РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«КРЫМСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ВАНИЕВ ЭЛЬДАР РУСТЕМОВИЧ

УДК 621.91.01:621.914

УПРОЧНЯЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ СОТС ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Специальность 05.03.01 – Процессы механической обработки,
станки и инструменты

Диссертация
на соискание научной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Якубов Чингиз Февзиевич

Симферополь – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Интенсификация процесса резания является одной из важнейших проблем машиностроения, решение которой связано с повышением работоспособности инструмента, в частности его стойкости.

Острота проблемы интенсификации процесса резания усиливается при обработке труднообрабатываемых материалов, к которым относятся стали аустенитного класса, которые широко используются во многих отраслях промышленности.

Одним из эффективных и наиболее доступных способов повышения работоспособности инструмента является применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Этому вопросу посвящены работы многих исследователей, а именно П.А. Ребиндера, Н.Н. Зорева, В.Н. Латышева, М.И. Клушина, В.Н. Подураева, Л.В. Худобина, Р.Н. Ошера, Е.Г. Бердичевского, С.Г. Энтелиса, М.Б. Гордона, В.В. Подгоркова, Ф.П. Боудена, Д. Тейбора и др.

Исследованиями школы проф. Якубова Ф.Я. установлено, что использование СОТС в условиях непрерывного резания значительно усиливает эффект упрочнения резанием контактных с обрабатываемым материалом поверхностей быстрорежущего инструмента.

Особую роль этот способ повышения интенсивности процесса резания приобретает в автоматизированном производстве, когда упрочнение инструмента резанием при приработке на менее жестких режимах в сравнении с нормативными представляет собой одно целое.

Следует отметить, что большой процент деталей из сталей аустенитного класса изготавливаются способами прерывистого резания, к которым относится и фрезерование. Вместе с тем возможности повышения работоспособности инструмента за счет упрочняющего действия СОТС при прерывистом резании достаточно не исследовалась.

Поэтому исследования, направленные на повышение работоспособности инструмента при прерывистом резании, в частности при фрезеровании сталей аустенитного класса, на основе установления упрочняющего действия различных СОТС и определения их эффективного использования являются актуальной проблемой дальнейшего развития теории резания и имеет большое практическое значение для современного производства.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Выполнение диссертационной работы связано с перспективным планом научно-исследовательских работ кафедры «Технология машиностроения» Республиканского высшего учебного заведения «Крымский инженерно-педагогический университет» в рамках темы ДР № 0109U001098 «Разработка ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий механической обработки материалов» (2009 – 2014 г.г.).

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса за счет упрочняющего действия СОТС и определения их эффективного использования на основе моделирования влияния условий процесса упрочняющей приработки на процесс фрезерования.

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

1. Провести анализ состояния проблемы использования СОТС при обработке сталей аустенитного класса.

2. Проанализировать особенности воздействия (эффекты) СОТС при резании и способы ее подачи.

3. Разработать методику исследований на основе моделирования процесса фрезерования с учетом взаимовлияния действий СОТС с другими параметрами процесса и методику экспериментальных исследований.

4. Обосновать метод моделирования обеспечивающий взаимосвязь условий приработки и эксплуатационных режимов фрезерования при использовании различных СОТС.

5. На основе экспериментальных данных разработать модели, определяющие влияние действия СОТС во взаимосвязи с другими условиями на стойкость инструмента после приработки, а также модели в виде зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимов резания.

6. Определить влияние режимов резания на эксплуатационную стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности с использованием различных СОТС.

7. Проанализировать механизм влияния СОТС на контактные процессы, обеспечивающие упрочнение поверхностей инструмента.

8. Провести лабораторно - промышленную проверку и внедрение результатов исследований.

9. Разработать рекомендации по выбору режимов упрочняющей приработки инструмента и эффективному использованию различных СОТС, обеспечивающие повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса.

Объект исследования – процесс фрезерования сталей аустенитного класса в различных технологических средах с использованием технологии минимального смазывания (ТМС).

Предмет исследования – влияние различных технологических сред и взаимообусловленное влияние режимов резания на образование упрочненных слоев на поверхностях инструмента во время приработки, а также их влияние на стойкость приработанного инструмента при дальнейшей его эксплуатации.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены с использованием основных положений теории резания, упрочняющего действия СОТС при обработке металлов резанием и основ статистической обработки экспериментальных данных на основе моделирования исследуемых процессов. Построение моделей исследуемых процессов на основе экспериментальных данных осуществлялось на основе использования одного из алгоритмов метода группового учета аргументов (МГУА). При формировании экспериментальных данных для построения моделей и экспериментальной проверки результатов исследований использовались стандартные методики.

Исследования проводились с использованием компьютерных комплексов измерений усилий резания и шероховатости обработанной поверхности. Адгезионная составляющая коэффициента трения μ_a определялся по методике и на оборудовании кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты «СумГУ».

Использовались методы микроструктурного исследования состояния упрочненных контактных слоев приработанного инструмента.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современной измерительной техники.

Научная новизна полученных результатов. Впервые с использованием – упрощенного алгоритма МГУА на основе экспериментальных данных получены модели, основных характеристик приработки, стойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности, на основании которых определены условия образования упрочненных вторичных структур на контактных поверхностях инструмента и условия повышения работоспособности инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса типа 12Х18Н10Т в среде различных СОТС с использованием технологии минимального смазывания.

1. Впервые экспериментально выявлено, что при фрезеровании сталей аустенитного класса 12Х18Н10Т степень упрочнения контактных поверхностей инструмента, которая определяется критерием приработки $h_{зпр}$ (фаской износа на задней поверхности) сопровождается уменьшением составляющих силы резания при приработке и для определенного вида СОТС зависит от режимов приработки, а $h_{зпр}$ независимо от режимов приработки для каждой из используемых сред имеет постоянное значение.

2. На основе моделирования и экспериментального подтверждения влияние условий приработки и режимов резания на стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности установлено, что:

– независимо от среды наибольшее повышение стойкости достигается при наименьших, значениях подачи и глубины резания;

– при фрезеровании сталей типа 12Х18Н10Т значение скорости приработки для обеспечения наибольшей стойкости зависит от используемой среды;

– эффективность использования исследуемых технологических сред, при фрезеровании сталей типа 12Х18Н10Т различна и определяется режимами резания.

3. Впервые установлено, что в процессе приработки и эксплуатации инструмента в среде касторового масла наблюдается образование на контактных поверхностях композиционных контактных слоев, состоящих из верхних разрыхленных и, лежащих под ними плотных пассивированых, повышенной твердости.

Практическая ценность полученных результатов. Установлены условия эффективного использования различных технологических сред (сухая обработка, МР-99, И-20А, рапсового и касторового масел) для повышения работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса.

Разработаны рекомендации по выбору режимам приработки инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса в присутствии различных СОТС и установлена область их эффективного использования в зависимости от режимов эксплуатации.

На ЧАО «Пневматика» проведены производственные испытания результатов исследования в соответствии с рекомендациями. По результатам испытаний рекомендации приняты к использованию.

Результаты работы используются при чтении курсов «Теория резания материалов» и «Технология машиностроения», а также при выполнении лабораторных работ по этим курсам, при выполнении курсовых, дипломных проектов, и магистерских работ.

Личный вклад соискателя. Основная часть идей, теоретических и экспериментальных исследований принадлежат автору лично.

Автором самостоятельно проведен анализ литературных источников по исследуемой теме, обоснован выбор методов исследований, а также самостоятельно проведена подготовка к исследованиям измерительной аппаратуры, смонтирован стенд для проведения экспериментов, контрольных опытов и лабораторной проверки результатов исследований. Эксперименты для построения моделей, синтеза моделей, контрольные опыты, экспериментальная проверка результатов исследований выполнены самостоятельно по методике и с использованием программ НТУУ «КПИ».

Определение адгезионной составляющей коэффициента трения проведено на кафедре технологии машиностроения, станки и инструменты «СумГУ» по методикам и на оборудовании этого университета в соавторстве. Микроструктурные исследования проведены автором на оборудовании НТУУ «КПИ».

Обсуждение результатов исследований проводилось совместно с научным руководителем и частично с соавторами публикаций.

Формирование цели, постановка задач исследований, обработка, обобщение полученных результатов, основных положений работы, структуры, содержания и выводы выполнены вместе с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 6-ти научных конференциях:

– 4, 6, 10 и 12 всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «МАШИНОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ ОЧИМА МОЛОДИХ: прогресивні ідеї - наука - виробництво», (Київ: НТУУ «КПІ», 2004; Хмельницький: ХНУ, 2006; Суми: СумДУ, 2010; Київ: НТУУ «КПІ», 2012);

– 1-я международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», (Варна, Болгария, 2005);

– XV міжнародної науково-технічної конференції «ПРОГРЕСИВНА ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ІНЖЕНЕРНА ОСВІТА», (Київ, НТУУ «КПІ», 23 – 27 червня 2014 р.).

Диссертационная работа обсуждена и одобрена на заседании кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета (протокол №5 от 12 декабря 2013 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 13 статей, в ведущих специализированных изданиях из списка ВАК Украины, в т.ч. 1 статья в издании, входящем в наукометрические базы, 6 публикаций и тезисов докладов на научных конференциях, 1 декларационный патент Украины.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, основных выводов и списка использованных литературных источников и приложений. Работа изложена на 169 страницах машинного текста, в том числе содержит 52 рисунков, 8 таблиц, список использованных источников из 109 наименований и 5 приложений на 14 страницах.

РАЗДЕЛ 1
ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОТС ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

1.1. Общие положения и воздействия СОТС на процесс резания

Применение технологических сред в механической обработке – одно из направлений повышения работоспособности инструмента при резании различных материалов. Все виды СОТС, несмотря на конкретные области их применения, должны удовлетворять высоким эксплуатационным и экологическим требованиям [1-7].

Целью применения СОТС при резании, является, снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента, улучшение качества обработанной поверхности и повышение производительности труда. Достижение этой цели осуществляется комплексным воздействием физико-химических эффектов, сопровождающих действие СОТС, которое складывается из многих параллельно-протекающих процессов, сосредоточенных на контактных поверхностях инструмента в зоне стружкообразования.

Исследования области использования технологических сред для интенсификации процесса резания, изучение механизма их действия на процесс и создание новых более эффективных СОТС рассмотрены в работах В.Н. Латышева, М.И. Клушина, П.А. Ребиндера, В.Н. Подураева, Л.В. Худобина, А.С. Верещаки, Е.Г. Бердычевского, М.Б. Гордона, Ф. Боудена, Д. Тейбора и др.

Влияние СОТС на процесс резания в основном определяется свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, природой и способом подачи смазочно-охлаждающей технологической среды, режимами резания, видом обработки, конструктивными и геометрическими параметрами инструмента [8-15]. В этой связи для снижения интенсивности изнашивания инструмента из быстрорежущей стали, улучшения качества обрабатываемой поверхности и повышения производительности обработки при фрезеровании сталей аустенитного класса возникает задача анализа воздействий СОТС на процесс резания (рис. 1.1).

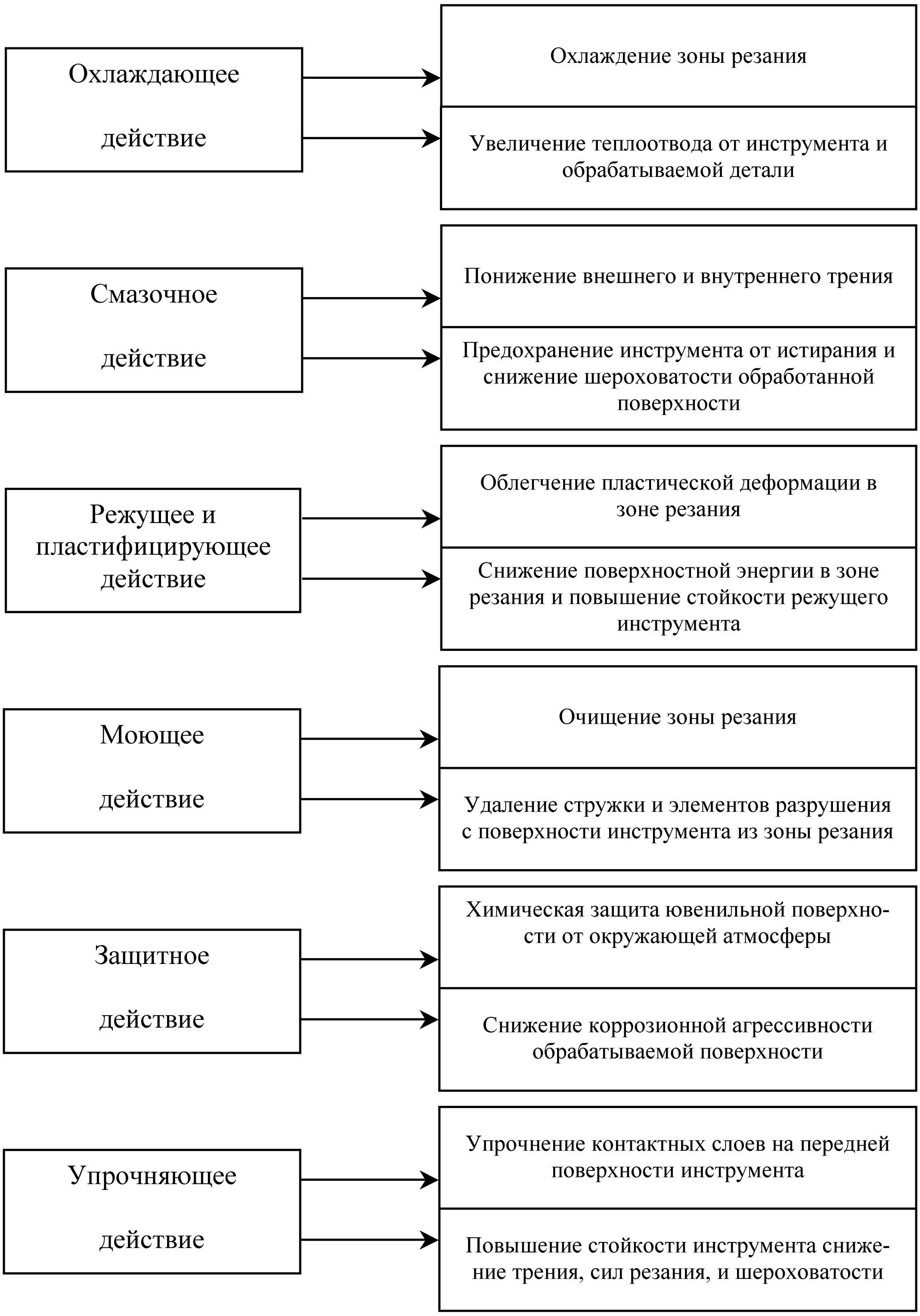


Рис. 1.1. Схема действия смазочно-охлаждающих технологических средств.

1.1.1. Охлаждающее действие СОТС. Во всех работах, исследующих действия СОТС на процесс резания, отмечается, что в результате охлаждающего эффекта изменяется температурное поле инструмента, заготовки, стружки, что влияет на период стойкости инструмента, точность обработки, шероховатость и остаточные напряжения в поверхностном слое инструмента и стружки, форму стружки. При лезвийной обработке это наблюдается, когда скорость резания менее 150 м/мин. При более высоких скоростях температура обрабатываемой заготовки стабилизируется [1].

Также многими исследователями, отмечается [1-3], что снижение температуры резания в случае применения СОТС обеспечивается за счет активного теплоотвода с незанятых стружкой рабочих поверхностей инструмента. Учитывая взаимосвязь температуры резания и периода стойкости, делается вывод, что можно прогнозировать положительное влияние охлаждения инструмента при прерывистом резании за счет колебаний температуры. Однако в результате этого процесса может разупрочняться режущая часть инструмента при прерывистом резании.

В результате колебаний температуры образовываются растягивающие напряжения в поверхностном слое, могут увеличиваться силы резания. Кроме того, при определенных режимах резания может возрастать износ инструмента из-за смещения экстремума интенсивности изнашивания в зону более высоких скоростей резания. В целом оценивая охлаждающий эффект СОТС многие, исследователи утверждают, что с увеличением толщины среза и скорости резания этот эффект уменьшается [1, 4].

Однако вывод о разупрочнении режущей части быстрорежущего инструмента за счет колебаний температуры входит в некоторое противоречие с положениями, принятыми в теории проектирования режущего инструмента при выборе инструментального материала для заданных условий обработки [16-18] и с особенностями технологии термической обработки быстрорежущих сталей [19-21]. Так, в общем случае рекомендуемые режимы обработки быстрорежущими инструментами по скоростям резания не превышают 50 –

60 м/мин [17], что значительно меньше скорости резания, указанных в работе [1] более 150 м/мин.

В зависимости от марки быстрорежущей стали и размеров инструмента при температурах закалки в диапазоне 1210 – 1280 °С в масло и многократном отпуске при температуре 560 – 570 °С (3-х кратный) по часу, теплостойкость быстрорежущих сталей превышает 600 °С. Многократный отпуск не меняя теплостойкости, повышает механическую прочность инструмента за счет уменьшения напряжений, образовавшихся при превращении остаточного аустенита в мартенсит. В тоже время низкий (до 400 °С) и высокий (свыше 600°С) отпуск приводит к понижению твердости быстрорежущей стали.

Именно, из характеристик теплостойкости быстрорежущей стали и выбирают режимы резания. Таким образом, наблюдаемое разупрочнение инструмента [1-3] из быстрорежущей стали при прерывистом резании может быть объяснено низкотемпературным отпуском, который может происходить в процессе резания при неправильном подборе режимов резания и технологической среды. Поэтому этот вопрос требует дальнейших исследований.

1.1.2. Смазочное действие СОТС. Смазочное действие СОТС осуществляется за счет уменьшения реакционной способности, образующихся в процессе резания химически чистых поверхностей прирезцовой части стружки и контактных поверхностей инструментального материала при возникновении на них физических и химических (хемосорбционных) смазочных пленок. В результате чего уменьшается схватывание, фрикционный нагрев и силы трения при перемещении стружки и обрабатываемого материала по передней и задней поверхностям инструмента. Вместе с тем в работе [1-3, 22-24] указывается на неоднозначность влияния смазочных эффектов на параметры процесса резания и изнашивания инструмента. Это объясняется тем, что явления, связанные со смазочным действием, протекают в условиях дискретного контакта [15]. Этим и объясняются имеющиеся отличные друг от друга теории [25-29].

Известно, что уменьшение сил адгезии уменьшает размеры и устойчивость нароста, что благоприятно сказывается на шероховатости обработанной поверхности. Однако чрезмерное уменьшение нароста может снизить его защитную роль, особенно при обработке быстрорежущим инструментом. В связи с этим для быстрорежущего инструмента наиболее эффективными является СОТС с умеренной смазочной активностью, которые не ослабляют в значительной мере защитное действие нароста.

В работе [15] отмечается, что роль СОТС в протекании процессов резания существенна и сложна. С одной стороны, за счет смазочного и охлаждающего действия она снижает уровень энергии, развиваемой процессом, с другой – путем создания высоких градиентов температур стимулирует подобно закалочной среде структурные превращения, с третьей – способствуя образованию вторичных соединений, снижает интенсивность адгезионных и диффузионных процессов на контактных поверхностях. Второй и третий пути зависят от первого и в общем случае могут протекать параллельно, проявляться одновременно на контактных поверхностях инструмента и срезаемого слоя, обнаруживать как избирательное действие, так и синергизм. Это меняет механизм износа, и СОТС эффективная в одних условиях, оказывается неэффективной в других. Во всех случаях смазывающее действие технологических сред снижает интенсивность трения и износа. Поэтому эффективность смазочного действия может быть повышена за счет правильного выбора СОТС с учетом факторов, определяющих процесс резания.

Подбор состава смазок для снижения интенсивности трения при резании имеет свои специфические особенности. В работах [4, 29] отмечается, что антифрикционные свойства СОЖ не имеют большого значения в вопросах трения, происходящих при резании металлов. Значительно большую роль играет их экранирующее действие, т.е. способность слоя смазки удерживаются на контактных поверхностях при действии высоких давлений и температур. С этой точки зрения СОТС на масложировой основе более эффективны, чем на минеральной.

Этот вывод позволяет предположить перспективность исследований по установлению особенностей влияния масел растительной природы на контактные процессы с целью решения экологических проблем, возникающих при использовании СОТС на основе минеральных масел.

1.1.3. Режущие и пластифицирующие действия СОТС. Согласно [1] под режущими свойствами СОТС понимают ее способность облегчать разрыв связей в обрабатываемом материале при внедрении инструмента, что способствует повышению стойкости инструмента и облегчению процесса резания. Пластифицирующее действие СОТС заключается в облегчении пластического деформирования металлов за счет локализации деформации в тонких поверхностных слоях. Эти слои выполняют роль смазочного материала и препятствуют налипанию обрабатываемого материала на инструмент, уменьшают трение на контактных площадках и силу резания.

В работе [2] режущее и пластифицирующее действие рассматривается как разрушающее (пластифицирующее). Это действие вызывается совокупностью физических явлений, одним из которых является эффект П.А. Ребиндера [8], физический смысл которого заключается в понижении прочности твердых тел в адсорбционно-активной среде вследствие физических и химических взаимодействий в поверхностном слое.

Снижение прочности следует ожидать тогда, когда свободная энергия поверхностного взаимодействия будет сравнима с поверхностной энергией твердого тела, то есть снижение прочности будет тем большим, чем сильнее будет уменьшена поверхностная энергия. Для большинства материалов, достаточно, чтобы свободная энергия поверхностного взаимодействия составила 50 кДж/моль [2]. Если внешняя среда, которая вводиться в зону обработки обеспечивает относительно слабое уменьшение поверхностной энергии, что имеет место при физической адсорбции, то достигается пластифицирующий эффект. Размельченный и разрыхленный слой, исполняет роль дополнительной смазки. Это приводит к уменьшению трения на контактных поверхностях, снижению, что позволяет улучшить качество поверхности.

По данным работы [2] максимальное значение поверхностной энергии при физической адсорбции не превышает 10%. Поэтому в обычных условиях повышение стойкости инструмента осуществляется как вследствие проявления эффекта Ребиндера, так и в результате улучшения смазывающих свойств инструмента. Для облегчения процесса резания выгоднее хемосорбция, так как ее энергия взаимодействия значительно больше, чем при физической. Этим объясняется и эффективность некоторых органических жидкостей, широко используемых при обработке металлов.

Следует отметить, что у современных СОТС разрушающее (пластифицирующее) и смазывающее действие обеспечиваются одновременно. Для обеспечения механизма действия хемосорбции в современных СОТС обязательным компонентом является органические кислоты, спирты, серо- хлор- йод- и фосфорсодержащие соединения и др., которые при высоких температурах в процессе резания разлагаясь, загрязняют окружающую среду и отрицательно действуют на организм человека, на что указывают многочисленные исследования и разработки по использованию СОТС при механической обработке [29-38]. Поэтому одним из направлений, снижающих вредное действие как на человека, так экологию существующих СОТС является расширение исследований по применению СОТС на растительной основе. Безусловно, эффективность этих исследований и применение самих СОТС на растительной основе значительно может быть повышена за счет установления их взаимосвязи с условиями, в которых используется СОТС.

1.1.4. Моющее действие СОТС. Моющее действие СОТС определяется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента в зоне резания от шлама содержащего металла, инструментального материала, которые удерживаются на поверхности твердых тел электростатическими, электромагнитными и механическими силами.

Моющий эффект имеет первостепенное значение при обработке резанием материалов, которые образовывают мелкие стружки (чугун, пластмасса и т.п.), а также на операциях, где удаление стружки затрудненно. Эффективность моющего действия СОТС зависит от способности его поверхностно активных элементов адсорбироваться и уменьшать поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело – жидкость.

Образующиеся при этом пленки уменьшают адгезию шлама к поверхности инструмента и детали. К поверхностно-активным веществам, обладающим моющим действиям, относятся сульфаты, сульфоналы, мыла, жирные спирты и др. [1-4]. Повышение моющего действия СОТС можно обеспечить за счет увеличения скорости потока и расхода жидкости, подаваемой в зону резания в единицу времени, что связано с выбором того или иного способа подачи СОТС в зону резания. Так как вещества, повышающие моющий эффект СОТС относятся к веществам, оказывающим вредное воздействие на экологию и человека, то при замене СОТС на экологически чистые и безопасные вопросы выбора способа подачи СОТС в зону резания для различных операций механообработки приобретают особое значение.

1.1.5. Защитное действие СОТС. Защитное действие СОТС связано с химической защитой ювенильной поверхности, что образуется в процессе резания от вредного влияния атмосферы воздуха, который снижает прочность и эксплуатационные характеристики детали [2]. По склонности к коррозии материалы очень широко отличаются друг от друга и это отличие, и определяет способ антикоррозионной защиты.

В ряде случаев присадки, которые используют для улучшения смазочных свойств, используют одновременно и функции ингибиторов коррозии. Хорошими антикоррозионными свойствами и биологической стойкостью против микроорганизмов, способных съедать до 30% углеводных компонентов эмульсии и тем самым повышать ее коррозионную агрессивность владеют полимерные СОТС, у которых как ингибиторы коррозии используются 0,5% фосфаты, нитраты, хроматы и добавки эмульсолов [2].

Следует отметить, что при использовании в качестве СОТС растительных масел их коррозионная активность при обработке различных материалов с учетом проведения того или иного вида механической обработки в настоящее время остается достаточно неисследованною [39]. Наиболее полное защитное действие проявляется при использовании химически инертных газовых сред, например, при обработке резанием в среде аргона [40].

Учитывая, что на эффективность действия СОТС, имеет большое значение способ ее подачи в зону резания, то развитие способов использования минимальной смазки, ставит задачу, как их анализа, так и проведение исследований в области подачи в зону резания растительных масел.

1.1.6. Упрочняющее действие СОТС. В работах [1, 4] при рассмотрении упрочняющего эффекта СОТС указывается, что при подборе технологических сред можно получить упрочнение поверхностного слоя детали в результате измельчения внутризеренной структуры его кристаллической решетки в поверхностно активной среде.

С другой стороны, в работе [2] отмечается, что исследованиями [40. 41], связанными с трансформацией контактных слоев инструмента (структуры, микротвердости, плотности, дислокаций, электрического сопротивления) показано, что эти слои на поверхности инструмента в процессе резания не только способны разупрочняться, но и в предельных условиях они упрочняются.

