси газов. Для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления.

Полезная модель представлена на чертеже:

фиг. 1 - конструктивная схема устройства для подачи смазывающих технологических сред.

Устройство для подачи смазывающих технологических сред содержит выключатель 1, терморегулятор 2, каналы для подачи сжатого газа 3, 16, 22, винты для регулировки подачи сжатого газа 4, 18, 19, сопло 5, канал для подачи СТС 6, винт для регулировки подачи СТС 7, теплоэлектронагреватели 8, тигель 9, огнеупорный теплоизолирующий материал 10, защитный корпус 11, термопару терморегулятора 12, крышку 13, прокладку 14, фиксирующие винты 15, манометры 17, 21, 25, инжектор смеси газов 20, клапан избыточного давления 23, сопла для барботирования СТС 24.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Тигель 9 с СТС, при помощи крышки 13, прокладки 14 и фиксирующих винтов 15, герметично закрывается, затем подается питание на теплоэлектронагреватели 8, при помощи выключателя 1 и производится нагрев канала для подачи СТС 6, и тигля 9 с СТС. Температура нагрева СТС в тигле 9 контролируется при помощи терморегулятора 2, термопара 12 которого, установлена на крышке 13, и погружена в нагретую СТС. На шкале терморегулятора 2, фиксируется необходимая температура нагрева СТС, при достижении которой, система автоматически выключит питание на теплоэлектронагреватели 8. Расплавленная СТС, через канал для подачи СТС 6, поступает в сопло 5, далее через канал для подачи сжатого газа 3 подается сжатый газ, в результате чего происходит смешивание СТС и сжатого газа в сопле 5 устройства, образуя аэрозоль. При помощи винтов для регулировки подачи сжатого газа 4, 18, 19, манометров 17, 21, 25, и винта для регулировки подачи СТС 7, обеспечиваются необходимые параметры аэрозоли. Для подачи СТС свободно падающей струей блокируется подача сжатого газа при помощи винтов для регулировки подачи сжатого газа 4, 18, 19. Для подачи СТС струей под давлением, через канал для подачи сжатого газа 16, в тигель 9 подается сжатый газ, который вытесняет СТС. Расход СТС регулируется при помощи винта для регулировки подачи СТС 7.

Для снижения тепловых потерь нагретой СТС, на внешней части тигля 9 расположен огнеупорный теплоизолирующий материал 10, защищенный от внешнего механического воздействия металлическим защитным корпусом 11.

Для возможности осуществления барботирования СТС, предусмотрены специальные сопла для барботирования СТС 24, которые расположены в тигле 9. Устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним видом газа, так и сочетанием газов, благодаря наличию двух отдельных каналов для подачи сжатого газа 22, соединенных с инжектором смеси газов 20. Для контроля давления газа в тигле 9, устройство снабжено винтами для регулировки подачи сжатого газа 18 и манометрами 17, также на крышке тигля 13 установлен клапан избыточного давления 23.

Устройство работает следующим образом: в тигель погружается СТС затем закрывается крышкой. Герметичность установки крышки обеспечивается благодаря наличию прокладки и фиксирующих винтов. При помощи выключателя подается питание на теплоэлектронагреватели и производится нагрев тигля с СТС и каналов для подачи СТС. Температура нагрева СТС контролируется при помощи терморегулятора, термопара которого расположена на крышке тигля, погруженная в объем расплавленной СТС. В момент достижения необходимой температуры, при помощи терморегулятора автоматически отключается питание на

RU 202 898 U1

теплоэлектронагреватели, до тех пор, пока температура расплавленной СТС не опустится ниже фиксированного значения, затем питание на теплоэлектронагреватели подается вновь. Подача СТС производится при помощи винта для регулировки подачи СТС. Также по каналу для подачи сжатого газа подается сжатый газ, который

5 смешивается с расплавленной СТС в сопле устройства образуя аэрозоль, которая в свою очередь регулируется при помощи винтов для подачи сжатого газа, винта для регулировки СТС а также манометров. Для подачи СТС свободно падающей струей блокируется подача сжатого газа при помощи винтов для регулировки подачи сжатого газа. Для подачи СТС струей под давлением, по каналу для подачи сжатого газа, в

10 тигель подается сжатый газ, который путем вытеснения нагретой СТС, обеспечивает транспортировку расплавленной СТС по каналам для подачи СТС в сопло. Расход СТС контролируется при помощи винта для регулировки подачи СТС. Для снижения тепловых потерь нагретой СТС на внешней части тигля расположен огнеупорный теплоизолирующий материал, защищенный от внешнего механического воздействия

15 металлическим защитным корпусом. Также устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним газом так и сочетанием газов, благодаря наличию сопел для барботирования СТС в тигле, и двух отдельных каналов, соединенных с инжектором смеси газов. Для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления.