Исследования [15] показывают, что масленые среды существенно (до 60 – 80%) повышают уровень контактных напряжений по отношению к резанию всухую. В среде масел (в большинстве своем – растительные масла) нормальные давления достигают значений более 700 МПа (при температурах 200 – 400° С), что заметно превышает нижнюю границу упрочнения – 500

МПа, обусловливают приращение прочности контактных слоев до 40%. Такие упрочненные слои, что формируются на контактных поверхностях инструментов из быстрорежущей стали при резании различных материалов, в указанных условиях показывают 2-4 кратное повышение износостойкости выходной структуры, а при резании труднообрабатываемых материалов, что характеризируется созданием высоких давлений 5-6 кратное [41].

В работе [15] показано, что в реальных условиях, охватывающих широкий диапазон температур и нагрузок, рабочие поверхности инструмента изнашиваются, находясь принципиально в трех состояниях: исходной, упрочненной и разупрочненной (рис. 1.2).

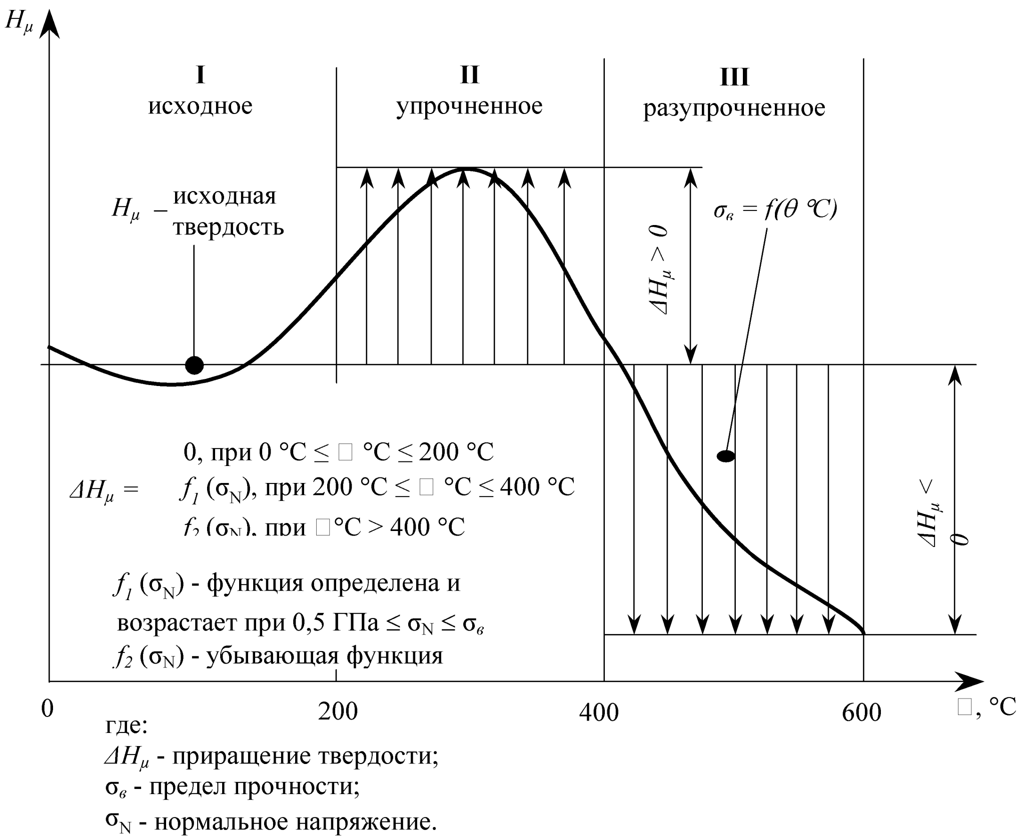


Рис. 1.2. Схема влияния температуры на трансформацию свойств контактных слоев инструмента из быстрорежущей стали [15].

В зоне I вследствие относительно низких температур (до 200 °C) деформационные процессы на контактных поверхностях инструмента затруднены, и исходная структура не претерпевает заметных изменений при износе – приращение твердости $\Delta H\mu \approx 0$.

Для зоны III характерны процессы разупрочнения контактных слоев инструмента ($\Delta H\mu < 0$), стимулируемые повышенными значениями температур (более 400 °С). Все меры, включая применение СОТС, принимаемые с целью снижения интенсивности износа в этой зоне, так или иначе направлены на замедление процесса разупрочнения и сохранение свойств исходной структуры инструментального материала.

Зона II охватывает диапазон температур от 200 °С до 400 °С, при которых испытания сталей деформационным нагружением обнаруживают так называемый «горб прочности», отражающий превалирование процессов упрочнения над разупрочняющими в зависимости $\sigma_в = f(\theta\ °C)$.

При резании данный процесс стимулируется тем, что предел текучести инструментального материала в его контактных слоях в результате нагрева значительно падает и действующие нагружающие напряжения оказываются достаточными для их пластической деформации. Естественно, как и во фрикционных парах [40-45], чем выше уровень контактных напряжений, тем выше степень упрочнения и ниже интенсивность износа. Эту связь в работе [46] достигали резанием труднообрабатываемых материалов и закаленных до различной температуры сталей, в данных исследованиях – подбором СОТС, растительные масла среди которых оказались наиболее эффективными.

Суть формирования при резании вторичных упрочненных структур (состояние II) заключается в том, что под действием внешнего возмущения ответная реакция воспринимающей системы компенсирует причину, вызывающего это возмущение. При этом осуществляется структурная приспосабливаемость – образование вторичных структур, обладающих прочностными свойствами, превосходящими исходную.

В работах [15, 46] отмечается, что формирование вторичных упрочненных структур является результатом проявления такого явления природы как самоорганизация. Для быстрорежущих инструментов в определенных условиях имеет место следующий механизм износа, вытекающий из принципа самоорганизации процесса: силовая и тепловая нагрузка контакта → пластическая деформация контактных (локальных) микрообъемов → их упрочнение (включая образование химических соединений) → износ (усталостное разрушение) исчерпавших запас пластичности адгезионных участков.

Отмечается, что, чем выше степень упрочнения, тем меньше размеры вырываемых (изнашиваемых) частиц и износ в целом. Показано, что СОТС, повышая удельные контактные нагрузки, стимулирует эти процессы тем больше, чем выше их адсорбционная активность. К последним можно отнести экологически чистые масла растительной природы. Таким образом, в плане влияния на износ инструмента, смазывающий и охлаждающий эффект СОТС дополняется упрочняющим эффектом.

Анализируя проведенные исследования по упрочняющему действию СОТС, следует отметить, что это действие исследовалось главным образом, при точении различных материалов быстрорежущим инструментом. Полученные при этом выводы трансформировались на инструменты, процесс резания которых подобен точению.

Однако совершенно не исследовались, с точки зрения механизма упрочнения, прерывистые процессы резания, к которым относится фрезерование. При этом исследования влияния СОТС на основные характеристики процесса резания показывают, что они проводились, без учета многих факторов, определяющих процесс резания и явлений, которые его сопровождают.

Установлено, что применение современных СОТС требует особых условий их использования [32-36] для обеспечения экологической безопасности и предупреждение вредного влияния на здоровье человека.

В связи с этим с точки зрения экологически безопасных веществ наметилась тенденция замены существующих СОТС на технологические среды, в основе которых лежат растительные масла, действия которых в полной мере не изучены, особенно для прерывистого резания [10].

Исследования действий СОТС при резании показывают, что их эффективность во многом зависит от способа подачи. Способ подачи СОТС в зону резания оказывает также большое влияние на такие экономические показатели как расходы на утилизацию, хранение и ее расход в процессе эксплуатации. В этой связи возникает задача анализа способов подачи СОТС в зону резания как одного из условий проведения процесса фрезерования.

1.2. Анализ способов подачи СОТС в зону резания

Проникновение СОТС в зоны контактирования инструмента со стружкой чрезвычайно затруднено. Поэтому эффективность любых типов СОТС определяется также способами ее подвода в зону обработки. При обработке лезвийным инструментом, нашли применение струйные способы подачи СОТС и способы с применением технологии минимального смазывания [1-4, 15, 50-52].

К струйным способам относятся подача СОЖ свободно падающей струей под давлением 0,02 – 0,03 МПа и подача под давлением 0,1 – 2,0 МПа.

Подача СОЖ свободно падающей струей (поливом) получила самое широкое распространение, что объясняется простотой реализации этого способа подачи. Его эффективность зависит от расхода СОЖ, размеров и траектории струи. Последняя в любом случае должна перекрывать всю зону контакта инструмента с заготовкой.

Расход технологической среды является наиболее важным параметром способа подачи, и его величина не должна превышать Q = 15 – 20 л/мин, так как дальнейшее увеличение нецелесообразно [1-3]. С повышением давления жидкости период стойкости инструмента увеличивается, но до определенного предела. При точении сверлении и протягивании рекомендуется подводить 10 – 12 л/мин жидкой СОТС, фрезеровании Q = 10 – 20 л/мин, нарезании резьбы с охлаждением сульфофрезолом 3 – 4 л/мин.

Данный способ наименее эффективен, так при проникновении на контактные площадки инструмента отмечается большой расход СОТС, что требует регенерации и очистки СОТС в неоправданных количествах и ее полной замены при отработке. Так для стали через 30 дней, а обработке чугуна и латуни через 15 дней.

Подача технологической среды под давлением 0,1 – 2,0 МПа осуществляется через сопловые насадки с высокой скоростью течения струи, превышающей 15 – 20 мл/мин, что способствует эффективному проникновению СОТС на контактные площадки и резкому увеличению ее количества проходящего через зону резания в единицу времени. В результате этого наблюдается повышение эффективности СОТС за счет проявления охлаждающего, смазочного и моющего действий СОТС при снижении ее расхода (до 0,5 ÷ 1,0 л/мин). Разновидностью подачи СОТС под давлением является струйно-направленный способ подачи СОТС со стороны задней поверхности.

Недостатком подачи СОЖ под давлением является необходимостью точного и непрерывного попадания струи СОТС в зону резания, сложность защиты от брызг и необходимость оснащения станка специальным насосом. Кроме того, способ значительно сложнее и дороже, чем подача СОЖ поливом. Охлаждение высоконапорной струи СОТС, позволяет повысить стойкость быстрорежущего инструмента в 3 – 7 раз по сравнению при подаче СОТС поливом и в 10 – 20 раз по сравнению с точением всухую [3].

В способах подачи СОТС с применением технологии минимального смазывания в зону резания реализован переход от принципа – чем больше, тем лучше, к принципу – точно в необходимом количестве. Это означает резкое сокращение объемов потребления СОТС, и как следствие, существенное снижение техногенного воздействия на окружающую среду и повышением общей культуры и чистоты производства. К таким способам относятся подача СОТС в распыленном состоянии, дозированная подача СОТС и периодическая подача перед резанием. Следует отметить, что эти способы подачи СОТС описаны во многих работах [1-4, 40, 50, 51], где рассматривается их область применения и недостатки.

Так при подаче технологической среды в распыленном состоянии она распыляется струей сжатого воздуха на мельчайшие капельки одинакового размера около 0,5 мкм и вместе с воздухом в виде аэрозоля подается в зону обработки со скоростью до 300 м/мин (рис. 1.3).

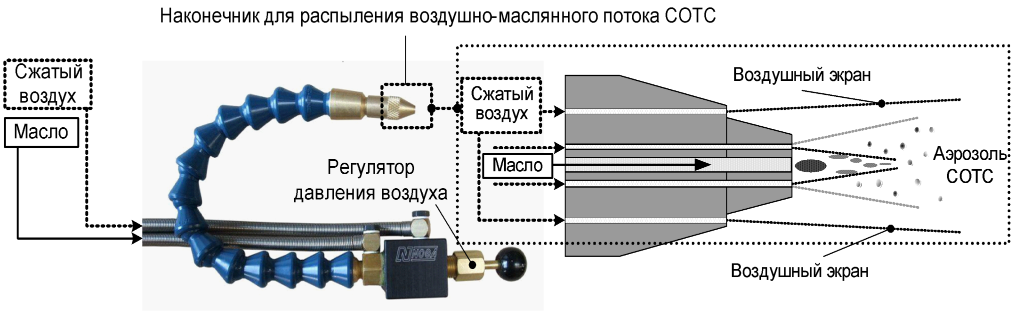


Рис. 1.3. Общий вид дозирующего устройства фирмы Noga «Minicool» (образование воздушно-масляного аэрозоля).

Согласно отрегулированным настройкам смазывающий материал и сжатый воздух коаксиально подаются по кабелям системы к дозирующей форсунке. Смесеобразование происходит на выходе форсунки на основе принципа Вентури. Распыляясь, тонкодисперсная воздушно-масляная смесь устремляется к зоне обработки. В основу такой конструкции заложен так же принцип формирования защитного воздушного экрана. Ввиду особенностей конструкции аэрозольный поток точно направляется и охватывает контактную зону обработки.

Способ чрезвычайно эффективен из-за высокой проникающей способности микрокапель СОТС, способности быстрого испарения с интенсивным поглощением тепла и низкого расхода СОТС до 0,2 л/мин. Применение этого способа на автоматизированном оборудовании приводит к повышению стойкости инструмента в 2 – 4 раз по сравнению с высоконапорным охлаждением. Их применяют на многочисленных операциях и в разных вариантах.

Возросшие требования к охране окружающей среды и здоровью человека (использование СОЖ связывают с развитием заболеваний органов дыхания, кожи и нервной системы) стали первопричиной усовершенствования схем и способов подачи распыленных смесей и расширению их использования. Поэтому на сегодняшний день нашли широкое распространение – технология минимального смазывания [15, 52, 53].

Анализируя основные способы применения ТМС, можно прийти к выводу, что их применение направлено прежде всего на снижение затрат по расходу СОЖ и на этой основе возможности замены используемых СОТС растительными маслами, эффективность которых доказана многими исследованиями [3, 15, 50-57].

В таблице 1.1. приведены результаты исследований области использования ТМС и обработки без СОТС (сухое резание) для различных типов инструментального материала и основных видов обработки [15].

Таблица 1.1

Области обработки с применением ТМС [15]

Вид инструментального материала	ТМС	«Сухое» резание
Инструментальная сталь		——
Быстрорежущая сталь		
Твердые сплавы		
Минералокерамика	——	
Кубический нитрид бора (CBN)		
Поликристаллический алмаз (PKD)		
Вид механической обработки		
Точение		
Торцовое фрезерование	——	
Профильное фрезерование		
Сверление		
Резьбонарезание		
Шлифование		——
- эффективно - неэффективно		

Анализ данных приведенных в таблице показывает только в общем виде эффективность применения ТМС, которое позволяет предположить, что данный метод эффективен при фрезеровании.

Однако исследований с использованием ТМС при фрезеровании сталей аустенитного класса не проводилось. Поэтому можно предположить эффективность ТМС при фрезеровании сталей этого класса.

1.3. Особенности резания сталей аустенитного класса

Стали аустенитного класса относятся к группе жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов. По физико-механическим свойствам жаропрочные, жаростойкие и нержавеющие стали и сплавы имеют много общего, что обуславливает их технологические качества [1, 4]. В зависимости от химического состава и для обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием труднообрабатываемые стали и сплавы имеют различную структуру: ферритную, мартенситно-ферритную, аустенитную и аустенитно-мартенситную. В связи с этим эти стали подразделяются на классы. Жаропрочные и жаростойкие чаще всего относятся к аустенитному классу, которые по классификации включены в III – V группы.

Коэффициент обрабатываемости этих сталей значительно ниже стали 45 и составляет от 0,5 (группа III) до 0,75 (группа V). Худшая в сравнении со сталью 45 обрабатываемость этих сталей и сплавов объясняется следующими их свойствами:

- высокое упрочнение в процессе его деформирования резанием;

- низкая теплопроводность по сравнению с конструкционными сталями, что приводит при их обработке к выделению значительного количества теплоты, резкому возрастанию температур в зоне резания, что способствует активизации адгезионных и диффузионных процессов, интенсификации изнашивания инструмента;

- способность сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах приводит к высоким удельным нагрузкам действующем на инструменте;

- большая истирающая способность, обусловленная наличием в них кроме фазы твердого раствора еще и второй фазы с образованием интерметаллидных или карбидных включений;

- пониженная виброустойчивость при резании, обусловленная высокой упрочняемостью этих сталей и сплавов при неравномерной пластической деформации.

С учетом рассмотренных особенностей согласно [4] процесс резания нержавеющих жаропрочных сталей и сплавов протекает таким образом: вначале рабочие поверхности инструмента соприкасаются с относительно мягким, неупрочненным металлом и под их воздействием происходит пластическая деформация срезаемого слоя, сопровождаемая значительным прикладываемой из вне (инструментом) энергии. При этом срезаемый слой получает большое упрочнение и приобретает свойства наклепанного металла, т.е. становится хрупким. Малая теплопроводность этих материалов приводит к резкому снижению отвода тепла в структуру и обрабатываемую заготовку, а, следовательно, повышению температуры в зоне контакта режущей части инструмента и заготовки с активацией процессов адгезии и диффузии.

В работе [1] отмечается, что для повышения уровня стойкости инструмента весьма эффективно использование технологических сред. Согласно данным [62, 63] правильный выбор СОТС может повысить период стойкости инструмента в 1,5 – 3 раза, снижает высоту микронеровностей до 1,5 раза.

Учитывая, что характер изнашивания инструментов при обработке сталей аустенитного класса является адгезионно-усталостным, то в этом случае рекомендуется применять СОТС с повышенной смазочной способностью.

Следует отметить, что по результатам работы [15] с повышенной смазочной способностью обладают СОТС на основе растительных масел.

Якубов Ч.Ф. рассматривает в работе [15] принципиально новый механизм влияния СОТС на износ инструмента. Установлено влияние СОТС на упрочнение и формирование износостойких структур, которые обеспечивают почти 4-х кратное снижение интенсивности износа инструмента относительно заданных структур или формируемых на воздухе. Показано, что упрочнение инструмента резанием в режиме приработки, обеспечивает в различных средах и зависит от среды, в которой осуществляется приработка. Так, на рис. 1.4 показан износ резца Р6М5К5 при точении стали 12Х18Н10Т после предварительной приработки в различных средах [15].

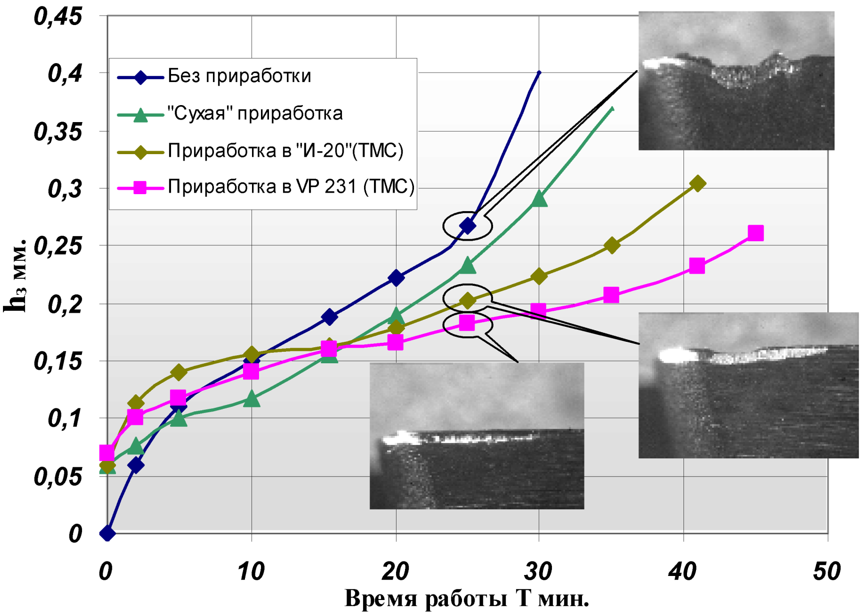


Рис. 1.4. Износ резца Р6М5К5 при точении стали 12Х18Н10Т после предварительной приработки в различных средах [15].

Приведенные на (рис. 1.4) результаты экспериментальных исследований позволяют предположить, что при точении стали 12Х18Н10Т после предварительной приработки наиболее перспективным является применение СОТС на основе растительных масел с использованием технологии минимального смазывания.

Так как приведенные выше исследования проводились только при точении, то их результаты не могут быть отнесены к фрезерованию. Это обосновывается результатами многих исследований [5, 64-71] по выбору СОТС для различных видов механической обработки. В связи с этим возникает задача исследования влияния различных СОТС на износ инструмента из быстрорежущей стали при фрезеровании сталей аустенитного класса, как без предварительной его приработки, так и после предварительной приработки в различных средах.

В работе [15] отмечается, что на любых режимах резания поверхностные слои инструмента потенциально могут достичь состояния предельного упрочнения, но для реализации этого процесса требуется разное время, зависимое от условий контактного воздействия. Поэтому при исследовании влияния СОТС при фрезеровании возникает вопрос исследования совместного влияния составляющих режима резания, причем с учетом диапазона их изменения, определяющих приработку инструмента в различных средах.

Анализ рассмотренных действий СОТС при резании и исследований по эффективности ее влияния на стойкость инструмента показывает, что общий эффект от ее использования проявляется в создании в целом оптимальных и напряженно-деформированных условий для протекания комплекса физико-химических и триботехнических явлений, стимулирующих образование вторичных, в пределе упрочненных структур.

С целью выявления влияния различных СОТС на основе растительных масел на стойкость инструмента необходимо установление совместного влияния режимных параметров процесса фрезерования сталей аустенитного класса и параметров, определяющих триботехнические свойства сред.

Такое влияние может быть определено при моделировании процесса фрезерования, при рассмотрении его как системы, с учетом явлений, сопровождающих этот вид обработки.

1.4. Система механической обработки и особенности физико-химических явлений процесса резания

Система механической обработки резанием состоит из элементов, связанных с характеристикой объектов, участвующих в процессе резания – сложном комплексе физико-химических явлений, и с технологическими показателями. Условно она может быть представлена тремя блоками [72, 73]:

- блок первичных входных параметров;

- блок процесса резания, определяемый параметрами физико-химических явлений, его сопровождающих;

- блок вторичных выходных параметров.

Входные параметры – это некоторое множество показателей составляющую технологическую систему механической обработки и среды ее функционирования (СОТС). При исследовании количество входных параметров определяется целью и задачами исследования.

Процесс резания возникает в результате взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с заготовкой, окружающей средой и его механизм, определяется состоянием входных параметров, изменяющихся в процессе резания и сложной совокупностью физико-химических явлений, возникающих в процессе резания. Эта совокупность явлений тесно связана между собой и включает в себя кинематику процесса, напряженное состояние, пластические деформации и разрушение в зоне резания, трение, динамические, тепловые, химические и электрические и др. явления.

Процесс резания является звеном, связывающим первичные и вторичные параметры. Его механизм определяется совокупным действием многих физических явлений, при этом крайне редко только один из них имеет решающее значение.

Вместе с тем, связь между первичными и вторичными параметрами обычно определяется взаимодействием основных (ведущих) физических явлений. Для решения задачи исследования влияния различных факторов, определяющих процесс резания в присутствии СОТС рассмотрим основные особенности процесса резания, влияющие на те или другие явления его сопровождающие.

Многими исследователями [1, 2, 64, 65, 67, 74] отмечается, что большая часть энергии, расходуемой на трение при резании, превращается в теплоту и разогревает макро-, микро- и субмикрообъемы обрабатываемой заготовки, стружки и инструмента. Субмикрообъемы, в которых возникают «температурные вспышки» могут нагреваться до температуры плавления металла обрабатываемой заготовки.

По данным исследований [76] трение в условиях резания характеризуется небольшими промежутками времени, в течение которого контртела трущихся пар находятся в подвижном контакте: при резании лезвийным инструментом ориентировочно $10^{-3} – 10^{-4}$ сек по передней поверхности инструмента и $10^{-4} – 10^{-5}$ сек по задней поверхности. Усредненный коэффициент трения при резании всегда превышает 0,3 – 0,5, в то время как при нормальном трении он составляет 0,05 – 0,015. Износ инструмента на 1000 м пути превышает 10^{-4} мм, что на пять или более порядков больше, чем при нормальном трении.

Интенсивная пластическая деформация подрезцового слоя сопровождается глубокими изменениями кристаллической решетки металла заготовки: она деформируется, изменяются основные ее параметры, происходит накопление избыточной внутренней энергии.

В результате увеличения температуры поверхностных слоев материала заготовки возрастает амплитуда колебаний атомов относительно положения их равновесия, что увеличивает вероятность их удаления из узлов решетки и число вакансий и дислоцированных атомов. В огромной степени возрастает количество других дефектов кристаллической решетки, прежде всего, дислокаций. Изменяется энергетический спектр свободных электронов повышается их уровень. Пластически деформируемые металлические поверхности излучают поток электронов, причем особенно интенсивно в момент разрыва металлических связей, а также при соударении макро- и микрообъемов металлических тел.

Необычайно высокой концентрации энергии на контактирующих поверхностях в тяжелых режимах граничного трения способствует накопление энергии большим числом дефектов в кристаллической решетке металла и возникновение сильных искажений на границах его структурных составляющих. Аналогичное влияние оказывает высокая термическая активность поверхностей заготовки и режущего инструмента, причем совместное одновременное воздействие нескольких факторов структурной и термической активации проявляется синергетически, т.е. в одном направлении и сильнее, чем каждый в отдельности [77].

Процесс резания характеризуется исключительно высокими значениями относительной деформации материалов заготовки и режущего инструмента и, как уже отмечалось, интенсивным трением рабочих поверхностей инструмента о заголовку (по задней поверхности) и стружку (по передней поверхности). При небольших нормальных нагрузках трущиеся поверхности контактируют в местах отдельно выступающих неровностей так, что фактическая площадь контакта $F_ф$ составляет незначительную часть номинальной площади $F_н$. Фактическое давление в контактных зонах $p_ф$ достигает предела текучести $\sigma_т$ даже при небольшой нормальной нагрузке $P_н$, увеличение которой не влияет на величину $p_ф$, а сказывается только на площади $F_ф$ контактных зон. Постоянное увеличение нормальной нагрузки $P_н$ приводит почти к пропорциональному росту площади $F_ф$ контактных зон вследствие пластической деформации микронеровностей тела меньшей твердости (заготовки):

$$F_ф = P_н / \sigma_T \qquad (1.1).$$

Как известно [77], силы «сухого» трения двух контактирующих объектов являются суммой всех тангенциальных сил сопротивления сдвигу при пластической деформации поверхностных слоев и пластической деформации выступов, возникающих в пятнах контакта, сил сопротивления скалыванию для материалов, склонных к хрупкому разрушению, адгезионных сил, возникающих вследствие межмолекулярных физических и химических связей материалов, контактирующих при обработке металлов резанием. Смазочно-охлаждающие технологические средства, попадающие в контактные зоны, проявляя функциональные действия, предотвращают или ослабляют адгезионные и иные взаимодействия, в результате чего уменьшаются теплообразование и износ трущихся поверхностей.

Предел текучести $\sigma_т$ материала при сдвиге в малой степени зависит от гидростатического давления. Поэтому сила трения, определяемая адгезионными силами и силами сопротивления сдвигу, пропорциональна фактической площади контакта и в соответствии с формулой (1.1) – нормальной нагрузке $P_н$. Таким образом, при малых значениях $F_ф$ и умеренных нагрузках существует линейная зависимость силы трения от $P_н$. При значительном росте нормальной нагрузки $P_н$ величина приближается к своему предельному значению, равному номинальной площади. Сила трения в этом случае практически не зависит от $P_н$.

Из соотношения (1.1) следует, что значение $P_н$, необходимое для достижения области пластического контакта, существенным образом зависит от СОТС, находящегося между двумя контактирующими поверхностями, и температуры, так как физико-механические свойства этого СОТС, и температура в значительной степени оказывают влияние на величину $\sigma_т$.

Рассмотрение системы механической обработки и особенностей процесса резания, как совокупности взаимосвязанных явлений, возникающих при образовании стружки, позволяет утверждать, что использование СОТС оказывает существенное влияние на интенсивность их протекания и тем самым влияет на работоспособность инструмента.

Процесс стружкообразования рассматривается многими исследователями как термомеханический процесс [3, 15, 41, 67, 77], определяемый множеством взаимосвязанных первичных параметров системы механической обработки. При этом влияние СОТС на механизм процесса резания без взаимосвязи с другими параметрами (факторами) не может быть установлен в полной мере. Однако влияния СОТС на параметры процесса резания во взаимосвязи с другими факторами, определяющими систему механической обработки практически не исследовано.

Учитывая противоречивость результатов исследования влияния СОТС в условиях прерывистого резания быстрорежущим инструментом, вопрос рассмотрения СОТС во взаимосвязи с другими факторами системы и явлениями, сопровождающими процесс фрезерования на основе термомеханических подходов к системе взаимосвязей при резании, является одним из эффективных путей повышения работоспособности инструмента за счет использования СОТС. Современный уровень развития информационных технологий, виртуального моделирования, накопленные знания и законы в области механики твердого тела, теплофизики, трибологии, позволяют решить эту комплексную задачу.

Как показывает анализ исследований по применению СОТС при обработке металлов резанием, проблема эффективного использования СОТС в условиях прерывистого резания изучена недостаточно.

На основании этого анализа установлено, что наряду с определением действий СОТС на протекание процесса резания во взаимосвязи с другими параметрами, перспективными направлениями использования СОТС в металлообработке является тенденция применения СОТС на основе растительных масел с использованием технологии минимального смазывания. Однако эти проблемы для условий прерывистого резания исследованы недостаточно.

Цель и задачи исследований

Целью работы является повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса за счет упрочняющего действия СОТС и определения их эффективного использования на основе моделирования влияния условий процесса упрочняющей приработки на процесс фрезерования.

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

10. Провести анализ состояния проблемы использования СОТС при обработке сталей аустенитного класса.

11. Проанализировать особенности воздействия (эффекты) СОТС при резании и способы ее подачи.

12. Разработать методику исследований на основе моделирования процесса фрезерования с учетом взаимовлияния действий СОТС с другими параметрами процесса и методику экспериментальных исследований.

13. Обосновать метод моделирования обеспечивающий взаимосвязь условий приработки и эксплуатационных режимов фрезерования при использовании различных СОТС.

14. На основе экспериментальных данных разработать модели, определяющие влияние действия СОТС во взаимосвязи с другими условиями на стойкость инструмента после приработки, а также модели в виде зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимов резания.

15. Определить влияние режимов резания на эксплуатационную стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности с использованием различных СОТС.

16. Проанализировать механизм влияния СОТС на контактные процессы, обеспечивающие упрочнение поверхностей инструмента.

17. Провести лабораторно - промышленную проверку и внедрение результатов исследований.

18. Разработать рекомендации по выбору режимов упрочняющей приработки инструмента и эффективному использованию различных СОТС, обеспечивающие повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса.

РАЗДЕЛ 2
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Общая характеристика методики исследований

Методика проведения исследований предусматривает решение задач моделирования основных характеристик процесса фрезерования с использованием СОТС во взаимосвязи с другими факторами на приработку инструмента и его износостойкость после приработки, а также проведение контрольных опытов и лабораторных испытаний, направленных на проверку результатов моделирования [81].

На рис. 2.1 представлена общая схема методики экспериментальных испытаний, обеспечивающих получение экспериментальных данных для построения моделей основных характеристик исследуемого процесса. Она состоит из двух блоков, а именно из блока, предусматривающую организацию эксперимента, т.е. составление статистического плана проведения экспериментов и непосредственно блока экспериментальных испытаний.

Первый блок включает в себя:

- обоснование и выбор метода моделирования;
- обоснование выбора переменных;
- определение границ изменения исследуемых переменных;
- составление статистического плана проведения экспериментов.

Методика экспериментальных исследований включает в себя, прежде всего методику и определение характеристик СОТС, а именно, коэффициента адгезионной составляющей коэффициента трения пары обрабатываемый – инструментальный материалы в присутствии различных СОТС и непосредственно методику проведения экспериментов.

Определение характеристик различных СОТС необходимо для составления плана проведения экспериментов.

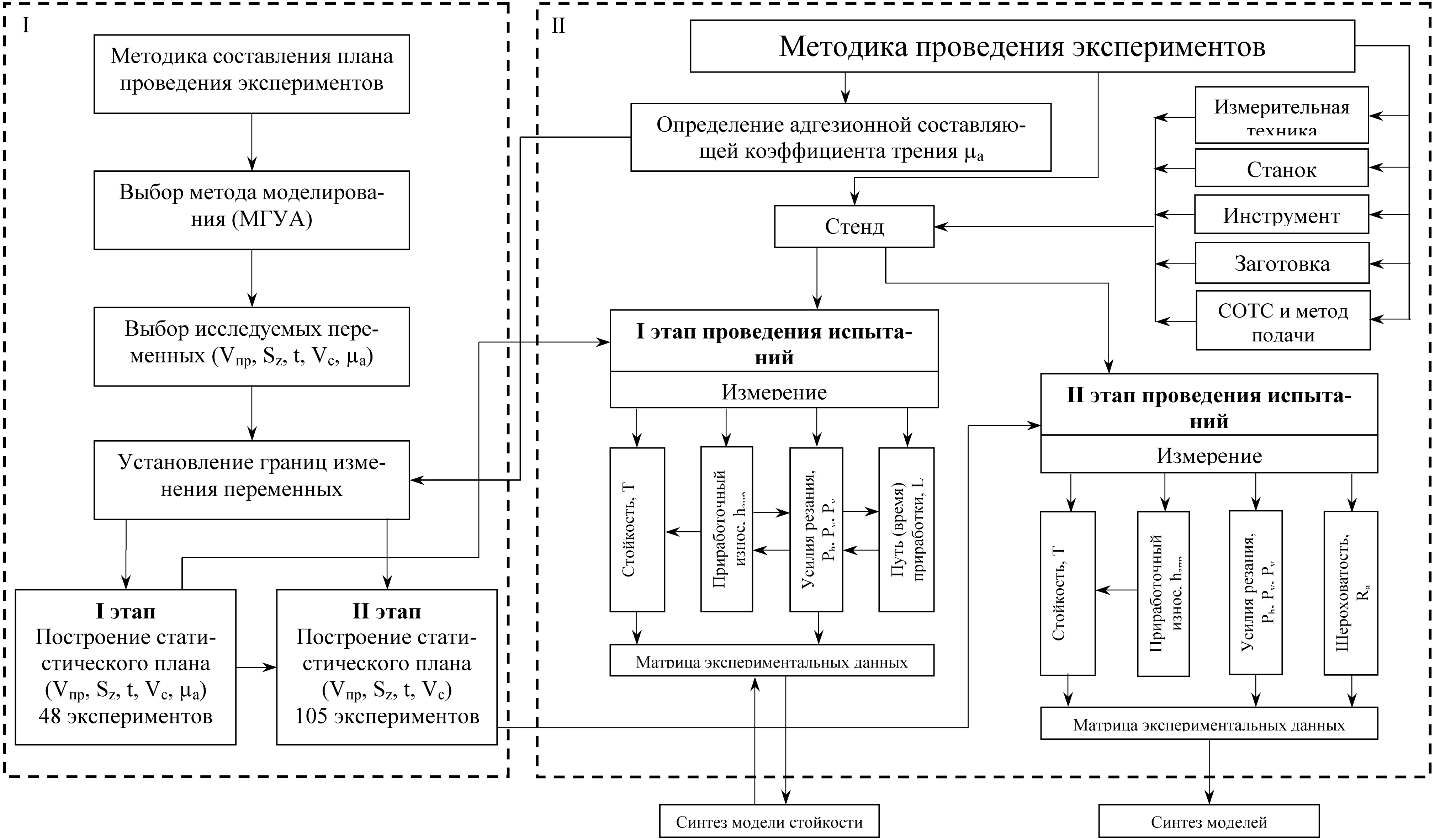


Рис. 2.1. Общая схема методики проведения экспериментальных исследований.

Методика проведения экспериментов предусматривает подготовку испытательного стенда, который монтируется на базе станка модели 6Б75ВФ1 и включает инструмент, закрепленную на станке заготовку, микроскоп модели МБС-1, устройство для подачи СОТС под давлением и силоизмерительный датчик УДМ-600.

Методика предусматривает также подготовку испытываемого инструмента, обрабатываемого материала и измерительной техники. В ней рассмотрены вопросы переточки инструмента, измерение конструктивных и геометрических параметров до и после переточек, измерение усилий резания и износа в процессе проведения экспериментов.

2.2. Составление плана проведения экспериментов

2.2.1. Выбор метода моделирования. Задача моделирования состоит, в определении моделей (зависимостей), связывающих такие параметры процесса фрезерования стали 12Х18Н10Т инструментом из стали Р6М5 как силы резания, стойкость и шероховатость с выбранными переменными в заданных пределах их изменения во взаимосвязи с различными СОТС. По своей постановке эта задача относится к задачам регрессионного анализа [80-82].

Однако применение регрессионного анализа в качестве метода математического моделирования процесса с большим числом переменных факторов (каким является резание) приводит к аппроксимации модели малой степени и соответственно к ее неадекватности.

Такой подход предопределен невозможностью получения хорошо обусловленных матриц экспериментальных данных [80, 81]. Сокращение же количества параметров и уменьшение границ их применения для построения моделей значительно ограничивает задачу и снижает ее научную и практическую ценность.

Кроме того, метод регрессионного анализа при решении многопараметрических задач требует проведения значительного количества специально спланированных экспериментов. Их реализация сопряжена с большими затратами времени, трудовых и материальных ресурсов.

Процесс обработки резанием относится к классу случайных плохо организованных процессов, характерной чертой которых является то, что в них нельзя четко проследовать причинно-следственные связи между входными и выходными параметрами. Он описывается функцией большого числа аргументов, взаимосвязь и сложность которых позволяет сравнить его с естественными процессами.

Анализ математических методов, наиболее широко используемых для решения многомерных задач, позволяет выбрать для нашей задачи один из методов эвристической самоорганизации – метод группового учета аргументов (МГУА) [80].

Этот метод нашел широкое применение в исследовании и прогнозировании сложных естественных и экономических систем, где постановка экспериментов не возможна или очень ограничена. Данными для получения моделей могут служить результаты экспериментов, полученных как на основе специальных планов, так и на основе лабораторных и производственных наблюдений в рассматриваемых пределах изменения выбранных контролируемых переменных, определяющих изучаемый процесс.

Метод группового учета аргументов можно рассматривать как соединение обычного регрессионного анализа и методов регуляризации. МГУА предназначен для прямого моделирования сложных систем по небольшому числу экспериментальных данных. МГУА обладает аппаратом, который дает возможность использовать при планировании экспериментов неортогональные планы и статистически обработанную информацию о реально существующих объектах.

Путем использования поэтапного усложнения комбинаций пороговых самоотборов (эвристических критериев) лучших комбинаций в алгоритмах МГУА реализована схема массовой селекции [80]. В отличие от других методов моделирования, этот метод обеспечивает получение моделей, вид и структура функций которых неизвестны. Перечисленные достоинства алгоритмов МГУА позволяют применять их при моделировании процессов обработки резанием, в том числе для построения моделей резания с использованием различных СОТС.

Опыт моделирования процессов резания с применением алгоритмов МГУА показывает, что этот метод обеспечивает построение математических моделей, которые пригодны для оптимизации параметров процесса и позволяют оптимально в заданных условиях управлять резанием [80-82, 84].

2.2.2. Выбор исследуемых переменных и границ их изменения. Результаты исследований по влиянию СОТС на износостойкость инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса носят противоречивый характер.

Так, в работе [4] указывается, что применение СОТС эффективно только при черновом фрезеровании. При этом рекомендуется применение СОТС, обладающих высоким смазывающим действием. В работах [1-4] также отмечается, что при обработке сталей аустенитного класса быстрорежущим инструментом необходимо применить СОТС с повышенной смазочной способностью.

Ряд исследователей [5, 7, 8, 61] приходят к выводу, что эффективность использования СОТС зависит от ее правильного выбора, который при том или другом виде обработки в большей степени может зависеть от режимов резания, как определяющих условия ее применения для исследуемых обрабатываемого и инструментального материалов.

Известно [15, 41], что механизм трения и смазки при резании того или иного обрабатываемого и инструментального материалов, главным образом, определяют самоорганизующие явления при обработке резанием, к которым относится и изнашивание инструмента.

Якубов Ч.Ф. рассматривает в работе [15] принципиально новый механизм влияния СОТС на упрочнение инструмента на этапе его приработки резанием (структурная приспособляемость). Учитывая, что этот эффект зависит от контактных нагрузок, действующих на инструмент в процессе резания и температуры резания, возникает задача определения условий резания, при которых осуществляется структурная приспосабливаемость.

Из теории резания известно, что контактные нагрузки, действующие в процессе резания на инструмент, и температура резания для пары обрабатываемый материал – инструмент для различных видов обработки в той или иной степени определяются режимами резания [77, 85].

Поэтому при исследовании влияния технологических сред на приработку инструмента в качестве переменных необходимо выбрать, прежде всего, скорость, подачу и глубину резания.

Целью экспериментальных исследований является установление режимов приработки и стойкости инструмента при его последующий эксплуатации на более форсированных режимах по сравнению с режимами приработки с использованием различных СОТС.

В качестве технологических сред выбраны: воздух, смазок используемых при обработке сталей аустенитного класса – И-20А, МР-99, а также растительные масла – рапсовое и касторовое с разными коэффициентами трения пары обрабатываемый и инструментальный материалы, которые определялись по методике, предложенной в работе [86].

Таким образом, в качестве контролируемых параметров переменных выбраны:

- скорость приработки - $V_{пр}$, м/мин (X_1);
- подача на зуб – S_z, мм/зуб (X_2);
- глубина фрезерования – t, мм (X_3);
- скорость резания после приработки – V_c, м/мин (X_4);
- адгезионная составляющая коэффициента трения пары обрабатываемый и инструментальный материалы – μ_a, (X_5).

В качестве контролируемой переменной адгезионная составляющая рассматривается только на первом этапе исследований, целью которой является проверка возможности ее использования как обобщенной характеристики свойств различных СОТС.

Исследуемыми параметрами при моделировании процесса фрезерования будут составляющие усилий резания – P_v, P_y и P_h во время приработки, стойкость фрез – T и шероховатость обработанной поверхности – R_a.

Основываясь на нормативных документах и данных литературных источников [15, 94-97] были выбраны границы изменения контролируемых переменных. Пределы их изменения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Пределы изменения контролируемых переменных

Границы изменения переменных	Значения контролируемых переменных				
	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V_c, м/мин	μ_a
верхний	28,0	0,3	2,0	50,0	0,31
нижний	12,0	0,1	0,4	28,0	0,13

Износ по задней поверхности как переменная фиксировался зубьев в процессе испытаний через каждые 200 мм и заносился после математической обработки в матрицу экспериментальных данных. Для получения матрицы экспериментальных данных необходимо было разработать статистический план проведения экспериментов.

2.2.3. Статистический план проведения экспериментов. При составлении плана экспериментов пять контролируемых переменных варьировались на пяти уровнях. Согласно рекомендациям [75, 78, 81, 82, 84] на первом этапе исследований был построен статический план, содержащий 48 опытов (из учета min 5-6 опытов на одну переменную). План охватывал всю исследуемую область функционирования объекта. При построении плана переменные варьировались с помощью случайных чисел с последующей проверкой характера распределения частот парных скалярных произведений всех переменных по столбцам плана. Распределение частот парных скалярных произведений должно подчиняться закону нормального распределения и проверялось по критерию Колмогорова, что обеспечило некоторый минимум парной корреляции и улучшило обусловленность матрицы.

Исследуемыми параметрами для проведения экспериментов были выбраны: составляющие сил резания при приработке y_1 – (P_v, Н), y_2 – (P_y, Н), y_3 – (P_h, Н), стойкость зубьев фрезы при фаске износа по задней поверхности h_3 = 0,3 мм, y_4 – (Т, мин) и шероховатость обработанной поверхности – R_a.

Диапазон изменения переменных был разбит на 5 уровней, значения которых уточнялись по фактически возможным значениям их реализации в эксперименте и заносились в натуральных единицах в матрицу экспериментальных данных. План экспериментов первого этапа представлен в приложении А.

В матрицу экспериментальных данных заносились среднеарифметические значения исследуемых параметров из трех опытов. Относительные отклонения их от генерального среднего оценивались по критерию Стьюдента – t с доверительной вероятностью 0,95.

Для каждой серии экспериментальных данных с использованием той или иной из исследуемых технологических сред рассчитывались дисперсии и поверялись по критерию Фишера – F их равенство между собой.

Для расчета указанных числовых характеристик случайных величин использовался программный продукт MathCAD Prime 2.0.

При составлении плана экспериментов и матрицы экспериментальных данных с учетом одновременного варьирования наряду с режимами приработки инструмента и его эксплуатации в различных СОТС при определении возможности использования адгезионной составляющей коэффициента трения μ_a в качестве оценки трибологических свойств СОТС для исследуемой пары обрабатываемый – инструментальный материалы возникает задача определения этой характеристики.

Общей методикой предусмотрено в случае отрицательного результата с точки зрения использования коэффициента трения μ_a в качестве оценки трибологических свойств различных СОТС составление плана для каждой из сред, который представлен в приложении Б.

2.3. Определение адгезионной составляющей коэффициента трения

2.3.1. Общие положения. Известно, что процесс резания представляет собой процесс внедрения лезвия инструмента в заготовку с образованием новой поверхности за счет отделения от заготовки срезаемого слоя. Лезвие взаимодействует с заготовкой, которая скользит по передней и задней поверхностям инструмента.

В результате такого взаимодействия на контактных поверхностях возникают силы сопротивления скольжению, которые принято характеризовать касательными напряжениями τ_N. Немаловажным фактором является значение среднего коэффициента трения при резании, который принято характеризовать суммой адгезионной и деформационной составляющих.

Поэтому одним из эффективных путей управления контактным взаимодействием инструмента со стружкой и заготовкой является применение различных СОТС.

Анализ механики процесса трения, а также условий, реализующихся на поверхностях контакта инструмента с заготовкой и стружкой, в общем, позволяет установить, что сила сопротивления относительному скольжению на рабочих поверхностях инструмента формируется в результате весьма сложных контактных процессов.

В связи с изменением контактного давления, температуры и скорости скольжения на поверхности контакта одновременно может происходить взаимодействие в различных режимах: внешнее, внутреннее или даже граничное трение скольжения [70]. Режим внутреннего трения полностью определяется величиной предела текучести $\sigma_т$ срезаемого слоя при локальных температурах, а также величиной и скоростью пластической деформации в нем.

Трение при резании [71, 88-93] характеризуется такими параметрами как адгезионная $\mu_а$ и деформационная $\mu_д$ составляющие среднего коэффициента трения μ ($\mu = \mu_а + \mu_д$) и адгезионное составляющее которое связано с образованием на участках контакта мостиков схватывания. Сопротивление срезу этих мостиков и формирование новых при данной действительной площади контакта и определяет величину адгезионной составляющей силы трения.

Среди существующих схем экспериментального определения среднего коэффициента трения при резании для определения адгезионной составляющей коэффициента трения пары обрабатываемый – инструментальный материалы в присутствии различных СОТС была выбрана схема, предложенная кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты» Сумского государственного университета.

2.3.2. Методика определения трибологических свойств пары 12Х18Н10Т – Р6М5 в присутствии различных СОТС. Трибологические свойства СОТС обусловлены комплексным влиянием их компонентного состава на образование граничных слоев – поверхностных защитных пленок. В зависимости от природы компонентов СОТС химический состав, структура и свойства граничных поверхностных слоев могут существенно изменяться. Для диагностики трибологических свойств широко используются разнообразные машины трения – ЧШМ-1, ЧШМ-К, Falex Four-Ball Wear Test machine, Seta, Optimol SRV и другие [87].

Однако все эти способы не могут дать представления об изменении трибологических свойств СОТС при высоких давлениях. Поэтому целью данного исследования является идентификация трибологических свойств масел при контактных давлениях, соизмеримых с пределом текучести менее твердого тела в контактных парах быстрорежущая сталь Р6М5 со сталью 12Х18Н10Т.

Исследования проводились на базе кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты «СумГУ» методом вдавливания в полупространство (поверхность образца из обрабатываемого материала) сферического индентора из быстрорежущей стали Р6М5 [93].

Этот метод, на наш взгляд, позволяет получить наиболее достоверные количественные величины характеристик адгезионного взаимодействия, инструментального и обрабатываемого материалов в условиях, близких к тем, что имеют место на передней поверхности в процессе резания.

Индентор был выполнен из быстрорежущей стали Р6М5 в виде сферы Ø 9,3 – 9,8 мм с отклонением от круглости не более 1 мкм. Шероховатость поверхности сферы R_a = 0,2 мкм обеспечивалась ее полированием. Образец цилиндрической формы, высотой не менее 20 мм, был выполнен из стали 12Х18Н10Т ($\sigma_{0,2}$ = 255 – 315 МПа). Шероховатость торцевых поверхностей образцов перед проведением испытаний – R_a = 0,8 мкм.

Перед проведением испытаний образец из обрабатываемого материала и индентор обезжиривались 96%-м раствором этилового спирта. Остатки пленок с поверхностей контакта абсорбировались активированным углем. Подача СОТС производилась непосредственно в контакте индентора с контртелом. Испытания начинались не более чем через 30 сек. после обезжиривания.

Устройство [93], которое обеспечивает измерение момента трения методом вращающегося относительно плоского контртела, (с жесткой схемой нагружения) сферического индентора, реализован на базе вертикально-фрезерного станка 6Р12 (рис. 2.2, 2.3).

Выбор базовой системы для реализации устройства обусловлен необходимостью обеспечения высокой жесткости механизма нагружения в направлении оси действия нормальной силы с возможностью одновременного добавления вращения вокруг этой же оси. Жесткость использованного станка составляет j_z = 55 мкм/кН.

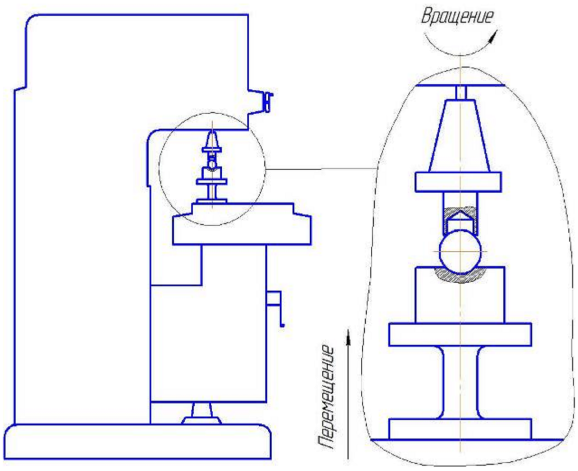


Рис. 2.2. Схема нагружения.

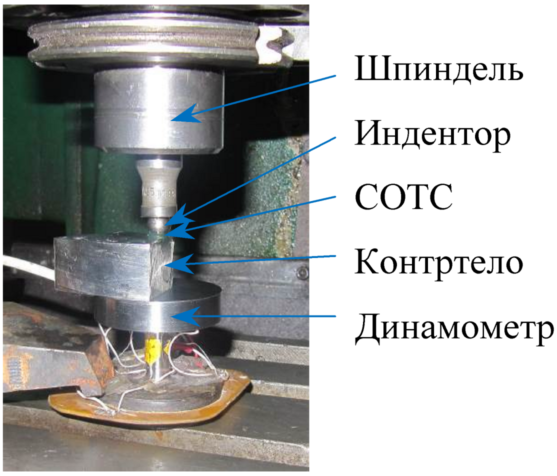


Рис. 2.3. Динамометр.

Устройство работает следующим образом. На столе станка соосно с осью шпинделя устанавливается измерительное устройство (динамометр), что позволяет одновременно измерять нормальную к его базовой плоскости силу и крутящий момент. На базовую поверхность динамометра устанавливают контртело в виде пластины толщиной не менее 5 мм. В цанговом патроне закрепляется оправка с коническим центральным отверстием, выполненным с целью минимизации биения, совместно с оправкой непосредственно на фрезерном станке. Индентор размещается между поверхностью контртела, обработанной аналогичным способом, и конической оправкой. Базирование индентора осуществляется по конической поверхности центрального отверстия. Гильза шпинделя неподвижно устанавливается в бабке шпинделя. Нагрузку осуществляют перемещением консоли станка вверх по оси z. Сила нагружения контролируется с помощью специального программного обеспечения «PowerGraph» (рис. 2.4).

Биение индентора относительно оси вращения не превышало 20 мкм. Нагрузки задавались в диапазоне от 200 до 2400 Н. Предварительная нагрузка составляла 4000 ± 100 Н, что обеспечивало формирование в начале каждого испытания лунки одинакового диаметра.

Измерение момента трения осуществляется при вращающемся с частотой 31,5 об/мин шпинделе. Малая частота вращения исключает, разогрев контактных поверхностей. Крутящий момент от индентора передается через контактную поверхность сферической оправки, радиус которой в несколько раз больше радиуса образующейся лунки.