20

(57) Формула полезной модели

Устройство для подачи смазывающих технологических сред (СТС) в зону резания при лезвийной обработке, содержащее сопло для подачи СТС в зону резания и канал для подачи СТС в сопло, при этом канал оснащен установленными вдоль него

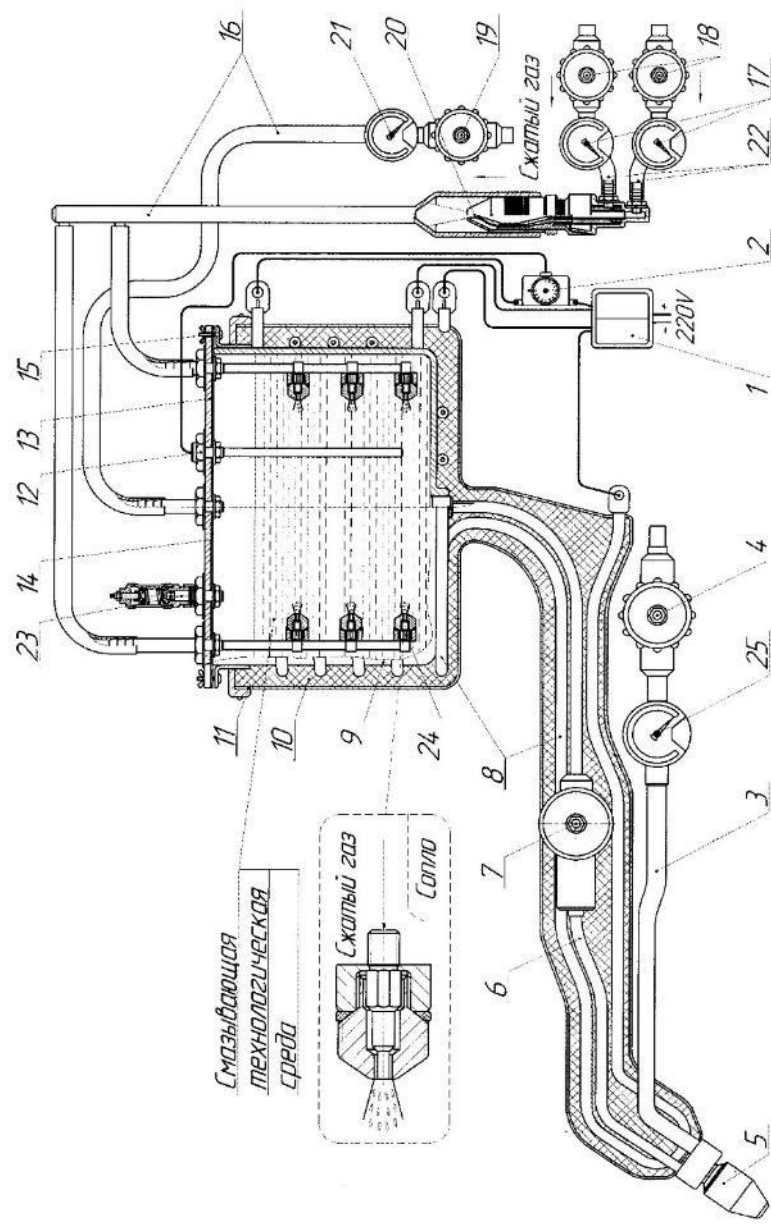
25 теплоэлектронагревателями, также устройство снабжено соединенным с каналом для подачи СТС и расположенным в корпусе с огнеупорным теплоизолирующим материалом тиглем для размещения СТС, закрытым крышкой с прокладкой и фиксирующими винтами, на внешней стороне которого установлены

30 теплоэлектронагреватели, каналом для подачи сжатого газа, соединенным с соплом, выполненным с возможностью смешивания сжатого газа с нагретой СТС с образованием аэрозоли, при этом в тигле установлена термopapa, связанная с терморегулятором, включенным через выключатель в цепь питания теплоэлектронагревателей, а в каналах для подачи сжатого газа и СТС установлены винты для регулировки соответственно

35 подачи сжатого газа и подачи СТС, отличающееся тем, что устройство позволяет осуществлять барботирование СТС как одним газом так и сочетанием газов, благодаря наличию сопел для барботирования СТС, находящихся в тигле, и двух отдельных каналов, соединенных с инжектором смеси газов, также для контроля давления газа в тигле на крышке тигля установлен клапан избыточного давления.

40

45



Фиг. 1

Приложение В.1

Акт внедрения в ФГБУН «НИИСХ Крыма».

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН «НИИСХ Крыма»

Паштецкий В.С.