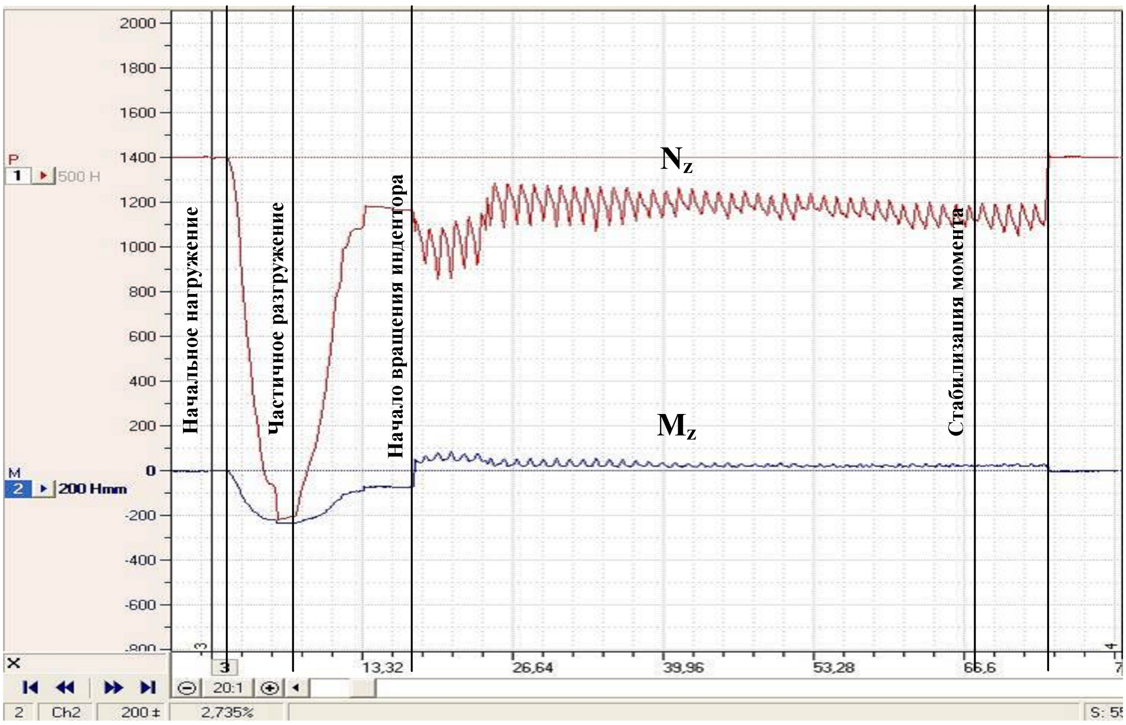


Рис. 2.4. Диаграмма изменения нормальной силы и момента трения в процессе измерений.

В первые моменты времени момент трения интенсивно растет, а нормальная сила несколько уменьшается из-за интенсивной деформации контактной поверхности и изменения ее микрорельефа. Дальше интенсивность этих процессов замедляется и в определенный момент времени, когда момент трения и нормальная сила остаются постоянными (в пределах точности измерений), наступает стабилизация величины фактической площади контакта. В этот момент производится быстрая разгрузка системы путем до необходимого значения силы нагружения. Если на полученном отпечатке и поверхности индентора нет налипаний, то это свидетельствуют о том, что при испытании между индентором и упрочненной поверхностью контртела имеет место только внешнее трение, характеризующееся деформационной составляющей среднего коэффициента трения. Каждый опыт повторялся 3 раза.

Среднее квадратичное отклонение измеренной осевой силы не превышало 210 Н, среднее квадратичное значение измеренного момента вращения не превышал 41 Н·мм. Тогда доверительные интервалы при вероятности 0,95 составили: нормальных напряжений – 41 МПа, касательных напряжений – 15 МПа. Доверительный интервал коэффициента трения при нормальных давлениях не менее 250 МПа составил не более 22% его математического ожидания.

Адгезионная составляющая коэффициента трения рассчитывалась по формуле:

$$\mu_a = \tau_a/\sigma_n,$$

где, τ_a касательные напряжения адгезионного сопротивления скольжению, $\tau_a=\tau_n-\tau_д$; τ_n – полные касательные напряжения сопротивления скольжению на поверхности сферы; $\tau_д$ – рассчитанная деформационная часть сопротивления скольжению на поверхности сферы, равной:

$$\tau_д = \mu_д \cdot \sigma_n,$$

где, $\mu_д$ – деформационный коэффициент трения микрорельефа поверхности инструмента, упругих свойств материалов системы и деформационного состояния обрабатываемого материала на деформационную составляющую сил трения; σ_n – нормальное напряжение, определяемое экспериментальным путем [89, 90].

Адгезионная составляющая коэффициента трения, $\mu_a=\tau_a/\sigma_n$ проявляет нелинейность. В связи с этим коэффициент трения зависит от контактного давления. Экспоненциальная модель позволяет вычислить его минимальное значение для материала как:

$$\mu_{amin} = \tau_0 \cdot \beta_0 \cdot e,$$

где e – основание натурального логарифма. Действительно,

$$\mu_a = \frac{\tau_a}{\sigma_n} = \frac{\tau_0 e^{\beta_0 \sigma_n}}{\sigma_n}$$

$$\frac{d\mu_a}{d\sigma_n} = \frac{\tau_0 \beta_0 \sigma_n e^{\beta_0 \sigma_n} - \tau_0 e^{\beta_0 \sigma_n}}{\sigma_n^2} = 0$$

$$\sigma_{n\min} = \frac{1}{\beta_0} \to \mu_{a\min} = \tau_0 \beta_0 e$$

Результаты исследований влияния различных смазок на адгезионную составляющую в паре «сталь 12Х18Н10Т-Р6М5» приведены в таблице 2.2.

Сравнительный анализ значений, μ_a, рассчитанного по линейной модели и μ_{amin} по экспотенциальной модели показывает, что они весьма близки между собой (за редким исключением, видимо, в пределах погрешности эксперимента). Так как μ_{amin} учитывает нелинейное поведение материала он может быть принят в качестве трибологической оценки пары трения.

Это предположение о возможности использования в качестве оценки трибологических свойств технологических сред μ_{amin} исследуем на максимально близких по значению адгезионных составляющих коэффициентов трения рассматриваемых сред (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Результаты исследований влияния различных смазок на адгезионную составляющую в паре «сталь 12Х18Н10Т-Р6М5»

Среда	μ_a
Сухая обработка	0,25
ОМ	0,39
МР-99	0,13
И-20А	0,31
И-40А	0,42
Рапсовое масло	0,20
Хлопковое масло	0,18
Касторовое масло	0,27
Подсолнечное масло	0,30

2.4. Методика проведения экспериментов

2.4.1. Подготовка к испытаниям заготовок. В качестве обрабатываемого материала использовалась заготовка, специальной формы (рис. 2.5) из коррозионностойкой стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632-72. При выборе данного материала учитывалась его востребованность в промышленности, особенность конструкционных свойств, а также сложность механической обработки. Используется данная сталь в корпусах и других деталях, работающих под давлением при температуре от -196 °С до 600 °С, а также при наличии агрессивных сред до +350 °С. Химический состав и механические свойства приведены в таблицах 2.3 и 2.4.

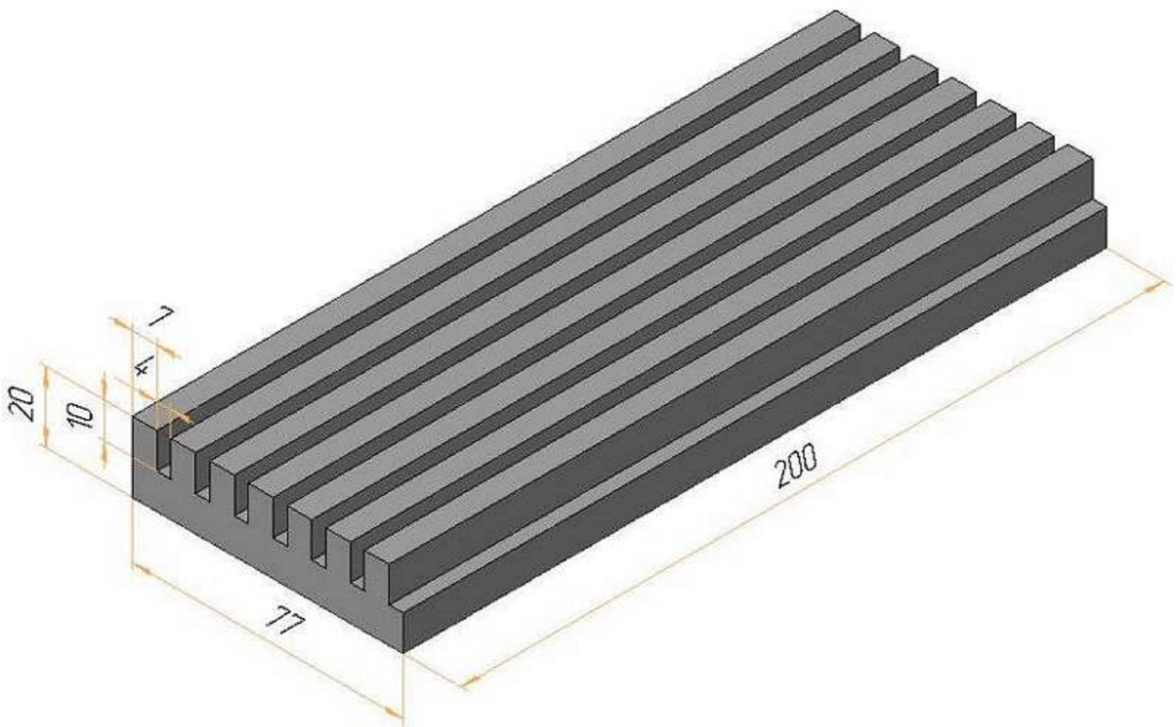


Рис. 2.5. Обрабатываемый материал (заготовка).

Таблица 2.3

Химический состав стали 12Х18Н10Т, %											
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Fe	Cu	P	S
не более									не более		
0,12	0,8	2,0	17-19	0,5	9-11	0,2	0,8	Ост.	0,4	0,035	0,02

Таблица 2.4

Механические свойства стали 12Х18Н10Т при повышенных температурах					
$t_{исп}$, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	*KC*U, Дж/см^2
20	225-315	550-650	46-74	66-80	215-372
500	135-205	390-440	30-42	60-70	196-353
550	135-205	380-450	31-41	61-68	215-353
600	120-205	340-410	28-38	51-74	196-358
650	120-195	270-390	27-37	52-73	245-353
700	120-195	265-360	20-38	40-70	255-353

Примечание: $t_{исп}$ – температура при испытаниях; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; $\sigma_в$ – предел прочности при растяжении; δ_5 – относительное удлинение после разрыва; ψ – относительное сужение; *KC*U – ударная вязкость.

Основные особенности резания жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов, затрудняющие их механическую обработку, следующие. Высокое упрочнение материала в процессе деформации резанием. Повышенная упрочняемость жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов объясняется специфическими особенностями строения кристаллической решетки этих материалов. Известно, что пластичность материалов определяется числом возможных направлений скольжения. Кристаллы сталей феррито-перлитной группы имеют решетку, пространственно центрированную кубическую с восемью возможными направлениями скольжения.

Малая теплопроводность обрабатываемого материала, приводящая к повышенной температуре в зоне контакта, а, следовательно, к активизации явлений адгезии и диффузии, способствует интенсивному схватыванию контактных поверхностей и разрушению режущей части инструмента. Эти явления не позволяют использовать при обработке жаропрочных материалов инструментальные материалы, повышают твердость и, в первую очередь, твердые сплавы. Вместе с тем при использовании быстрорежущего инструмента по тем же причинам приходится принимать весьма малые скорости резания. Учитывая же пониженный теплоотвод при обработке жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов, основное значение приобретают охлаждающие свойства СОТС.

2.4.2. Режущий инструмент. Для проведения испытаний были выбраны цельные дисковые трехсторонние фрезы Ø 100 мм с разнонаправленными зубьями (Z = 14) по ГОСТ 28527-90 из быстрорежущей стали Р6М5 одной партии (7 фрез), конструкция и геометрические параметры инструмента приведены на рис. 2.6.

В испытаниях принимали участие только 2 зуба (1-й и 8-й). Все остальные зубья перед испытаниями были занижены до диаметра Ø 95 мм. Заточка и переточка передней и задней поверхностей рабочих зубьев производилась на оправке в трехповоротной универсально-заточной головке, установленной на универсально-заточном станке модели 3В642 кругами из эльбора на керамической связке 12R9-20 150-17-20-5 ЛКВ40 125/100 4 КБ 100% и алмазного на органической связке 12А2-45 150-40-20-3-32 АС4 80/63 100% В2-01 соответственно (рис. 2.7).

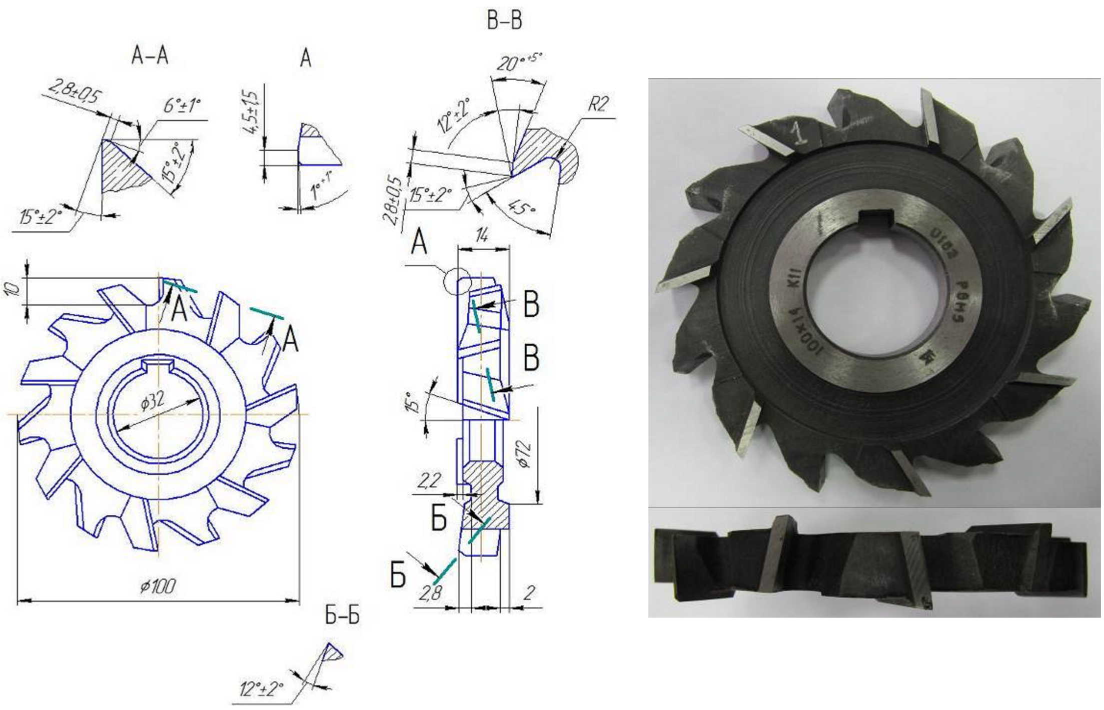


Рис. 2.6. Элементы конструкции и геометрические параметры инструмента.

Геометрические параметры рабочих зубьев после переточки составили:

- передний угол – $\gamma = 15°\pm1°$;

- задний угол – $\alpha = 12°\pm1°$;

- угол наклона зубьев – $\omega = 10°\pm1°$.

а)  б) 

Рис. 2.7. Заточка фрезы: а) - по передней и б) - задней поверхностям.

Перед испытаниями проверялась твердость (3 раза) каждого из испытуемых зубьев фрез в состоянии поставки на приборе ПМТ-3 (рис. 2.8) по методике в соответствии с ГОСТ 9450-76, твердость на торце рабочей части фрезы на расстоянии не более 5 мм от режущих кромок составляла $HRC_{э}63$.

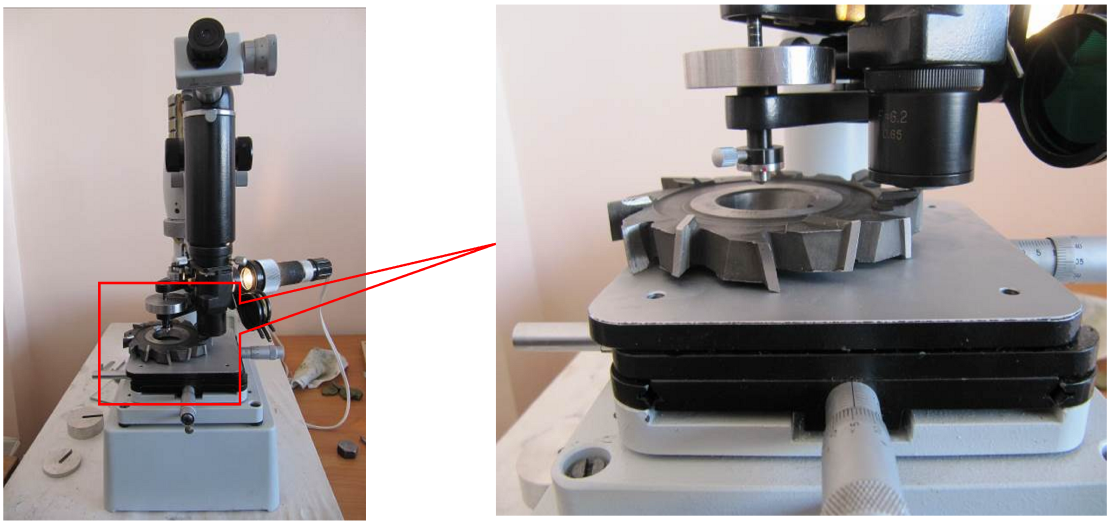


Рис. 2.8. Измерение твердости зубьев фрезы на приборе ПМТ-3.

2.4.3. Измерительная техника. Геометрические параметры инструментов в состоянии поставки измерялись на универсальном измерительном микроскопе модели УИМ-23 и приборе 2УРИ (угломер конструкции М.И. Бабчиницера).

Для измерения усилий резания использовался компьютерный комплекс разработки кафедры интегрированных технологий НТУУ «КПИ» [98]. В его состав входили: измерительный датчик универсального динамометра УДМ-600 конструкции ВНИИ, блок сопряжения универсального динамометра с персональным компьютером (ПК) на базе Intel Pentium IV и аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Функциональное назначения УДМ-600 состоит в преобразовании сил резания в пропорциональные электрические сигналы [99]. ПК выполняет функцию управления процессом измерений, полученных мгновенных числовых значений усилий резания, обеспечивая статическую обработку результатов измерений. Блок сопряжения выполняет функцию стыковки ПК с УДМ-600.

В комплексе используется специальные программы, которые обеспечивают работу с блоком сопряжения и файлами результатов измерений, а также пакеты прикладных программ MathCAD Prime 2.0, MATLAB R2012, CorelDRAW X6 и Microsoft Excel 2010 для статической обработки результатов и оформления отчетной документации.

2.4.4. Проведение экспериментов. Проведение экспериментов предусматривало получение данных для решения целого ряда задач моделирования контрольных опытов и лабораторных испытаний.

Комплекс задач моделирования процессов при фрезеровании в среде различных СОТС, включал:

- моделирование приработочного износа, обеспечивающего образования вторичного упрочненного слоя;
- моделирование стойкости инструмента после приработки;
- моделирование силовых характеристик процесса приработки и работы инструмента после приработки;
- моделирование шероховатости поверхности.

Для решения этих задач по результатам экспериментов на универсально фрезерном станке модели 6Б75ВФ1, соответствовавшему нормам точности и жесткости по ГОСТ 7035-75 и ГОСТ 8-77, был смонтирован испытательный комплекс, который обеспечивал в пределах одной серии опытов устанавливать значения как приработочные режимы, так и эксплуатационные после приработки, а также измерения, предусмотренные статическими планами проведения экспериментов.

На столе станка устанавливался универсальный трехкомпонентный динамометр УДМ-600 конструкции ВНИИ, в которой крепились, подготовленные к испытаниям заготовки (рис.2.9. б)). УДМ-600 через блок сопряжения стыковался с персональным компьютером, установленным на отдельном столике рядом со стендом (рис.2.9. а)).

Рис. 2.9. Испытательный стенд: а) – ПК и блок сопряжения; б) – силоизмерительный датчик УДМ-600.

Тарирование силоизмерительного датчика проводилось по методике ВНИИ [99] с помощью переносного образцового динамометра ДОСМ-3-1 системы Н.Т. Токаря, изготовленного в соответствии с ГОСТ 9500-60. Составляющие силы резания P_h, P_v и P_y соответственно записывались в отдельные файлы (рис. 2.10).

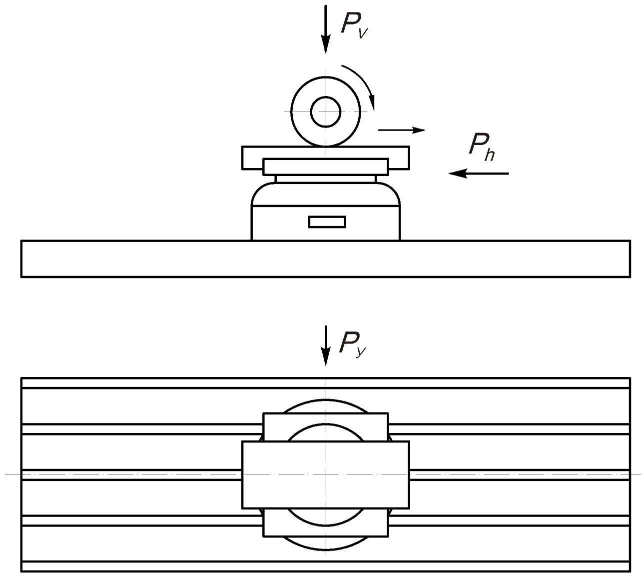


Рис. 2.10. Схема тарировки силоизмерительного датчика.

На оправке, закрепленной в шпинделе горизонтальной головки станка, устанавливалась испытуемая двузубая дисковая фреза шириной B = 14 мм с разнонаправленными зубьями, которая поочередно обрабатывала уступы на заготовке в заданном планом приработочном режиме. Обработка осуществлялась до критерия износа зубьев фрезы $h_з$ = 0,3 мм.

Подача СОТС осуществлялась по задней поверхности зуба фрезы при помощи устройства фирмы Noga «Minicool» (рис. 2.11), предназначенного для реализации технологии минимального смазывания.

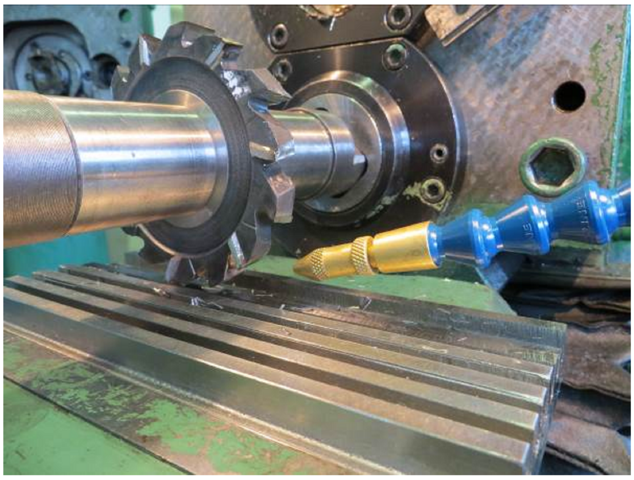


Рис. 2.11. Схема подачи СОТС в зону обработки с использованием технологии минимального смазывания.

После обработки каждого уступа (L = 200 мм) производилось измерение фаски износа и усилий резания как на приработочных режимах, так и на эксплуатационных.

Для этого на столе станка устанавливался микроскоп модели МБС-1 с ценой деления 0,007 мм (рис. 2.12), фотографировалась передняя поверхность зуба фрезы и измерялась фаска износа по задней поверхности.

Рис. 2.12. Измерение фаски износа с помощью микроскопа модели МБС-1.

По каждой экспериментальной точке плана проводилось три параллельных опыта и по критерию Стьюдента проверялось наличие бракованных опытов, при наличии которых эксперимент повторялся.

Для формирования матриц экспериментальных данных принималось среднее значение измерений.

2.5. Измерение шероховатости обработанной поверхности

Измерение шероховатости обработанной поверхности (параметр – R_a) проводилось на портативном профилометре модели Time Group Inc. TR200, который представлен на рис. 2.13. Данный прибор соответствует основным международным стандартам: ISO 4287:1997 (Международная организация по стандартизации), DIN 4768:1990 (Германский институт стандартов), ANSI/ASME B46.1:1995 (Американский национальный институт стандартов), JIS B0601:2001 (Японский промышленный стандарт).

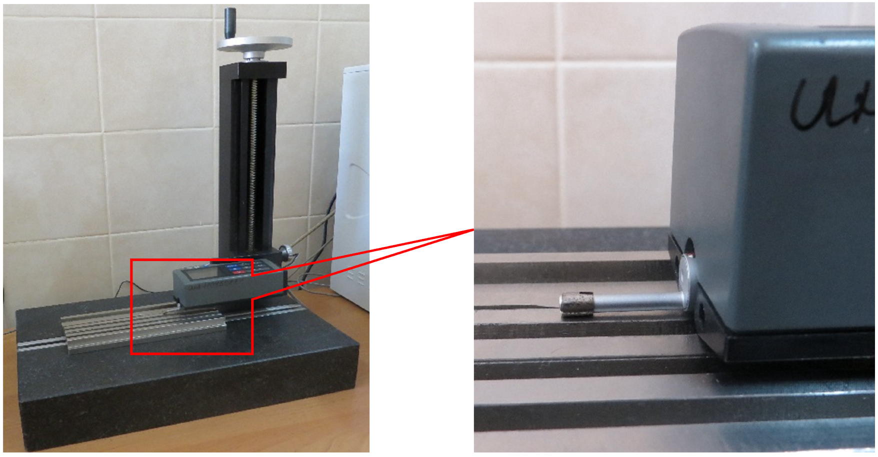


Рис. 2.13. Измерение шероховатости обработанной поверхности: общий вид профилометра модели TR200 со специальным программным обеспечением Time DataView For TR200.

На рис. 2.14 приведена схема измерения шероховатости обработанной поверхности. Ось измерительного индуктивного датчика с алмазным наконечником модели TS100 располагалась по нормали к измеряемой поверхности образца. Замеры проводились на каждом из уступов пути резания в трех равноудаленных друг от друга участках в начале (участок – 1) в середине (участок – 2) и в конце пути резания (участок – 3). В свою очередь каждый из участков представляет собой три параллельных отрезка (трассы) с базовой длиной измерения L = 8 мм. Результаты измерений статистически обрабатывались по критерию Стьюдента и устанавливались средние значения параметра R_a. Разброс результатов полученных значений не превышал 10%.

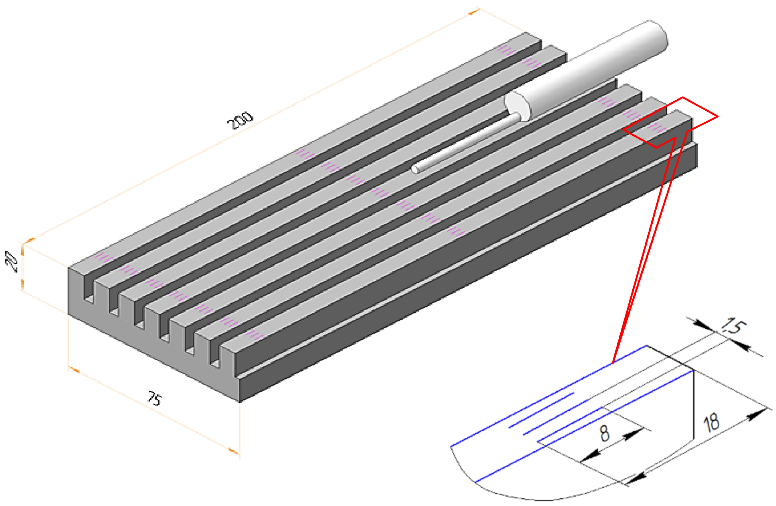


Рис. 2.14. Схема измерения шероховатости обработанной поверхности.

Выводы

1. Впервые разработана методика комплексных испытаний с использованием упрощенного алгоритма МГУА на основе экспериментальных данных характеристик процесса фрезерования в присутствии различных СОТС с одновременным изменением приработочных и эксплуатационных режимов в процессе фрезерования.

2. Разработанная методика обеспечивает проверку, гипотезы о возможности использования адгезионной составляющей коэффициента трения в качестве обобщенного критерия оценки свойств СОТС, а также обеспечивает реализацию плана экспериментов для построения матрицы экспериментальных данных для каждой из исследуемых переменных.

3. Определены значения коэффициентов для различных видов СОТС, используемых при резании стали типа 12Х18Н10Т и обоснован выбор их значений для построения плана экспериментальных данных.

РАЗДЕЛ 3
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ

3.1. Общие положения

В качестве основных характеристик исследуемого процесса были выбраны стойкость инструмента до и после его приработки – T (мин), усилия резания – P_h, P_v и P_y (Н), шероховатость обработанной поверхности – R_a (мкм) в присутствии различных технологических сред.

Для моделирования этих характеристик был реализован комплексный статический план.

Моделирование стойкостных зависимостей проводилось в два этапа.

Первый этап предусматривал построение моделей в виде зависимостей $T = f(V_{пр}, S_z, V_c, t, \mu_a)$ для определения возможности использования адгезионной составляющей коэффициента трения μ_a в качестве общей характеристики свойств исследуемых технологических сред. Матрица экспериментальных данных приведена в приложении А.

После определения возможности использования коэффициента μ_a для оценки свойств той или иной среды принималось решение о дальнейших исследованиях и моделировании, как стойкостных исследований инструмента, так шероховатости обработанной поверхности.

На втором этапе моделирования синтезировались модели в виде зависимостей $T = f(V_{пр}, S_z, V_c, t)$ и $R_a = f(S_z, V_c, t)$ отдельно для каждой из исследуемых сред, а также для определения зависимостей, составляющих силы резания от скорости приработки, подачи на зуб и глубины резания $P_h = f(V_{пр}, S_z, t)$; $P_v = f(V_{пр}, S_z, t)$; $P_y = f(V_{пр}, S_z, t)$ (приложение Б).

Для построения моделей характеристик процесса фрезерования с использованием одного из алгоритмов МГУА – упрощенного модифицированного алгоритма необходимо было выбрать масштабное пространство исходных данных.

Опыт использования МГУА [80-82] показал, что для получения моделей характеристик процессов резания это пространство необходимо задавать с учетом вида функций, которыми определяется исследуемый процесс.

В резании металлов для определения зависимости T = f(V$_c$, S$_z$, t), переменных используется пространство $\ln\overline{X}\,(\ln\overline{X})$. На первом этапе исследования в качестве переменной рассматривается коэффициент μ_a, характеризующий адгезионную составляющую трения в присутствии различных СОТС. Поиск модели осуществлялся в пространстве $\overline{X}$, $\ln\overline{X}$, а выходные характеристики – в $\ln\overline{Y}$.

Таким образом, задача построения математических моделей характеристик процесса фрезерования может быть сформулирована как задача установления функциональной связи между переменными и исследуемыми выходными характеристиками (параметрами).

Исследуемые параметры являются случайными величинами, зависимыми от множества факторов функционирования технологической системы, которые невозможно учесть даже в эксперименте, проведенном в лабораторных условиях. Поэтому при моделировании каждый из выходных параметров описывается математическим ожиданием исследуемого параметра с учетом выбранного масштабного пространства.

Каждый из векторов $\overline{X}$, $\ln\overline{X}$, на каждом этапе построения модели включает X_i переменные:

$$\overline{X} = \left\| X_1, X_2, \ldots, X_n \right\|;$$

$$\ln\overline{X} = \left\| \ln X_1, \ln X_2, \ldots, \ln X_n \right\|.$$

Таким образом, задача синтеза моделей с использованием упрощенного алгоритма МГУА, сводится к построению функции:

$$M\left(\ln Y/\overline{X}, \ln\overline{X}\right) = F\left(\ln Y/\overline{X}, \ln\overline{X}, \overline{\Theta}\right),$$

где $\left(\ln Y/\overline{X}, \ln \overline{X}\right)$ – математическое ожидание средней величины $\ln Y$ при значениях контролируемых переменных;

$F\left(\ln Y/\overline{X}, \ln \overline{X}\right)$ – неизвестный по виду и структуре оператор (функциональная связь);

$\Theta = \left\|\Theta_0, \Theta_1, \ldots, \Theta_n\right\|$ – неизвестный вектор оцениваемых параметров.

Для получения этих моделей необходимо, прежде всего, знать критерий приработки и критерий затупления. В качестве критерия затупления зуба фрезы после приработки была выбрана фаска затупления по задней поверхности $h_з = 0{,}3$ мм. Критерий приработки неизвестен, поэтому перед синтезом моделей возникала задача определения критерия приработки $h_{зпр}$.

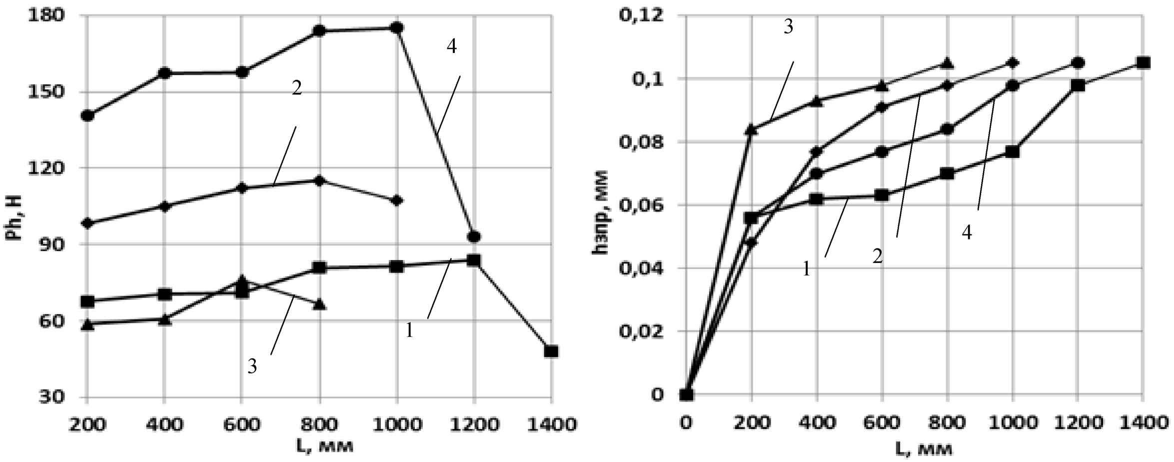
3.2. Определение критерия приработки

Определение критерия приработки проводилось на основании экспериментальных испытаний в присутствии отдельно каждой из технологических сред на различных режимах приработки (приложение В).

По каждому из экспериментов инструмент считался приработанным, когда кривая $h_{зпр} = f\,(L_{пр})$ изменила свой наклон ($h_{зпр}$ – фаска затупления на задней поверхности приработанного инструмента). В процессе приработки наряду с изменением наклона этой кривой измерялись значения составляющих усилий резания (P_h, P_v и P_y). Так как на заготовке длиной 200 мм было выполнено по семь уступов, что соответствовало количеству проходов в экспериментальных исследованиях, в конце каждого прохода соответственно измерялось значение фаски износа по задней поверхности и составляющие усилия резания.

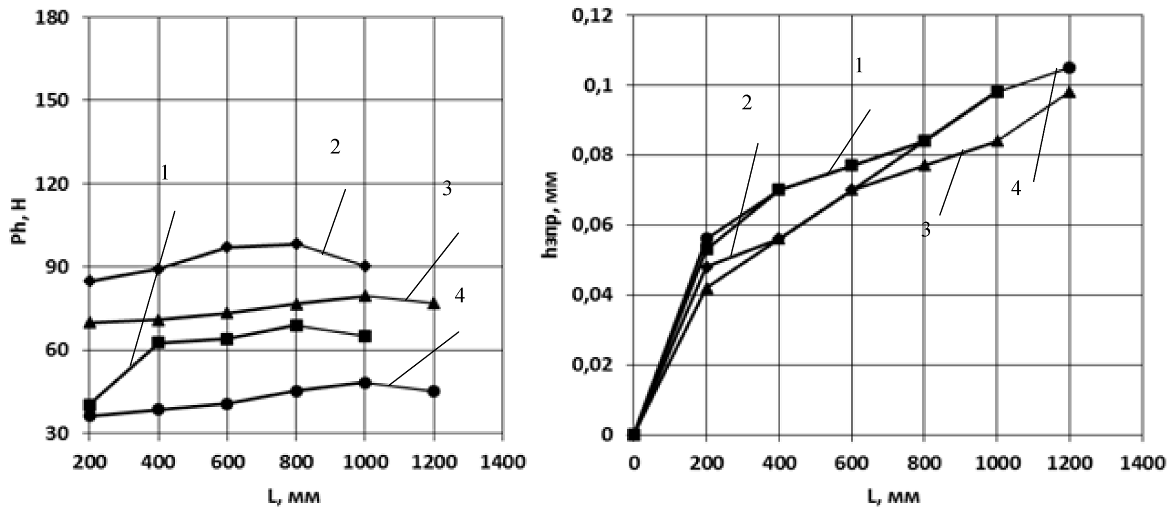
Анализ экспериментальных данных (приложение В) показал, что изменение фаски приработочного износа после каждого прохода (измерения) коррелируются с каждой из составляющих (P_h, P_v и P_y) силы резания. Для примера из матрицы экспериментальных данных (приложение А) было выбрано по четыре эксперимента с различными режимами приработки и построены графики изменений горизонтальной составляющей силы резания P_h и фаски износа по задней поверхности $h_{зпр}$ в процессе приработки в зависимости от пройденного пути инструмента после приработки, где L – длина одного прохода (L = 200 мм) на количество измерений (рис. 3.1, … 3.5).

Номера на графиках изменения P_h и $h_{зпр}$ соответствуют режимам, приведенным в приложении А для каждой из рассматриваемых СОТС.



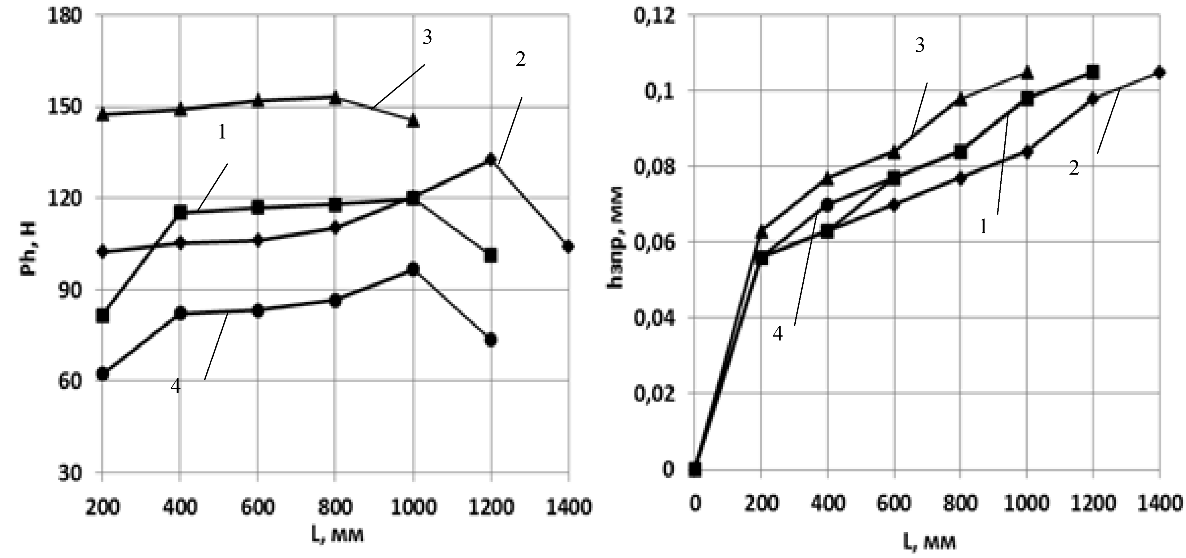
а) б)

Рис. 3.1. Изменение силы P_h а) и $h_{зпр}$ б) прирабатываемого инструмента при сухой обработке: **1)** – $V_{пр}$ = 19,45 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 1,6 мм; **2)** – $V_{пр}$ = 27,9 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,8 мм; **3)** – $V_{пр}$ = 15,5 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм; **4)** – $V_{пр}$ = 27,9 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм.



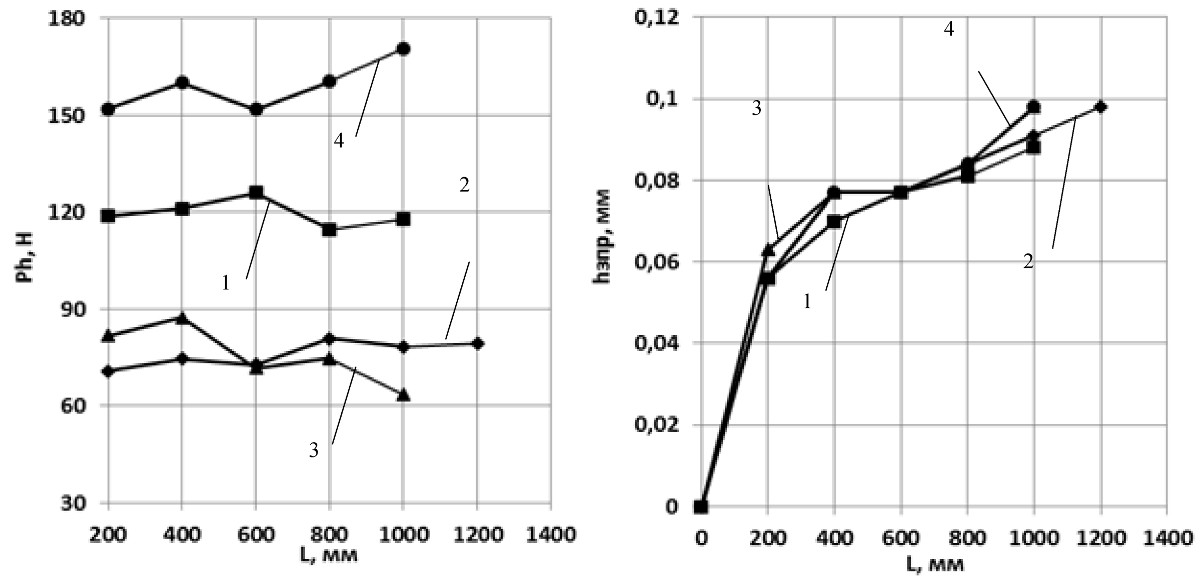
а) б)

Рис. 3.2. Изменение силы P_h а) и $h_{зпр}$ б) прирабатываемого инструмента в среде рапсового масла: 1) – $V_{пр}$ = 15,3 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм; **2)** – $V_{пр}$ = 15,5 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм; **3)** – $V_{пр}$ = 24,45 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 1,2 мм; **4)** – $V_{пр}$ = 12,27 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,4 мм.



а) б)

Рис. 3.3. Изменение силы P_h а) и $h_{зпр}$ б) прирабатываемого инструмента в среде И-20А: **1)** – $V_{пр}$ = 12,2 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм; **2)** – $V_{пр}$ = 19,25 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 1,6 мм; **3)** – $V_{пр}$ = 24,45 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм; **4)** – $V_{пр}$ = 27,53 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,8 мм.

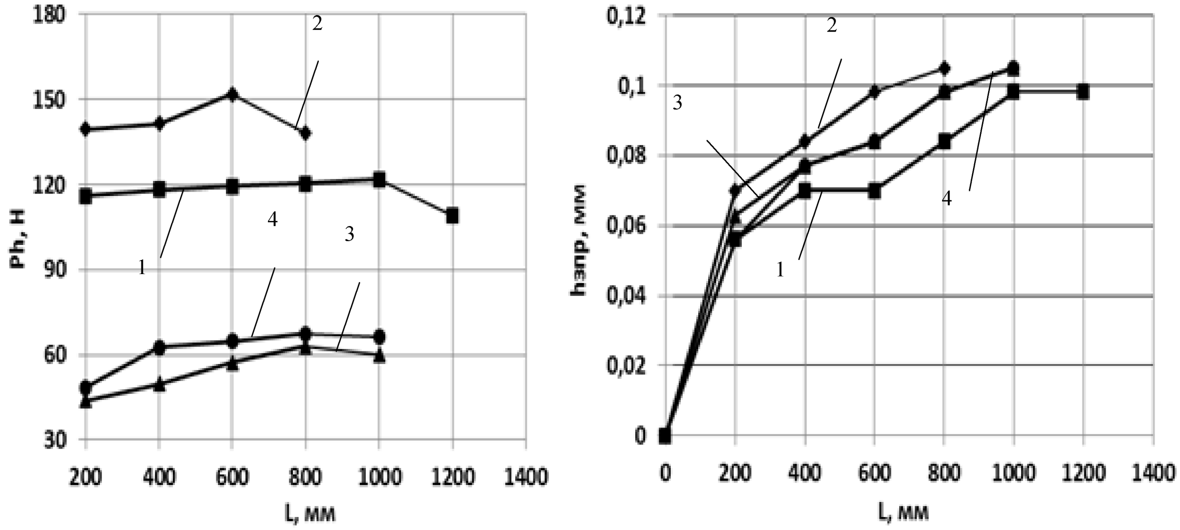


а) б)

Рис. 3.4. Изменение силы P_h а) и $h_{зпр}$ б) прирабатываемого инструмента в среде касторового масла: **1)** – $V_{пр}$ = 24,65 м/мин, S_z = 0,25 мм/зуб, t = 1,6 мм; **2)** – $V_{пр}$ = 19,35 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 0,8 мм; **3)** – $V_{пр}$ = 24,75 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 1,2 мм; **4)** – $V_{пр}$ = 15,47 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм.

Анализ изменения наклона фаски приработочного износа после каждого прохода (измерения) и соответствующих значений, составляющих сил резания показали, что они коррелируют между собой.

Установлено, что во всех случаях, кроме приработки зубьев фрез в среде касторового масла, увеличение фаски износа приработанного инструмента на задней поверхности происходит постепенно и сопровождается ростом силы резания, в частности ее составляющей P_h, до определенного значения, а затем снижения, которое показывает завершение образования вторичных упрочненных структур контактных слоев инструмента.



а) б)

Рис. 3.5. Изменение силы P_h а) и $h_{зпр}$ б) прирабатываемого инструмента в среде МР-99: **1)** – $V_{пр}$ = 15,3 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм; **2)** – $V_{пр}$ = 19,29 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,8 мм; **3)** – $V_{пр}$ = 27,7 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 2,0 мм; **4)** – $V_{пр}$ = 24,6 м/мин, S_z = 0,25 мм/зуб, t = 0,4 мм.

Такое изменение составляющей силы резания P_h может объясняться тем, что одновременно происходит упрочнение контактных слоев инструмента и срезаемого слоя пластического материала, каковым является сталь 12Х18Н10Т. Поэтому при резании пластичного материала в начале наблюдается его пластическое разрушение с постепенным упрочнением. При достижении определенной величины упрочнения срезаемый слой становится хрупким, происходит хрупкое разрушение, при котором сила резания снижается.

В этом случае, за критерий приработки, при котором образуются упрочненные контактные слои инструмента, следует принимать значение фаски износа по задней поверхности, после которого наблюдается снижение составляющей силы резания P_h.

Анализ количества измерений приработочного износа и составляющих силы резания во время приработки показывает, что время приработки зависит от режимов резания.

Установлено также, что в присутствии касторового масла приработка осуществляется быстрее.

Наибольшее значение силы резания в присутствии исследуемых сред, кроме касторового масла, соответствует изменению наклона кривой износа при приработке.

Таким образом, инструмент считался приработанным (на режимах $V_{пр}$ = 15,5 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм) при обработке всухую и в присутствии МР-99, И-20А – $h_{зпр}$ = 0,098 ÷ 0,1 мм и в среде рапсового масла – $h_{зпр}$ = 0,084 мм. Значение $h_{зпр}$ в среде касторового масла принято равным 0,07 ÷ 0,077 мм, что соответствует первой ступени изменения наклона кривой.

Проведенные исследования по определению критерия износа приработки в среде различных СОТС показывают, что процесс образования вторичных упрочненных слоев резанием в среде касторового масла отличается от других исследуемых сред, что требует дополнительных исследований.

В этой связи возникает задача определения влияния режимов резания на силовые характеристики приработки, по которым можно будет на основании результатов стойкостных исследований рекомендовать рациональные режимы приработки.

Для этого по экспериментальным данным были построены соответствующие модели в виде зависимостей $P_h = f(V_{пр}, S_z, t)$, $P_v = f(V_{пр}, S_z, t)$ и $P_y = f(V_{пр}, S_z, t)$ в присутствии различных технологических сред.

3.3. Моделирование силовых характеристик для различных условий приработки

Процесс резания как подсистема механической обработки (в данных исследованиях фрезерование стали 12Х18Н10Т фрезами из быстрорежущей стали Р6М5) сопровождается совокупностью физико-механических явлений [1, 4, 100], которые тесно взаимосвязаны между собой. Явления, сопровождающие процесс резания, определяются их характеристиками.

Учитывая, что деформационное упрочнение зависит при определенной температуре от удельных нагрузок на упрочняемой поверхности [3, 15, 16, 100], которые в свою очередь коррелируются с составляющими сил резания, можно утверждать, что увеличение или уменьшение последних приводит к изменению удельных нагрузок. Для заданных условий обработки изменение режимов резания приводит к изменению сил и соответственно удельных нагрузок на упрочняемую поверхность.

Таким образом, определяя силовое нагружение в диапазоне изменений приработочных режимов резания, с использованием различных СОТС можно будет установить наиболее рациональные для обеспечения формирования упрочненных вторичных структур. Силовое нагружение на трущейся поверхности опосредственно характеризуется усилием резания. Поэтому по экспериментальным данным с использованием МГУА получили модели в виде зависимостей составляющих сил резания от режимных факторов для каждого вида технологической среды, в том числе и в присутствии воздуха, т.е. без применения СОТС.

Для моделирования силовых характеристик в условиях приработки цилиндрических фрез в качестве контролируемых переменных были выбраны скорость приработки $V_{пр}$ (м/мин), подача на зуб – S_z (мм/зуб) и глубина фрезерования – t (мм). В качестве выходных параметров служили горизонтальная составляющая силы резания – P_h (Н), вертикальная – P_v (Н) и составляющая – P_y (Н). Значения, этих составляющих сил резания по приработочному износу для каждой точки эксперимента сведены в таблицу (Приложение Б).

По аналогии с моделированием стойкости синтез модели силовых характеристик приводился в пространстве $\overline{X}$, $\ln\overline{X}$, а составляющие силы резания в $\ln\overline{Y}$.

В результате моделирования получены следующие зависимости составляющих сил резания от приработочных режимных параметров.

Модель составляющих сил резания после приработки для сухой обработки:

$$\ln P_h = 3{,}72 + 1{,}46 \cdot t + 1{,}03 \cdot \ln t \cdot \ln S_z \cdot t^2 - 7{,}65 \cdot 10^{-2} \cdot (\ln t)^2 \cdot (\ln S_z)^2 \cdot \\ \cdot t^3 - 3{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot \ln V_{пр} \cdot t \cdot V_{пр} \quad (3.1)$$

$$\ln P_v = 3{,}84 + 6{,}22 \cdot 10^{-2} \cdot V_{пр} \cdot t - 1{,}61 \cdot 10^{-3} \cdot V_{пр}^2 \cdot t + \\ + 4{,}12 \cdot 10^{-6} \cdot \ln V_{пр} \cdot \ln S_z \cdot V_{пр}^2 \cdot t^2 \quad (3.2)$$

$$\ln P_y = 2{,}21 + 1{,}38 \cdot 10^{-1} \cdot \ln S_z \cdot \ln V_{пр} - 7{,}14 \cdot 10^{-2} \cdot \ln S_z \cdot \ln t - \\ - 9{,}63 \cdot 10^{-4} \cdot (\ln S_z)^4 \cdot \ln t \cdot \ln V_{пр} + 4{,}75 \cdot 10^{-7} \cdot V_{пр}^2 \cdot (\ln S_z)^5 \cdot \\ \cdot \ln t \cdot (\ln V_{пр})^2 + 1{,}44 \cdot 10^{-1} \cdot (\ln S_z)^2 \cdot \ln t \cdot S_z \quad (3.3).$$

Относительная ошибка полученных зависимостей соответственно составляет 4% (P_h), 10% (P_v) и 16% (P_y).