20 01 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Умерова Эрвина Джаватовича

Комиссия под председательством заведующего отделом механизации и производства новых образцов техники ФГБУН «НИИСХ Крыма» Соболевского Ивана Витальевича составила настоящий акт в том, что сотрудником кафедры «Автомобильный транспорт» ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» Умеровым Э.Д. проведено внедрение в производство методики сверления отверстий с учетом изменения геометрии режущих кромок инструмента за период стойкости сверла.

В процессе обработки все полученные детали, с применением предложенных циклов сверления, позволило получить высокую точность и качество обработки на операциях сверления, соответствующих требованиям технологической документации.

В результате процесса сверления спиральными сверлами с материалом заготовки применив предложенный авторами цикл обработки позволяет достичь меньшего значения фактического износа инструмента по сравнению с постоянными режимами обработки, и получены следующие результаты:

- повышение точности обработанных отверстий, ведущее к снижению брака изделий на 2,5-3%;
- повышение стойкости режущего инструмента в 1,5 раза и снижение затрат времени на изготовление деталей в среднем на 5%;
- повышение производительности процесса сверления в среднем на 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика обработки отверстий позволяет получить изделия с необходимыми параметрами качества.

Предложенный цикл обработки на операциях сверления спиральными сверлами, учитывающая износ режущих кромок, позволяет получить изделия с необходимыми параметрами качества и меньшей вероятности возникновения брака.

Использование результатов диссертационного исследования авторов позволяет повысить производительность технологического процесса сверления в условиях ФГБУН «НИИСХ Крыма», сократить затраты на изготовление новых деталей, а также снизить себестоимость выпускаемой продукции предприятия.

Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения в условиях производства составляет 127 500 рублей.

Настоящий акт не является основанием для предъявления взаимных финансовых претензий.

Заведующий отделом
механизации производства и
разработки новых образцов техники

Соболевский И.В.

Приложение В.2

Акт внедрения в производство АО «Пневматика»

«УТВЕРЖДАЮ»


 Технический директор
АО «Пневматика»

Кирилов В.И.

« 27 » апреля 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Умерова Эрвина Джеватовича

«Повышение производительности процесса сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T спиральными сверлами из быстрорежущих сталей»

Комиссия под председательством главного технолога Петрова А.Г. составила настоящий акт в том, что сотрудником кафедры «Автомобильный транспорт» ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» Умеровым Э.Д. проведено внедрение в производство способа управления операцией сверления, учитывающие упругие деформации режущего инструмента с материалом заготовки.

Разработанный цикл обработки отверстий с подачей масляной СОТС с наноглинистыми минералами используется в технологическом процессе изготовления гидроцилиндров, в условиях основного производства предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование результатов диссертационной работы позволяет получить изделия с необходимыми параметрами точности отверстий, повысить производительность технологического процесса в условиях АО «Пневматика», сократить затраты на изготовление, а также снизить себестоимость выпускаемой продукции предприятия.

Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 115 000 руб.

Настоящий акт не является основанием для предъявления взаимных финансовых претензий.

Главный технолог
АО «Пневматика»


 Петров А.Г.

Акт внедрения в учебный процесс

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной и инновационной
деятельности ГБОУВО РК КИПУ
имени Февзи Якубова
д-р пед. наук, проф. Гордиенко Т.П.



« 30 » 06 20 21 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационного исследования Умерова Эрвина Джеватовича

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования старшего преподавателя кафедры автомобильного транспорта Умерова Эрвина Джеватовича по теме «Повышение производительности процесса сверления отверстий в деталях из стали 12X18H10T спиральными сверлами из быстрорежущих сталей» в учебном процессе при реализации программ бакалавриата и магистратуры на кафедрах «Технология машиностроения» и «Автомобильный транспорт» инженерно-технологического факультета ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова.

Результаты исследований, изложенные в диссертации, имеют научное и практическое значение, и используются в учебном процессе при проведении практических занятий и лабораторных работ при изучении дисциплин «Теория резания», «Процессы и операции формообразования» и «Основы ремонта автомобилей и навесного оборудования», а также написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров.

Выводы и рекомендации диссертационного исследования способствуют повышению качества подготовки обучающихся и используются при реализации Основной профессиональной образовательной программы высшего образования по направлениям подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств и 44.03.04 (по отраслям) профиль «Машиностроение и материалобработка».

Начальник учебно-методического
управления, канд. пед. наук, доц.

Марковская О.Е.

Заведующий кафедрой автомобильного
транспорта, д-р техн. наук, проф.

Абдулгазис У.А.

Заведующий кафедрой технологии
машиностроения, канд. техн. наук, доц.

Джемилов Э.Ш.