Зависимости составляющих сил резания от режимов приработки в присутствии касторового масла имеют вид:

$$\ln P_h = 3{,}98 + 3{,}63 \cdot S_z \cdot t - 5{,}47 \cdot 10^{-2} \cdot S_z \cdot V_{пр} \quad (3.4)$$

$$\ln P_v = 3{,}41 + 4{,}38 \cdot S_z \cdot t - 1{,}6 \cdot S_z - 4{,}27 \cdot S_z^4 - 3{,}65 \cdot S_z^5 + 2{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot V_{пр}^2 \quad (3.5)$$

$$\ln P_y = 0{,}26 + 1{,}28 \cdot S_z \cdot t - 2{,}8 \cdot S_z^3 \cdot V_{пр} \cdot t^2 + 2{,}64 \cdot S_z - \\ - 1{,}06 \cdot t + 3{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 \cdot S_z^3 \cdot V_{пр}^3 \quad (3.6).$$

Относительная ошибка зависимостей (3.4, 3.5 и 3.6) составляет соответственно 5%, 6,8% и 9%.

Зависимости составляющих сил резания от $V_{пр}$, S_z и t при фрезеровании в присутствии СОТС МР-99:

$$\ln P_h = 4{,}1 + 2{,}74 \cdot 10^{-2} \cdot \ln t \cdot V_{пр} + 7{,}1 \cdot S_z^2 + 2{,}58 \cdot 10^{-1} \cdot \ln t^2 \quad (3.7)$$

$$\ln P_v = 3{,}57 + 2{,}02 \cdot S_z \cdot t + 1{,}83 \cdot S_z^3 \cdot V_{np} \cdot t^2 - 7{,}19 \cdot 10^{-1} \cdot (\ln V_{np})^2 \cdot S_z^5 \cdot t^3 \qquad (3.8)$$

$$\begin{gathered} \ln P_y = 1{,}42 - 3{,}06 \cdot 10^{-1} \cdot t \cdot \ln S_z + 3{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot V_{np}^2 \cdot t \cdot \ln S_z + 3{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot \\ \cdot V_{np} \cdot \ln S_z - 4{,}34 \cdot (\ln t)^2 \cdot V_{np}^2 \cdot (\ln S_z)^2 \end{gathered} \qquad (3.9).$$

Их относительная ошибка соответствовала для P_h – 2%, P_v – 6% и для P_y – 11%.

Модели составляющих сил резания в присутствии И-20А:

$$\ln P_h = 4{,}28 + 1{,}38 \cdot t + 1{,}42 \cdot 10^{-1} \cdot \ln S_z \cdot \ln V_{np} \cdot t + 3{,}96 \cdot 10^{-1} \cdot S_z^2 \qquad (3.10)$$

$$\ln P_v = 3{,}91 + 5{,}2 \cdot t \cdot S_z - 2{,}34 \cdot 10^{-1} \cdot (\ln V_{np})^2 \cdot S_z \cdot t - 7{,}36 \cdot (\ln V_{np})^4 \cdot S_z^2 \cdot t^2 \qquad (3.11)$$

$$\ln P_y = 1{,}37 + 6{,}7 \cdot 10^{-1} \cdot t + 9{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln S \cdot V_{np} \cdot t + 3{,}4 \cdot 10^{-1} \cdot S_z \cdot t \qquad (3.12).$$

Относительная ошибка этих моделей для P_h, P_v и P_y соответственно равна 3,5%, 2,4% и 4,8%.

Модели, составляющих сил резания во время приработки в присутствии рапсового масла имеют вид:

$$\begin{gathered} \ln P_h = 3{,}82 - 4{,}3 \cdot 10^{-1} \cdot t \cdot \ln t - 4{,}41 \cdot 10^{-1} \cdot \ln S_z \cdot t \cdot \ln t + \\ + 1{,}69 \cdot 10^{-1} \cdot \ln V_{np} \end{gathered} \qquad (3.13)$$

$$\begin{gathered} \ln P_v = 2{,}42 - 3{,}71 \cdot 10^{-2} \cdot V_{np} \cdot \ln t + 5{,}91 \cdot 10^{-1} \cdot \ln V_{np} \cdot t - \\ - 7{,}37 \cdot 10^{-3} \cdot {V_{np}}^2 \cdot S_z \cdot \ln t \end{gathered} \qquad (3.14)$$

$$\begin{gathered} \ln P_y = 1{,}48 - 4{,}02 \cdot 10^{-1} \cdot t \cdot \ln S_z - 1{,}7 \cdot 10^{-2} \cdot \ln t \cdot V_{np} - \\ - 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot V_{np} \cdot (\ln S_z)^2 \cdot \ln t + 4{,}96 \cdot 10^{-2} \cdot t \cdot (\ln t)^3 \cdot \\ \cdot (\ln S_z)^2 - 3{,}82 \cdot 10^{-2} \cdot (\ln S_z)^2 \cdot \ln t \end{gathered} \qquad (3.15).$$

Относительные ошибки этих моделей 3,13, 3,14 и 3,15 соответственно равны 15%; 16% и 12%.

Модели (3.13, …, 3.15) были построены при использовании отдельно для каждой из технологических сред. Это вызвано тем, что каждая технологическая среда отличается друг от друга своими физико-химическими характеристиками и свойствами, определяющими их действие.

Анализируя протокол измерений составляющих сил резания P_h, P_v и P_y по каждой точке эксперимента в присутствии различных сред отметим, что наибольшее значение во всех случаях имела составляющая P_h, уменьшение P_v и P_y по отношению к P_h зависело от режимов резания, на которых происходила приработка. Это прослеживается и по структурам моделей $P_h = f(V_{пр}, S_z, t)$, $P_v = f(V_{пр}, S_z, t)$ и $P_y = f(V_{пр}, S_z, t)$.

Анализ полученных моделей, составляющих силы резания показывает, что их значение зависит от взаимосвязанного влияния режимов резания. При этом согласно их структуры на значение P_h, P_v и P_y наибольшее влияние оказывают глубина резания и подача на зуб.

Определив усилия резания при приработке в различных условиях обработки и сопоставляя с условиями полученной стойкости можно установить наиболее рациональные режимы формирования упрочненных вторичных структур.

3.4. Моделирование стойкости цилиндрических фрез, упрочненных резанием с использованием различных СОТС

3.4.1. Определение возможности использования значения адгезионной составляющей коэффициента трения в качестве критерия оценки СОТС. На первом этапе моделирования определялась возможность использования значение адгезионной составляющей коэффициента трения μ_a в качестве критерия оценки СОТС, как обобщенного параметра, несущего в себе информацию о различных эффектах СОТС.

Значения μ_a определены для исследуемых технологических сред в разделе 2 [86].

Определение возможности использования μ_a для оценки свойств той или иной среды проводилось на основе синтеза модели по экспериментальным данным в виде зависимости стойкости от режимов приработки, режимов резания приработанным инструментом и значения адгезионной составляющей исследуемых СОТС. Матрица экспериментальных данных приведена в приложении В.

В результате обработки экспериментальных данных была получена модель, которая с точностью 35%, описывает зависимость стойкости от исследуемых переменных:

$$\begin{aligned} \ln T = 7{,}36 + 1{,}16\cdot 10^{+1}\cdot \ln S_z \cdot S_z + 2{,}77\cdot 10^{-1}\cdot \ln t\cdot \ln \mu_a \cdot (\ln S_z)^2\cdot \\ \cdot S_z^2 + 3{,}3\cdot 10^{-1}\cdot (\ln t)^2\cdot (\ln S_z)^3\cdot \ln \mu_a \cdot S_z^2 - 1{,}23\cdot 10^{+1}\cdot \mu_a\cdot (\ln t)^4\cdot (\ln \mu_a)^2\cdot \\ \cdot (\ln S_z)^5\cdot S_z^4 + 1{,}18\cdot \mu_a\cdot \ln V_c\cdot \ln t\cdot \ln \mu_a\cdot (\ln S_z)^3\cdot S_z^3 \end{aligned} \quad (3.16).$$

Анализ структуры модели показывает, что в пределах изменения исследуемых переменных процесса цилиндрического фрезерования наибольшее влияние на стойкость инструмента после приработки оказывает подача на зуб S_Z мм/зуб и скорость резания после приработки V_c м/мин.

В структуру модели не входит скорость приработки, которая является одним из основных режимных параметров приработки, определяющим степень образования вторичных упрощенных структур на поверхностях инструмента. За результатами моделирования зависимости стойкости инструмента от μ_a, коэффициент μ_a незначимо влияет на стойкость. Это не подтверждается основными положениями теории резания [1-4, 15, 100-105] и опытом использования различных СОТС в производстве, т.е. адгезионная составляющая коэффициента трения не может быть принята в качестве обобщенной характеристикой свойств СОТС. Поэтому не представляется возможным синтезировать одну модель, по которой можно было определять стойкость фрез в зависимости от вида различных СОТС.

Таким образом возникает задача построения моделей в виде зависимостей $T = f(V_{пр}, S_Z, V_c, t)$ при использовании отдельно каждой из СОТС.

3.4.2. Моделирование стойкости фрез с использованием каждой из исследуемых СОТС. Для построения моделей типа $T = f\,(V_{пр}, S_z, V_c, t)$ с использованием той или иной технологической среды был составлен план из расчета 5 опытов на одну переменную, согласно которому была реализована матрица экспериментальных данных (Приложение Б).

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие модели, адекватно описывающие процесс:

– МР-99 (относительная ошибка – 9%)

$$\begin{aligned}\ln T = 5{,}16 - 1{,}2 \cdot t \cdot S_z - 1{,}28 \cdot 10^{-1} \cdot S_z \cdot V_c + 1{,}165 \cdot 10^{-4} \cdot \ln V_c \cdot V_c^2 \cdot S_z + \\ + 1{,}215 \cdot 10^{-1} \cdot \ln t \cdot t - 2{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot V_{пр} \cdot S_z^3 \cdot t \cdot \ln V_c \cdot V_c^2\end{aligned} \qquad (3.17)$$

– рапсовое масло (относительная ошибка – 8%)

$$\begin{aligned}\ln T = 5{,}33 + 2{,}03 \cdot 10^{-2} \cdot S_z \cdot V_c + 5{,}47 \cdot 10^{-3} \cdot \ln S_z \cdot \ln V_{пр} \cdot S_z^2 \cdot V_c^2 + \\ + 1{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot \ln t \cdot V_{пр} \cdot \ln S_z \cdot \ln V_{пр} \cdot S_z^2 \cdot V_c^2\end{aligned} \qquad (3.18)$$

– касторовое масло (относительная ошибка – 10%)

$$\begin{aligned}\ln T = 6{,}38 - 4{,}94 \cdot 10^{-1} \cdot S_z \cdot V_{пр} - 6{,}88 \cdot 10^{-2} \cdot \ln t \cdot V_{пр} - 1{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot \ln V_c \cdot V_c + \\ + 8{,}67 \cdot 10^{-4} \cdot V_c \cdot t \cdot S_z^2 \cdot V_{пр}^2 + 1{,}29 \cdot 10^{-5} \cdot t \cdot V_c^2 \cdot \ln V_c \cdot S_z \cdot V_{пр}\end{aligned} \qquad (3.19)$$

– И-20А (относительная ошибка – 12%)

$$\begin{aligned}\ln T = 4{,}11 - 1{,}04 \cdot 10^{-3} \cdot V_{пр} \cdot V_c + 2{,}99 \cdot 10^{-1} \cdot (\ln S_z)^2 - \\ - 1{,}03 \cdot 10^{-1} \cdot \ln V_c \cdot S_z \cdot (\ln S_z)^2\end{aligned} \qquad (3.20)$$

– всухую (относительная ошибка – 9%)

$$\begin{aligned}\ln T = 4{,}598 - 2{,}21 \cdot 10^{+1} \cdot S_z^2 - 3{,}83 \cdot 10^{-1} \cdot t \cdot \ln t - 1{,}96 \cdot 10^{-3} \cdot V_{пр}^2 \cdot S_z^2 - \\ - 4{,}65 \cdot 10^{-2} \cdot \ln V_c \cdot (\ln t)^3 \cdot t - 3{,}23 \cdot S_z^3 \cdot t^3 \cdot \ln V_c \cdot (\ln t)^3\end{aligned} \qquad (3.21).$$

Анализ структур полученных моделей показывает, что режимные параметры оказывают влияние на стойкость во взаимосвязи друг с другом. Следует отметить, что в присутствии индустриального масла И-20А, в выбранных пределах изменения глубина резания на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т практически не оказывает влияния.

Исследуя структуру каждой из полученных моделей можно прийти к следующим заключениям. При использовании МР-99 наибольшее влияние на стойкость инструмента оказывают во взаимосвязи подача на зуб и скорость фрезерования после приработки и наименьшее скорость приработки, что свидетельствует о том, что оптимальное условие приработки не найдено.

В присутствии рапсового масла первостепенное влияние на стойкость зубьев фрезы аналогично МР-99 принадлежит S_z и V_c, а наименьшее глубине резания t.

При фрезеровании в среде касторового масла первостепенное влияние на стойкость инструмента оказывает скорость приработки в совокупности с подачей и глубиной резания.

Фрезерование в среде И-20А, прежде всего, определяется взаимосвязью скорости приработки с эксплуатационной скоростью после приработки и в меньшей степени с подачей на зуб.

Стойкость инструмента при сухой обработке, прежде всего, зависит от глубины резания, а затем от взаимообусловленного влияния подачи и скорости приработки.

3.5. Моделирование шероховатости обработанной поверхности

При моделировании шероховатости поверхности рассматривают расчетную и действительную шероховатость обработанной поверхности. На образование шероховатости действуют множество случайных факторов, которые расчетным путем точно не могут быть определены [2]. Поэтому шероховатость обработанной поверхности определяется, как правило, экспериментально для каждого исследуемого случая.

Известно [1, 2, 4, 40, 101-104], что на шероховатость поверхности влияет изменение режимов резания, геометрия инструмента и технологическая среда. Именно режимами резания, геометрией инструмента и подбором СОТС для заданных обрабатываемого и инструментального материалов уменьшают влияние негативных факторов на шероховатость обработанной поверхности.

Наряду со стойкостью инструмента шероховатость является важной характеристикой его работоспособности. Поэтому для разработки рекомендаций по повышению работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса за счет эффективного использования СОТС определение шероховатости обработанной поверхности при использовании различных сред является одной из основных.

Рассматривая основные способы управления шероховатостью (режимы резания, геометрия инструмента, технологическая среда) при заданной геометрии зубьев фрез для каждой из СОТС можно изменяя режимы резания получать необходимую шероховатость поверхности. Для этого с использованием, аналогично предыдущим случаям, на основе экспериментальных данных (Приложение Б) с использованием МГУА построим модели $R_a = f(V_c, S_z, t)$. Модели для каждой из исследуемых технологических сред синтезируем для приработанных инструментов.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие модели:

- сухая обработка (относительная ошибка – 8%);

$$\begin{aligned} \ln R_a = 1{,}1 + 6{,}19 \cdot 10^{-2} \cdot V_c \cdot t + 3{,}45 \cdot 10^{-3} \cdot S_z \cdot \ln S_z \cdot V_c^2 \cdot t^2 + \\ + 6{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \cdot \ln V_c \cdot V_c + 2{,}15 \cdot S_z \cdot t \end{aligned} \qquad (3.22)$$

- рапсовое масло (относительная ошибка – 18%);

$$\ln R_a = -0{,}78 + 1{,}18 \cdot 10^{-1} \cdot V_c \cdot S_z + 1{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot V_c^3 \cdot \ln t \cdot S_z^2 \qquad (3.23)$$

- И-20А (относительная ошибка – 12%);

$$\ln R_a = 1{,}97 + 5{,}87 \cdot S_z \cdot \ln t - 4{,}098 \cdot 10^{-1} \cdot V_c \cdot S_z^2 \cdot \ln t \qquad (3.24)$$

- касторовое масло (относительная ошибка – 9%);

$$\ln R_a = -0{,}51 + 2{,}44 \cdot S_z \cdot t - 9{,}6 \cdot 10^{-2} \cdot V_c \cdot S_z^{\,3} \cdot t^2 \qquad (3.25)$$

- МР-99 (относительная ошибка – 23%);

$$\begin{aligned}\ln R_a = 1{,}59 - 5{,}76 \cdot 10^{-1} \cdot V_c \cdot S_z + 4{,}21 \cdot 10^{-2} \cdot S_z^{\,2} \cdot V_c^{\,2} + \\ + 6{,}27 \cdot 10^{-5} \cdot \ln t \cdot S_z^{\,5} \cdot V_c^4\end{aligned} \qquad (3.26).$$

Анализ структур полученных моделей (3.22, …, 3.26) в виде зависимостей шероховатости от режимов фрезерования после приработки инструмента с использованием каждой из исследуемых технологических сред показывает, что на шероховатость обрабатываемой поверхности оказывают влияние во взаимосвязи друг с другом все исследуемые параметры режимов резания.

Вместе с тем, не зависимо от среды, в присутствии которой были получены модели, описывающие шероховатость поверхности в пределах исследуемых переменных, согласно им первостепенное влияние на шероховатость поверхности оказывает глубина резания t во взаимосвязи с подачей S_z и скорость резания после приработки V_c.

Однако, в работах [1-3, 40] отмечается, что глубина резания на высоту неровностей (шероховатость) обработанной поверхности не оказывает значительного влияния.

Такое противоречие с установившимся в теории резания представлении о влиянии глубины резания на шероховатость поверхности может быть объяснено с одной стороны тем, что исследования по взаимосвязанному влиянию режимов резания приработанным инструментом с использованием различных сред ранее не проводилось. Это влияние глубины резания при фрезеровании таким инструментом может являться результатом изменения физико-механических свойств контактируемых поверхностей за счет образования упрочненных вторичных структур на трущихся поверхностях в результате приработки резанием, что требует дальнейших исследований.

Такое влияние глубины резания на шероховатость может также объясняться и различным силовым нагружением. Так в работах [1-4, 40] отмечается взаимосвязанное влияние на усилия резания глубины и подачи на зуб. При этом глубина резания оказывает большее влияние, нежели подача на зуб.

Изменение силового нагружения, в свою очередь оказывает влияние на все явления, сопровождающие процесс резания для любого вида обработки и определяет интенсивность случайных факторов, влияющих на шероховатость обработанной поверхности.

Степень влияния каждого из режимов резания на шероховатость может быть определена дальнейшими исследованиями каждого из них по модели с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов по модели.

Выводы

1. Впервые при моделировании основных характеристик процесса фрезерования стали 12Х18Н10Т фрезами из быстрорежущей стали был использован алгоритм МГУА, обеспечивающий синтез моделей по не большому количеству экспериментальных данных в выбранных пределах изменения исследуемых переменных.

2. Показано, что окончание формирования вторичных упрочненных слоев характеризуется наибольшим значением горизонтальной составляющей силы резания P_h во время приработки после достижения, которого P_h снижается. Значение P_h для каждой из исследуемых СОТС зависит от режимов приработки и соответствует определенному значению фаски износа по

задней поверхности инструмента $h_{зпр}$, которое определяется технологической средой.

3. Установлено, что адгезионная составляющая коэффициента трения μ_a не может служить обобщенной характеристикой СОТС, так как не несет информацию об эффектах каждой из них.

4. Впервые получены модели в виде зависимостей стойкости от режимных параметров для каждой из исследуемых СОТС с учетом, как режимов приработки, так и последующих режимов эксплуатации, упрочненного приработкой инструмента, а также модели шероховатости обработанной поверхности в виде зависимости $R_a = f(V_c, S_z, t)$.

РАЗДЕЛ 4

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА, ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ

Основным показателем работоспособности инструмента является его стойкость. Установлено [15, 24, 41, 46, 47], что стойкость для заданных инструментального обрабатываемого материалов, вида обработки, инструмента и режимов резания во многом определяется упрочняющим действием условий приработки.

Прежде всего к условиям, определяющим упрочняющее действие приработки, относится режимы упрочняющей приработки и среда, в которой осуществляется этот процесс.

Так как на первом этапе исследований было показано, что адгезионная составляющая коэффициента трения не в полной мере может служить оценкой трибологических свойств различных СОТС, что для каждой из сред были синтезированы модели в виде зависимостей стойкости инструмента (без учета времени приработки) от скорости приработки, подаче на зуб, скорости резания и глубины - $T = f(V_{пр}, S_z, V_c, t)$. На основании исследования влияния на стойкость инструмента контролируемых переменных ($V_{пр}$, S_z, V_c, t) можно установить, как режимы упрочняющей приработки, обеспечивающие её наибольший эффект, так и рекомендуемые режимы резания после упрочнения контактных поверхностей инструмента.

Учитывая, что диапазон изменения режимных параметров охватывает чистовое и получистовое фрезерование, важной характеристикой для этих условий является шероховатость обработанной поверхности.

Исследование влияния режимных параметров на шероховатость обработанной поверхности с использованием рассматриваемых СОТС в сравнении с сухой обработкой наряду с их влиянием на стойкость инструмента является основой разработки рекомендаций по назначению режимов резания и выбору СОТС для заданных условий обработки.

4.1. Влияние исследуемых переменных на стойкость инструмента

Исследование каждой из рассматриваемых переменных проводилось по графическим зависимостям стойкости от каждой из переменных, полученных соответственно по моделям (3.17, …, 3.21) с последующей постановкой контрольных опытов изложены в работах [104-106].

Так, на рис. 4.1 представлены зависимости Т = f (S_z) стойкости инструмента от подачи на зуб для различных СОТС. Анализ этих зависимостей показывает, что наибольшее влияние на стойкость оказывает подача на зуб (S_z) в присутствии касторового масла (графики 4). При том интенсивность ее влияния на стойкость в большей степени проявляется при скорости приработки $V_{пр}$ = 28 м/мин.

При приработке со скоростью $V_{пр}$ = 28 м/мин, подачей S_z = 0,1 мм/зуб стойкость фрезы в среде касторового масла достигает 347 мин, т.е. более чем в 3,4 раз выше стойкости фрезы при сухой обработке (графики 1) приработанным инструментом на тех же режимах.

Однако стойкость фрезы при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин равна 272 мин, т.е. почти в 1,3 раза ниже, чем при исследуемой максимальной скорости приработки. При подаче S_z = 0,3 мм/зуб как при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин, стойкость фрез в присутствии касторового масла соответственно почти в 4 и выше стойкости при сухой обработке на тех же режимах. В тоже время при $V_{пр}$ = 28 м/мин и S_z=0,3мм/зуб она соизмерима со стойкостью при сухой обработке (Т = 16,8 мин – сухая обработка и Т = 18,5 мин – касторовое масло).

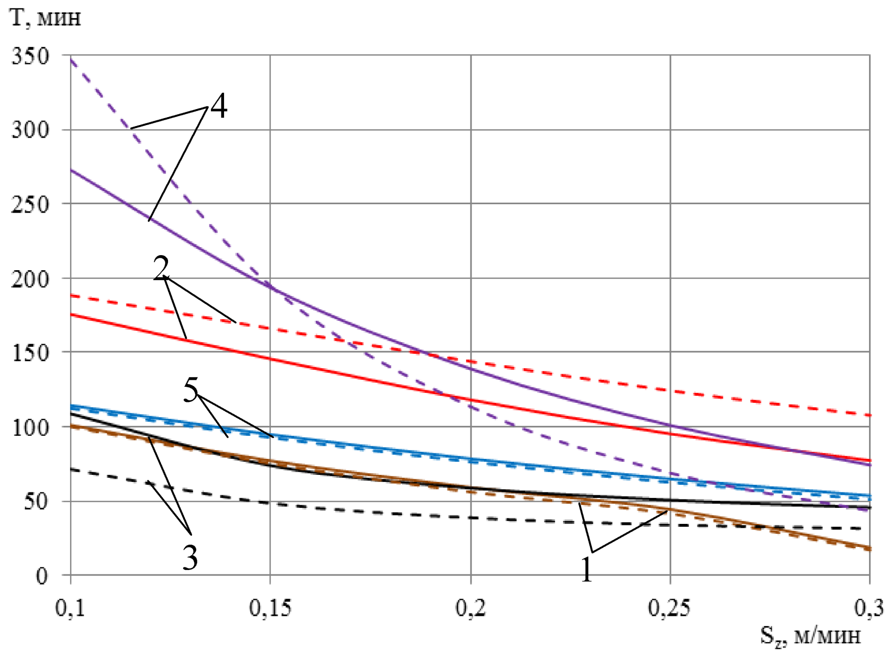


Рис. 4.1. Зависимость $T = f\ (S_z)$: 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ——— $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; ------- $V_{пр}$ = 28 м/мин; V_c = 28 м/мин; t = 0,4 мм.

Использование рапсового масла при S_z = 0,15 мм/зуб, $V_{пр}$ = 15,5 м/мин и при $V_{пр}$ = 28 м/мин соответственно повышает стойкость фрез в 1,9 и 2,2 раза в сравнении с сухой обработкой.

Увеличение подачи при фрезеровании в присутствии рапсового масла оказывает меньшее влияние на стойкость инструмента в сравнении с использованием касторового. Так увеличение S_z от 0,1 мм/зуб до 0,3 мм/зуб с использованием рапсового масла при режимах резания t = 0,4 мм, V_c = 28 м/мин вызывает снижение стойкости, соответственно при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин и $V_{пр}$ = 28 м/мин в 2,3 и 2,8 раза, в то время как при касторовом масле в 3,6 и 8 раз.

Проведенный анализ графических зависимостей показывают, что при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин в диапазоне S_z от 0,1 мм/зуб до 0,2 мм/зуб лучшие результаты по стойкости инструмента наблюдаются при использовании касторового масла. При приработке зубьев фрез со скоростью $V_{пр}$ = 28 м/мин наблюдается повышение их стойкости при использовании касторового масла до S_z = 0,15 мм/зуб.

На рис. 4.2 приведены графические зависимости T = f ($V_{пр}$) стойкости инструмента от скорости приработки.

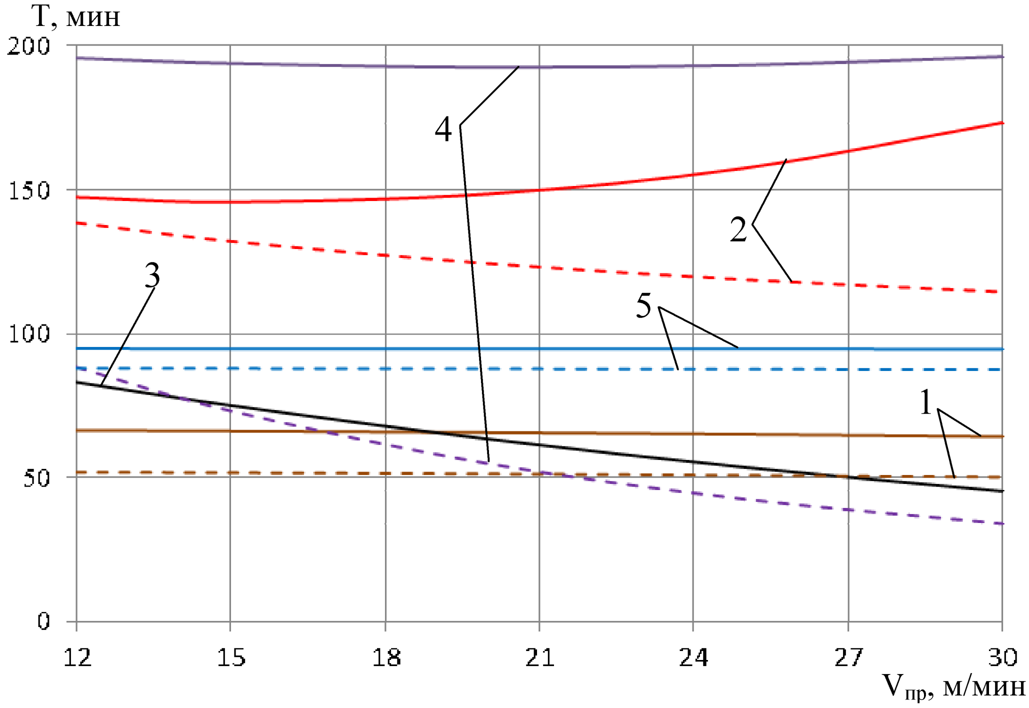


Рис. 4.2. Зависимость T = f ($V_{пр}$): 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ——— t = 0,4 мм;------t = 1,2 мм; V_c = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб.

Их анализ показывает, что во всем диапазоне принятого в исследованиях изменения скорости приработки и одних и тех же значениях подачи на зуб S_z = 0,15 мм/зуб и скорости фрезерования после приработки V_c = 28 м/мин, при малых глубинах резания t = 0,4 мм скорость приработки в присутствии касторового масла практически не оказывает влияния на стойкость зубьев фрез.

В тоже время при глубине фрезерования t = 1,2 мм с повышением скорости приработки снижается стойкость инструмента. Так, в исследуемом диапазоне скоростей приработки с ее увеличением наблюдается снижение стойкости в 2,2 раза. Это позволяет утверждать, что приработка в присутствии касторового масла должна осуществляться при малых глубинах резания не зависимо от скорости приработки $V_{пр}$.

При использовании рапсового масла наблюдается меньшее влияние скорости приработки на стойкость инструмента в сравнении с касторовым. Так при глубине резания t = 0,4 мм – наблюдается снижение стойкости с увеличением скорости приработки в исследуемом диапазоне около 14%, а при t = 1,2 мм – 19%.

При сухой обработке и при фрезеровании в присутствии МР-99 скорость приработки в исследуемом диапазоне ее изменения практически не оказывает влияния на стойкость зубьев фрез. С увеличением скорости приработки при фрезеровании с использованием И-20А стойкость зубьев фрезы снижается на 1,8 раза.

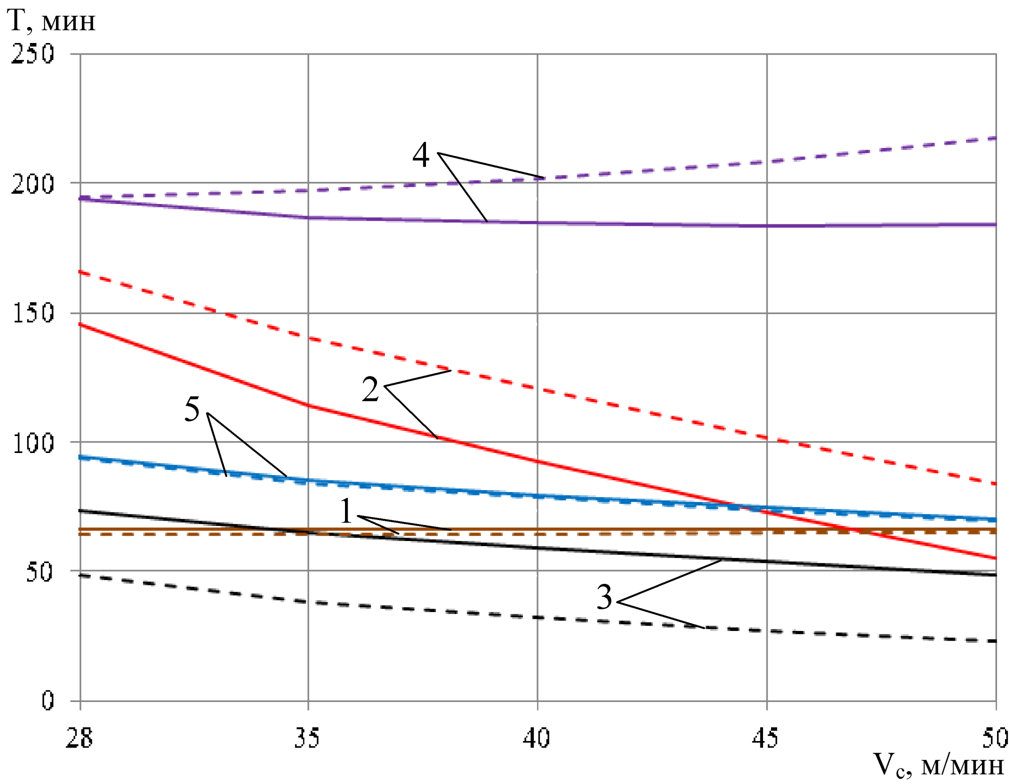


Рис. 4.3. Зависимость T = f (V_c): 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ——— $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; ------- $V_{пр}$ = 28 м/мин; t = 0,4 мм.

На рис. 4.3 приведены графические зависимости стойкости зубьев фрез от скорости фрезерования, приработанных на скоростях приработки $V_{пр}$ = 15,5 м/мин и $V_{пр}$ = 28 м/мин.

Их анализ показывает, что наибольшее влияние на стойкость оказывает скорость фрезерования в присутствии рапсового масла. С увеличением скорости фрезерования V_c в пределах от 28 м/мин до 50 м/мин стойкость снижается для $V_{пр}$ = 15,5 м/мин в 2,6 раза, для $V_{пр}$ = 28 м/мин – в 1,9 раза.

При использовании касторового масла при принятых режимных параметрах приработки и дальнейшей эксплуатации фрез увеличение скорости резания V_c оказывает меньше влияния в сравнении с рапсовым маслом (графики 2 и 4). Такое влияние скорости фрезерования приработанным инструментом на стойкость может объясняться состоянием контактных слоев, образуемых во время приработки и дальнейшей эксплуатации инструмента.

Увеличение скорости V_c в рассматриваемом диапазоне ее изменения уменьшает стойкость фрез в присутствии МР-99 менее чем на 10%, не зависимо от значения скорости приработки, и в присутствии И-20А стойкость уменьшается на 35÷50% в зависимости от скорости приработки. При сухой обработке скорость фрезерования V_c при S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,4 мм не зависимо от $V_{пр}$ не оказывает влияния на изменение стойкости инструмента.

Анализ графических зависимостей стойкости зубьев фрез от глубины резания (рис. 4.4) показывает, что при фрезеровании с подачей S_z = 0,15 мм/зуб и V_c = 28 м/мин наибольшее влияние глубины резания на стойкость инструмента наблюдается в присутствии касторового масла. Так, при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин при увеличении глубины резания до t = 1,2 мм наблюдается интенсивное уменьшение стойкости (2,7 раза). При дальнейшем увеличении глубины резания до t = 2,0 мм интенсивность уменьшения стойкости инструмента снижается. При $V_{пр}$ = 28 м/мин интенсивное снижение стойкости (в 6 раз) наблюдается при увеличении глубины резания до t = 1,2 мм. Дальнейшее увеличение глубины резания до t = 2,0 мм уменьшает стойкость зубьев фрез в 1,5 раза

Сопоставляя результаты исследований влияния режимных параметров приработки и дальнейшей эксплуатации фрез после приработки на стойкость инструмента в присутствии касторового масла (рис. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4) показывают, что с уменьшением подачи S_z и глубины резания стойкость инструмента резко увеличивается, что позволяет рекомендовать наиболее эффективное использование касторового масла при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в условиях чистовой обработки.

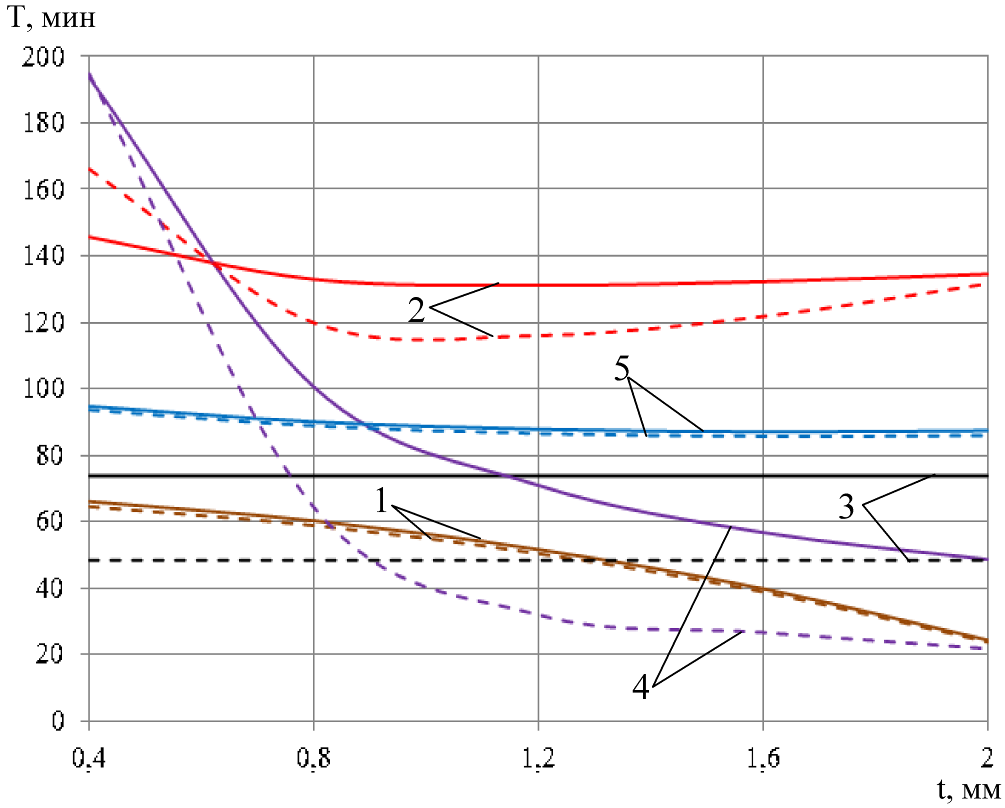


Рис. 4.4. Зависимости Т = *f* (t): 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ——— $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; -------$V_{пр}$ = 28 м/мин; $V_с$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб.

Влияние глубины резания на стойкость инструмента в присутствии рапсового масла значительно меньше, чем при использовании касторового масла. При $V_{пр}$ = 15,5 м/мин некоторое снижение наблюдается при увеличении глубины резания до t = 0,8 мм. При $V_{пр}$ = 28 м/мин уменьшение стойкости инструмента при увеличении глубины до t = 1,2 мм в 1,4 раза. Дальнейшее повышение глубины резания не влияет на изменение стойкости.

Таким образом, анализируя результаты зависимостей стойкости от режимных параметров процесса приработки инструмента и его работы после приработки фрезерование при использовании рапсового масла более эффективно применять при больших глубинах и подачах в сравнении с касторовом.

Изменение глубины резания от 0,4 мм до 2,0 мм при сухом резании не зависимо от значений скорости приработки, уменьшает стойкость зубьев фрез в 2,7 раза.

Наибольшее влияние на стойкость инструмента из Р6М5 при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в среде касторового масла оказывают подача на зуб и глубина резания. Особенно это влияние проявляется в диапазоне приработочных скоростей. Так при t = 0,4 мм и при значении S_z до 0,15 мм/зуб с увеличением скорости приработки вызывает повышение стойкости.

При подаче больше 0,15 мм/зуб увеличение $V_{пр}$ до 28 м/мин стойкость инструмента снижается. Поэтому в присутствии касторового масла можно рекомендовать проводить приработку с увеличенными до $V_{пр}$ = 28 м/мин скоростями и ограничением по подаче до 0,15 мм/зуб и глубине резания t = 0,4 ÷0,5 мм. При фрезеровании приработанным инструментом в исследуемом диапазоне глубин резания повышение скорости резания V_c до 50 м/мин не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента.

Проведенные исследования влияния режимных параметров на стойкость инструмента в среде касторового масла показывают целесообразность с точки зрения повышения стойкости в качестве технологической среды его использовать при чистовой обработке, т.е. с малыми глубинами резания и подаче на зуб не более 0,15 мм/зуб.

При глубине резания превышающей t = 0,5 ÷ 0,6 мм и подачах на зуб свыше 0,18 мм/зуб лучшие результаты по стойкости зубьев фрез наблюдаются при использовании рапсового масла.

Анализ зависимостей (рис. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4) показывает, что фрезерование с использованием рапсового масла стойкость инструмента значительно превышает его стойкость в присутствии как МР-99 и И-20А, так и при сухой обработке.

В среде рапсового масла увеличением скорости приработки с подачей 0,15 мм/зуб и глубине t = 0,4 мм стойкость зубьев фрезы увеличивается. Это показывает, что приработку инструмента в присутствии рапсового масла (рис. 4.2, кривые – 2) следует производить при режимах аналогичных касторовому маслу.

Таким образом, результаты проведенных исследований по выбору подач и глубины резания в среде рапсового масла согласуются с результатами, полученными при точении стали 12Х18Н10Т [13]. Уменьшение глубины резания и подачи при приработке позволяет проводить ее с большими скоростями, что приводит к повышению стойкости инструмента.

Скорость приработки в исследуемом диапазоне ее изменения при t = 0,4 мм и S_z = 0,15 мм/зуб в среде МР-99 не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента.

В исследуемом диапазоне приработочных скоростей в среде И-20А увеличение скорости приработки снижает стойкость независимо от глубины резания. Лучшие результаты по стойкости в этом случае показывает приработка при минимальных значениях подачи на зуб.

При сухой обработке лучшие результаты по стойкости также достигаются при приработке на минимальных подачах и глубинах резания. Лучшие результаты в сравнении с сухой обработкой показывает и МР-99.

Полученные результаты использования приработки резанием с целью образования упрочненных контактных слоев при фрезеровании с использованием различных технологических сред (за исключением касторового масла) подтверждает результаты исследований при точении стали 12Х18Н10Т. Согласно работе [13], это позволяет утверждать, что в этом случае аналогично точению в диапазоне оптимальных температур (200 – 400°С) факторы, способствующие росту удельных нагрузок нормальных нагрузок те же, что и при точении и обуславливают повышение степени упрочнения и износостойкости контактных слоев упрочнения. Следует отметить, что эффект увеличения стойкости приработанного инструмента наблюдается во всем диапазоне изменения режимов резания последующей работы инструмента. За исключении касторового масла, когда фрезерование при S_z=0,3 мм/зуб стойкость соизмерима со стойкость сухой обработки.

Эффект повышения стойкости в присутствии касторового масла для чистовой обработки наблюдался ранее в исследованиях работы [80] и может быть объясняет только на основании микроструктурных исследований контактных слоев инструмента.

Так как рассматривается чистовая и получистовая обработка, то в этом случае важным параметром, определяющим эффективность обработки является шероховатость обработанной поверхности.

4.2. Определение влияния СОТС на шероховатость поверхности в зависимости от режимных параметров эксплуатации инструмента

Шероховатость поверхности является важной характеристикой качества обработанной поверхности, от которой во многом зависят эксплуатационные показатели механизмов и узлов машин.

1). Шероховатость обработанной поверхности можно представить, как след рабочего движения режущей кромки (кромок) инструмента при снятии им поверхностного слоя металла (регулярный профиль), искаженного в результате воздействия в процессе резания множества случайных факторов. Факторы, которые вызывают отклонение реальной шероховатости поверхности от регулярного профиля, условно могут быть представлены тремя группами, а именно:

– положением режущей кромки инструмента относительно обработанной поверхности;

– упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала;

– возникновением вибраций в технологической станочной системе [1].

Влияние этих факторов на образование шероховатости поверхности происходит в тесной взаимосвязи друг с другом и изменением во времени.

Для заданного обрабатываемого материала (сталь 12Х18Н10Т) и быстрорежущего инструмента (сталь Р6М5) с постоянной геометрией и приработанного согласно установленным режимам предварительной приработки для каждой из исследуемых сред основными случайными факторами, при прочих постоянных условиях эксплуатации, будут технологическая среда, в присутствии которой происходит срезание слоя и режимы резания.

Следует отметить также, что шероховатость является одной из технологических оценок, определяющих работоспособность инструмента, что особенно важно для работы в условиях чистовой и получистовой обработки. Поэтому установление влияния на шероховатость поверхности режимов резания в присутствии различных сред процесса фрезерования и на этой основе разработки рекомендаций по эффективному использованию СОТС для обеспечения требуемой шероховатости.

Влияние режимов резания при фрезеровании аустенитного класса стали 12Х18Н10Т проводились по моделям, полученным на основе экспериментальных данных с использованием МГУА при фаске износа по задней поверхности $h_з$ = 0,3 мм и средним значениям R_a по девяти измерениям.

Результаты этих исследований приведены на рис. 4.13, 4.14, 4.15.

На рис. 4.5 приведены графические зависимости шероховатости поверхности от подачи на зуб.

Анализ этих зависимостей показывает, что наибольшая шероховатость при фрезеровании стали 12Х18Н10Т наблюдается при сухой обработке и в присутствии И-20А и ее значение зависит от глубины резания (кривые 1 и 3).

В присутствии МР-99, содержащей в своем составе растительное масло, а также при использовании рапсового и касторового масла влияние на шероховатость поверхности при различных глубинах резания незначительно (рис.4.13 – кривые 2,45). Это может объясняться различием протекания контактных процессов при СОТС, содержащих растительные масла.

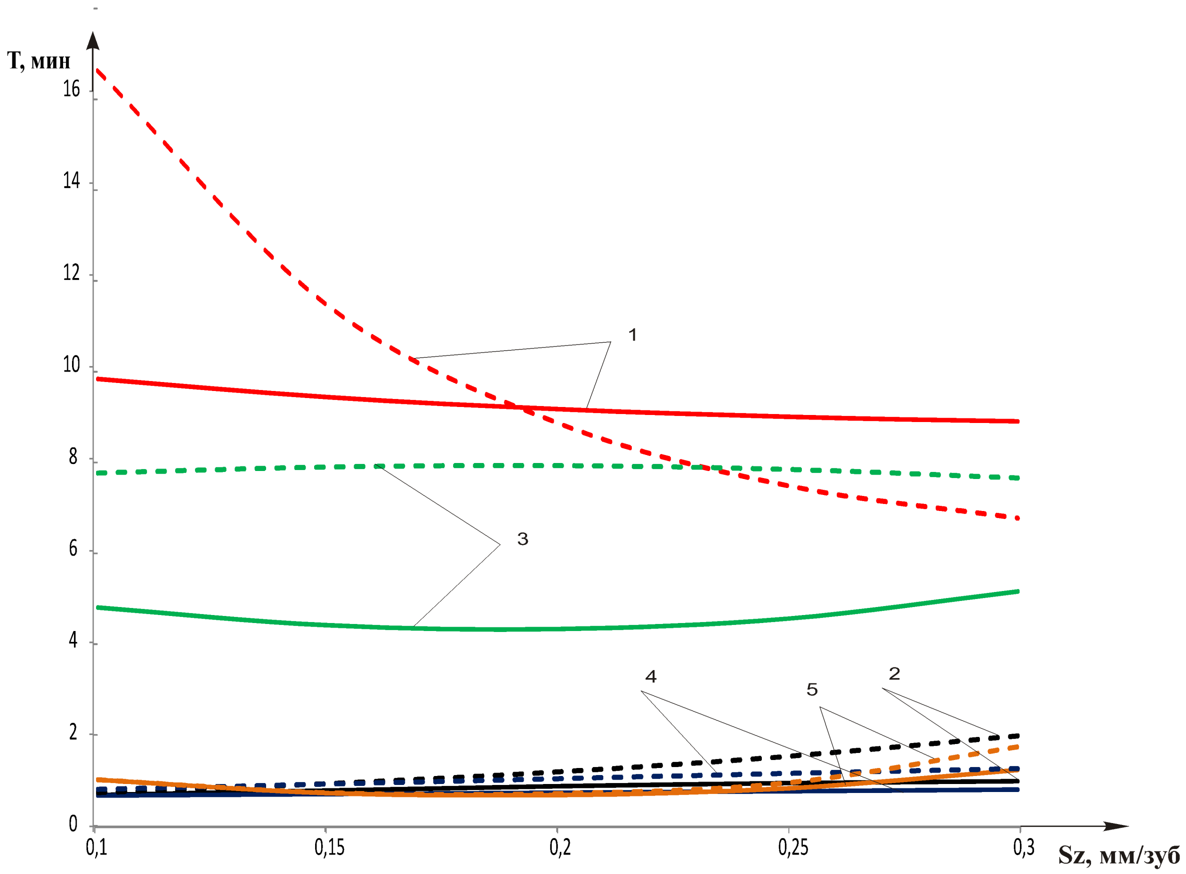


Рис. 4.5. Зависимости R_a = f (S_z): 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ——— V_c =38м/мин; t=0,4мм -------- V_c = 38м/мин; t= 1,2мм.

Модельное исследование влияния скорости резания в интервале от 28 м/мин до 48 м/мин показывают, что с скорость резания (за исключением обработки всухую) не оказывает существенного влияния на изменение шероховатости (рис 4.6).

При обработке всухую с t = 0,4 мм с увеличением скорости резания наблюдается интенсивного снижение шероховатости, а при глубине резания t = 1,2 мм – увеличение, но с меньшей интенсивностью. Так при t = 0,4 мм шероховатость в исследуемом диапазоне скоростей снижается в 3,5 раза и составляет R_a = 9,85 мкм для V = 28 м/мин и R_a =2,75 мкм для V = 45 м/мин.

При фрезеровании с t = 1,2 мм в данном диапазоне скоростей от 28 м/мин до 48 м/мин наблюдается повышение шероховатости в 1,2 раза.

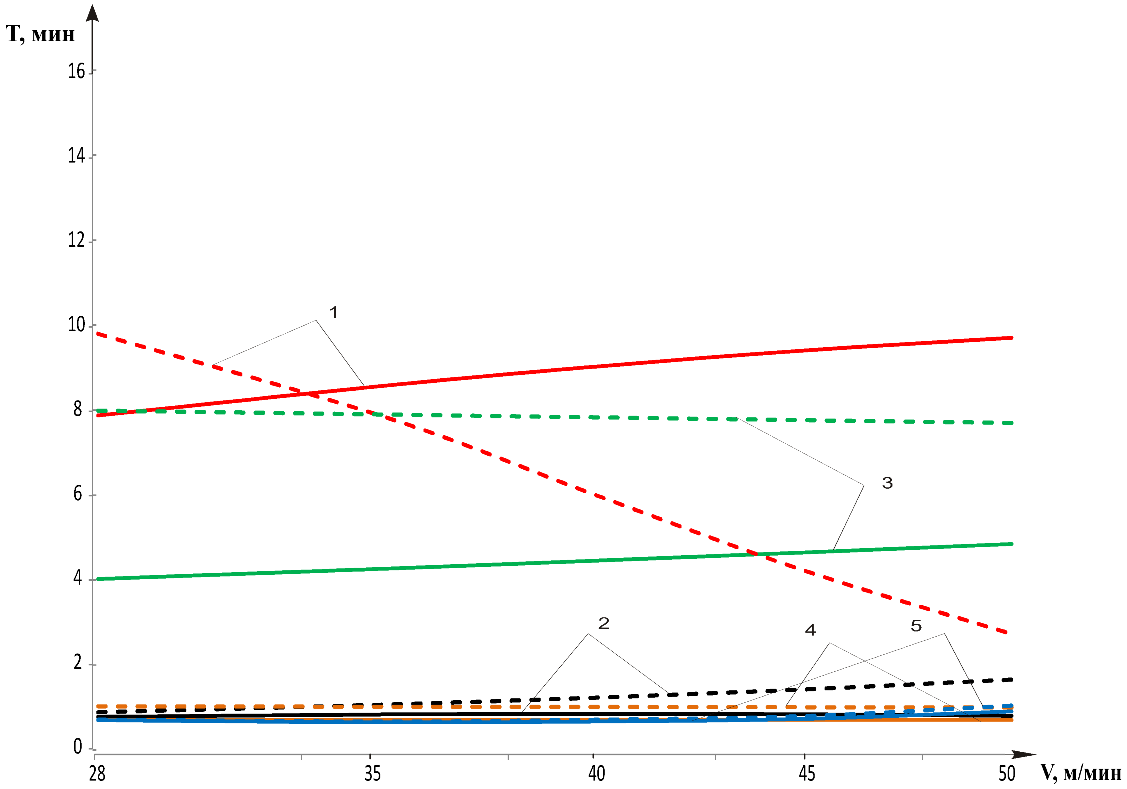


Рис. 4.6. Зависимости $R_a = f(V_c)$: 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС);
——— Sz =0,3мм/зуб; t=0,4мм - - - - - Sz = 0,3мм/зуб; t= 1,2мм.

Наибольшее и неоднозначное влияние при сухой обработке на шероховатость поверхности оказывает глубина резания (рис. 4.7). Так при сухой обработке с увеличением глубины резания от 0,4мм до 1мм и подаче S_z = 0,15 мм/зуб шероховатость поверхности увеличивается в 1,4 раза, составляя соответственно R_a ≈ 9,4 мкм и R_a ≈ 13 мкм, а затем до 2мм интенсивно уменьшается до R_a =0,63 мкм, т.е. в 4,7 раза. Аналогичная картина изменения шероховатости происходит и при подаче равной S_z = 0,3 мм/зуб, но при этом пике наибольшего значения шероховатости сдвигается в сторону меньших глубин резания (кривые – 1). Такое влияние глубины резания на шероховатость поверхности противоречит установившемуся положению о незначительном влиянии глубины резания на шероховатость [2]. Однако данное утверждение относится к не приработанному инструменту. Наличие фаски на задней поверхности с ростом глубины резания усиливает процесс трения и увеличивает пластическую деформацию поверхностного слоя [1, 2].

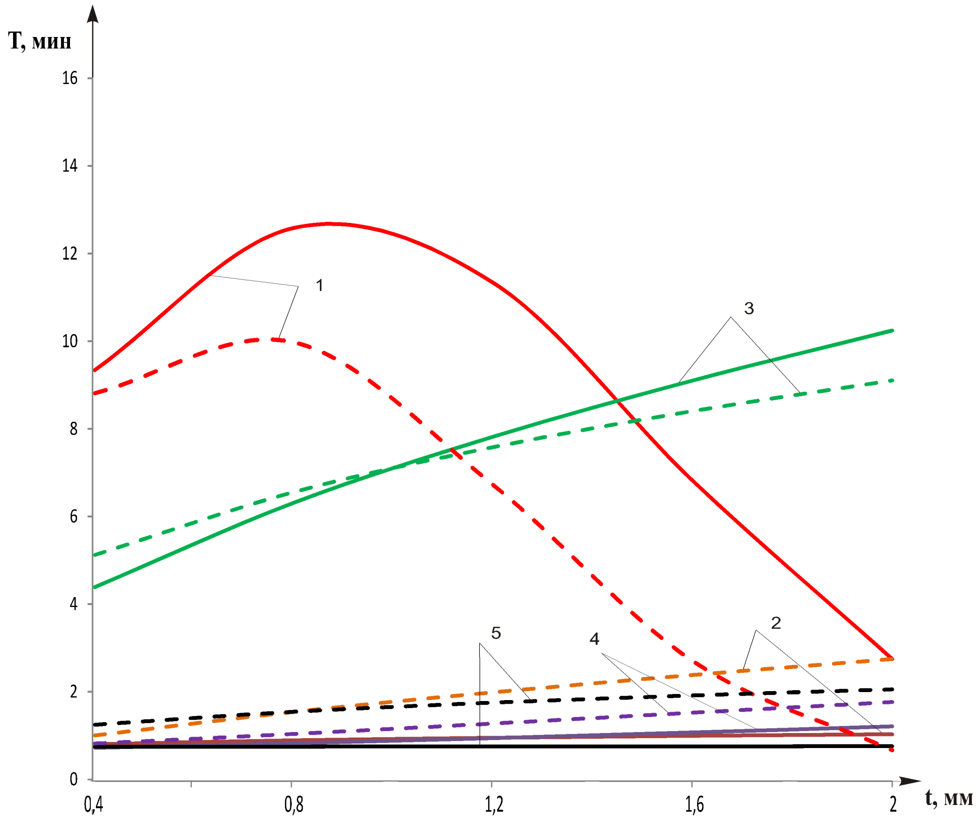


Рис. 4.7. Зависимости $R_a = f(t)$: 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло (ТМС), 3 – И-20А (ТМС), 4 – касторовое масло (ТМС), 5 – МР-99 (ТМС); ———— V_c =38м/мин; Sz=0,15мм/зуб ---------- V_c = 38м/мин; Sz=0,3мм/зуб.

С увеличением глубины резания от 0,4 мм до 2 мм шероховатость увеличивается. Так при S = 0,15 мм/зуб она соответственно составляет по R_a 4,4 мкм и 10,3 мкм, т.е. увеличивается более чем в 2,3 раза, а при S = 0,3 мм/зуб – 1,8 раза, с 5,15 мм до 9,19 мм. При этом её значение в диапазоне изменения подач от 0,15 -0,3 мм/зуб при t = 0,4 – 0,8 мм практически незначимо, а при t =1,2 – одинаково.

Шероховатость поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в других средах (сухая обработка, И-20А и МР-99) зависит от всех исследуемых режимных параметров обработки (V_c, S_z и t). Их влияние на R_a проявляется в тесной взаимосвязи друг с другом.

С затуплением инструмента, в данном случае до $h_з$ = 0,3 мм большее влияние на шероховатость поверхности оказывает глубина резания, независимо от вида технологической среды. Это может объясняться изменением условий трения по задней поверхности изменению контактных процессов и как следствие увеличением пластической деформации [1].

Результаты исследований влияния режимов резания при использовании различных технологических сред показывают, что наименьшую шероховатость в исследуемом диапазоне изменения режимов резания можно достичь при использовании растительных масел и МР-99. Наименьшее значение по шероховатости обработанной поверхности достигается при использовании касторового масла, значения которой составляет R_a = 0,66 ÷ 1,75 мкм во всем диапазоне исследуемых параметров в зависимости от режимов резания.

Изменение шероховатости в диапазоне изменения режимов резания при рапсовом масле достигает от 0,67 мкм до 3,1 мкм по шкале R_a. Большое значение R_a в этом случае наблюдается при наибольших из исследуемых значениях глубины резания.

Шероховатость обработанной поверхности при МР-99 колеблется от 0,71 мкм до 2,55 мкм по шкале R_a.

В результате, впервые проведенных комплексных исследований на основе моделирования по экспериментальным данным приработанного в различных средах можно прийти к заключению, что скорость резания на шероховатость обработанной поверхности в среде касторового и рапсового масел и МР-99 при цилиндрическом фрезеровании стали 12Х18Н10Т не оказывает существенного влияния. В этом случае шероховатость поверхности зависит от взаимообусловленного влияния подачи и глубины резания.

В исследуемом диапазоне подач глубина резания при использовании растительных масел и МР-99 содержащих в сравнении с сухой обработкой и И-20 оказывает значительно меньшее влияние на изменение шероховатости.

При малых подачах, в частности при S_z = 0,15 мм/зуб в присутствии МР-99 глубина в исследуемом диапазоне не оказывает влияния на шероховатость поверхности, в присутствии рапса шероховатость поверхности с увеличением глубины резания до 2,0 мм шероховатость увеличивается в 1,3 раза (0,7 мкм – 1,0 мкм), а при касторовом в 1,7 раза (0,9 мкм – 1,18 мкм).

С увеличением подачи на зуб влияние глубины резания на значение шероховатости увеличивается. Наибольшее влияние при при S_z = 0,3 мм/зуб наблюдается при использовании в качестве СОТС рапсового масла. Изменение глубины резания в исследуемом диапазоне в этом случае увеличивает шероховатость поверхности в 2,8 раза, соответственно от 0,97 мм до 2,74 мкм по R_a. Наименьшее влияние глубина резания при S_z = 0,3 мм/зуб оказывается при использовании касторового масла и МР-99. Следует отметить также, что при использовании касторового масла при S_z = 0,3 мм/зуб достигается значительно меньшая шероховатость в сравнении с другими СОТС.

Учитывая то, что образование упрочненных слоев, на контактируемых со стружкой поверхностях, происходит в результате воздействия температурно-силового нагружения, которое зависит для заданных обрабатываемого, и инструментального материалов, а также от используемой СОТС и режимов резания, были построены модели для каждой из используемых сред типа $P_h=f(V_c,S,t)$, $P_v=f(V_c,S,t)$, $P_y=f(V_c,S,t)$, описывающие зависимость усилий на стадии приработки инструмента от режимов приработки.

4.3. Влияние режимов приработки на составляющие сил резания

В работе [15] установлены оптимальные условия приработки быстрорежущего инструмента, которые определяются температурным интервалом 200 – 300°С и ограничиваются нижним и верхним пределами давлений (от 0,5 МПа) которые соответствуют сопротивлению режущей кромки хрупкому разрушению.

Отмечается, что в интервале указанных давлений эффект упрочнения тем выше, чем больше удельные нормальные давления. В свою очередь удельное нормальное давление определяется силой нормального давления, зависящей от усилий резания на передней и задней поверхностях инструмента и площади контакта стружки по передней поверхности. Значение составляющих усилия резания в исследуемом случае при фрезеровании стали 12Х18Н10Т быстрорежущим инструментом с постоянной геометрией определяются режимами резания и технологической средой, в присутствии которой осуществляется процесс приработки.

При фрезеровании рассматриваются составляющие усилий резания P_z, P_x, P_y, которые направлены соответственно по касательной к окружности вращения фрезы, по нормали к плоскости резания и вдоль оси фрезы. Схема составляющих сил резания при встречном фрезеровании, которое имело место в данных исследованиях, показана на рис. 4.8.

В экспериментальных исследованиях измеряют технологические составляющие силы резания – горизонтальную P_h и вертикальную P_v, геометрическая сумма которых равна равнодействующей P_{X_Z} [2, 3, 40, 101].

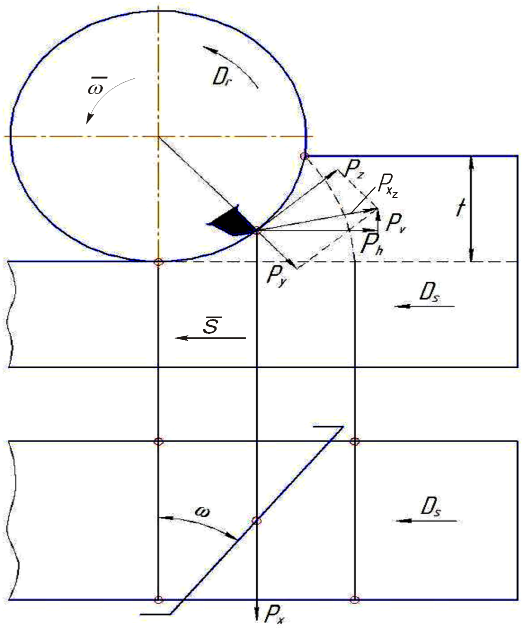
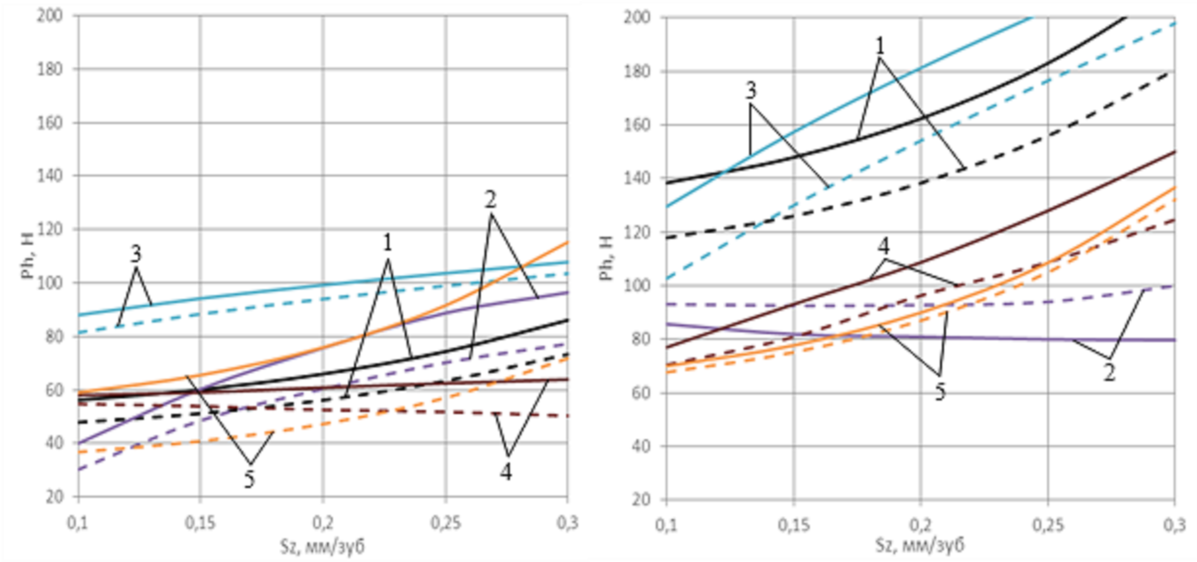


Рис. 4.8. Схема составляющих силы резания на зубе цилиндрической фрезы при встречном фрезеровании.

Влияние режимов резания на составляющие P_h, P_v и P_y исследуются по моделям (3.1, …, 3.15), полученных для каждой из технологических сред.

На рис.4.9, 4.10 и 4.11 (а и б) приведены графические зависимости $P_h = f(S_z)$, $P_v = f(S_z)$ и $P_y = f(S_z)$ при глубине резания, а) - t = 0,4 мм и б) – t = 1,2 мм. соответственно при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин и $V_{пр}$ = 28 м/мин. Анализ этих зависимостей показывает, что значение составляющих сил резания в заданном интервале изменения переменных определяется прежде всего технологической средой.



а) б)

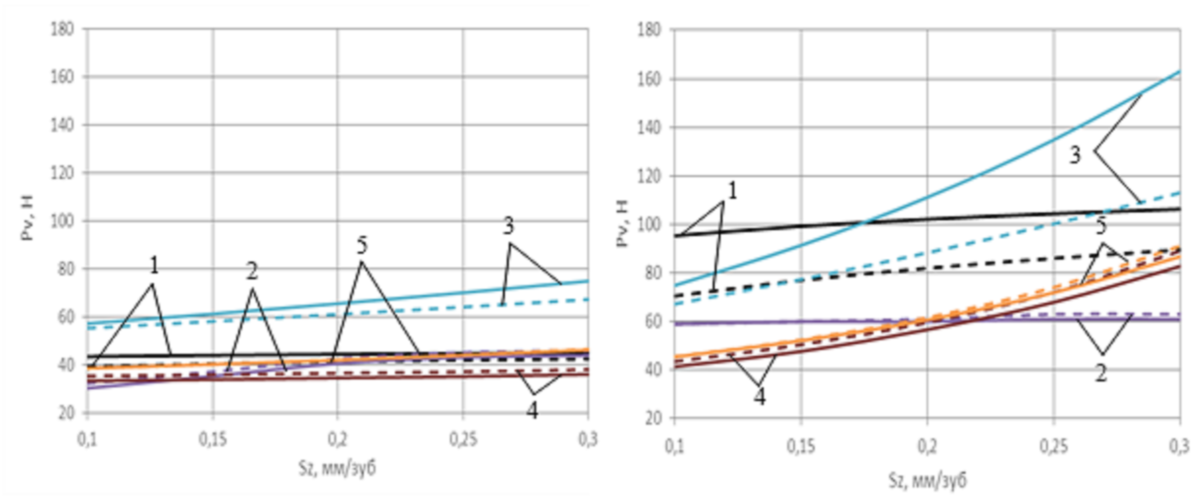
Рис. 4.9. Зависимость $P_h = f(S_z)$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) ______ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ _ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин;
б) ______ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ _ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин.

Интенсивность влияния подачи S_z мм/зуб на P_h зависит от глубины резания и скорости приработки. Чем больше глубина резания при одних и тех же значениях подач и скорости резания, тем больше составляющая P_h.

Так при t = 0,4 мм и $V_{пр}$ = 15,5 м/мин. в присутствии рассматриваемых СОТС (за исключением касторового масла) с увеличением S_z значение P_h значительно увеличивается (рис. 4.9 – а) кривые 1, 2, 3, 5). При этой же глубине и скорости приработки $V_{пр}$ = 28 м/мин, независимо от технологической среды, наблюдается меньшее значение горизонтально составляющей силы резания, чем при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин.

Использование при фрезеровании стали 12Х18Н10Т касторового масла при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин и t = 0,4 мм увеличение подачи S_z от 0,1 мм/зуб до 0,3 мм/зуб вызывает незначительное уменьшение P_h а при t = 1,2 мм и некоторое увеличение. В тоже время при $V_{пр}$ = 28м/мин. увеличение S_z до 0,3 мм/зуб приводит к интенсивному росту составляющей P_h. Рассматривая зависимость Т = f (S_z) следует отметить, что наблюдается более интенсивное изменения стойкости в зависимости от S_z при $V_{пр}$ = 28м/мин нежели при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин.

Влияние подачи на зуб на значение P_v аналогично её влиянию на горизонтальную составляющую, т.е. при t = 0,4 мм оно значительно меньше (рис 4.10-а) а при t = 1,2 мм – больше.

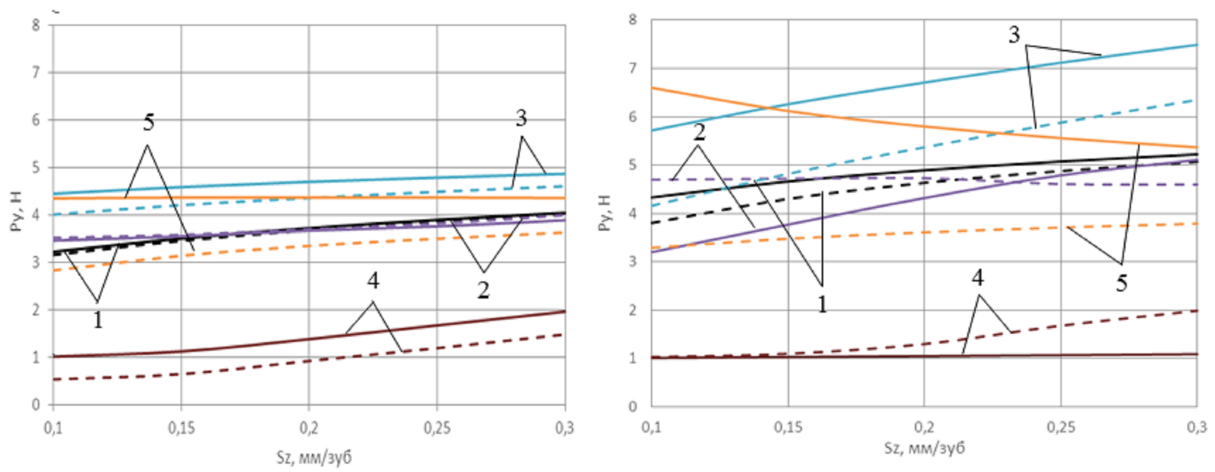


а) б)

Рис. 4.10. Зависимость P_v = f (S_z) при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин;
б) _____ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин.

По аналогии с P_h с увеличением скорости приработки в зависимости от глубины резания изменяется интенсивность влияния подачи на P_v.

На рис 4.11 приведены графические зависимости P_y=f(S_z).



а) б)

Рис. 4.11. Зависимость $P_y = f(S_z)$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ t = 0,4 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин;
б) _____ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; _ _ _ _ t = 1,2 мм; $V_{пр}$ = 28 м/мин.

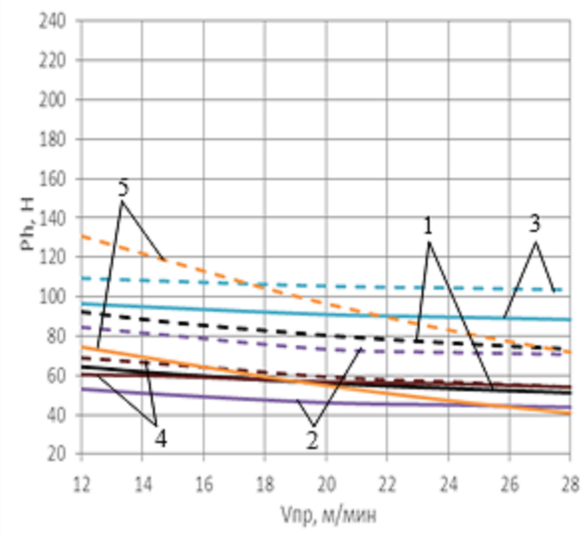
Из приведенных на рис.4.11 (а) и б)) зависимостей $P_y = f(S_z)$ видно, что при t = 0,4 мм и $V_{пр}$ = 15,5 м/мин изменение подачи в указанном диапазоне исследуемых сред не оказывает существенного влияния на составляющую P_y.

Однако, при $V_{пр}$ = 28 м/мин и глубине резания t = 1,2 мм наблюдается усиление влияния подача с её увеличением (рис.4.15 а)). Вместе с тем, при сухой обработке при подаче на зуб от 0,1 мм/зуб до 0,3 мм/зуб это влияние незначительное в диапазоне глубин резания от t = 0,4 мм до t = 1,2 мм во всем рассматриваемом диапазоне изменения скорости приработки.

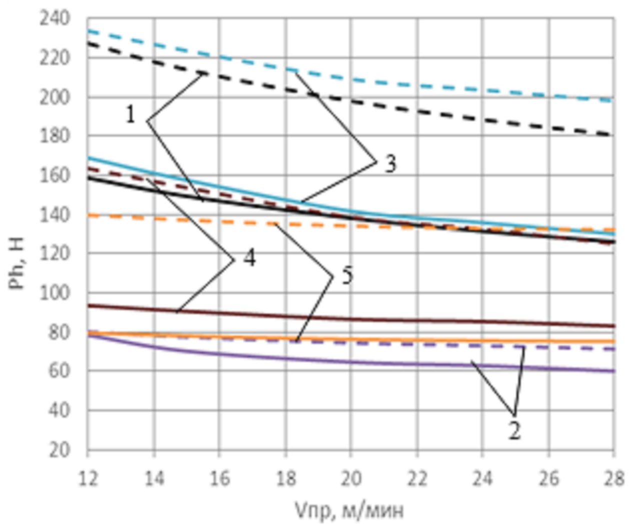
Анализ этих зависимостей показывает, что наибольшее влияние на значение P_y отказывает подача на зуб при $V_{пр}$ = 28 м/мин и t = 1,2 мм в присутствии И-20А и МР-99 (кривые 3 и 5).

Однако, следует отметить, что значение P_y в десятки раз меньше, чем P_h и достигает наибольшего значения в присутствии И-20 в сравнении с использованием других сред.

На рис 4.12, 4.13 и 4.14 (а и б) соответственно приведены графические зависимости $P_h = f(V_{пр})$, $P_v = f(V_{пр})$ и $P_y = f(V_{пр})$.



а)



б)

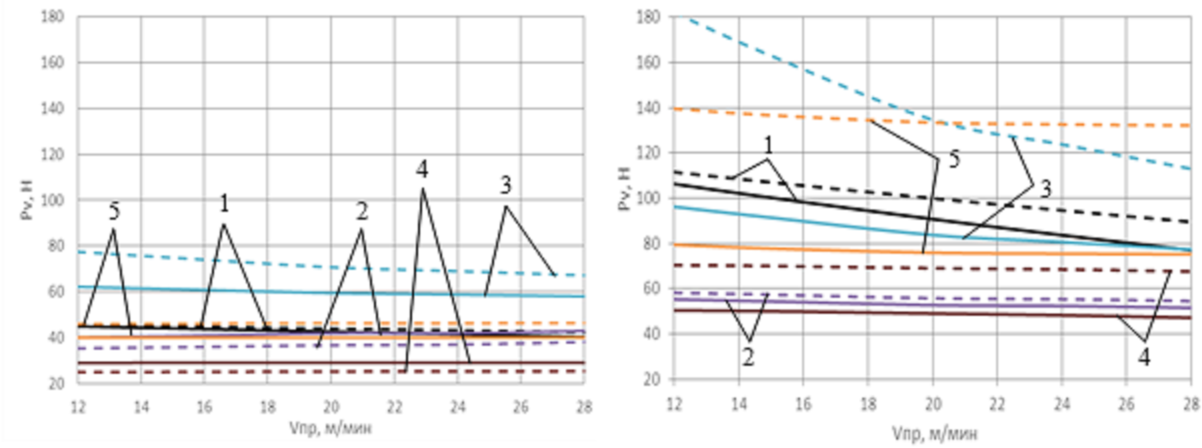
Рис. 4.12. Зависимость $P_h = f(V_{пр})$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ t = 0,4 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 0,4 мм; S_z = 0,3 мм/зуб;
б) _____ t = 1,2 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 1,2 мм; S_z = 0,3 мм/зуб.

Увеличение скорости приработки при исследуемых в рассматриваемом случае значениях S_z и t вызывает снижение составляющих сил резания P_h, P_v, P_y (рис 4.12, 4.13 и 4.14 - а и б).

Это подтверждает установленное в резании металлов положение, что с увеличением скорости резания при одних и тех же значениях подачи и глубины резания наблюдается снижение силы резания [1-4].

Анализ этих зависимостей, показывает, что с увеличением $V_{пр}$ при подачах S_z = 0,15 мм/зуб и S_z = 0,3 мм/зуб и t = 0,4 мм наблюдается уменьшение P_v, но интенсивность этого уменьшения значительно меньше, чем при $P_h = f(V_{пр})$.

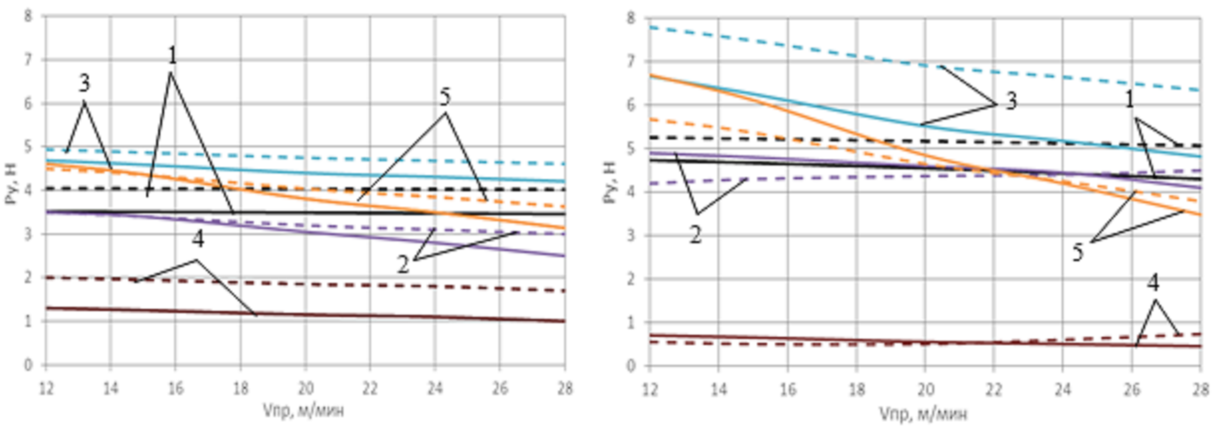
При фрезеровании с глубиной t = 1,2 мм (рис 4.13-а) в присутствии касторового масла и рапсового приработочная скорость в исследуемом диапазоне исследований аналогично обработке с t = 0,4 мм не оказывает существенного влияния на значение вертикальной составляющей силы резания P_v. Также, как и при t = 0,4 мм, при t = 1,2 мм в среде И-20А, МР-99 и при обработки в сухую наблюдается более интенсивнее снижение P_v.



а) б)

Рис. 4.13. Зависимость $P_v = f\,(V_{пр})$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ t = 0,4 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 0,4 мм; S_z = 0,3 мм/зуб;
б) _____ t = 1,2 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 1,2 мм; S_z = 0,3 мм/зуб.

Анализ графических зависимостей осевой составляющей силы резания $P_y = f\ (V_{пр})$ (рис 4.14 – а и б) указывает на аналогично снижения P_y с увеличением $V_{пр}$ с зависимостями $P_h = f\,(V_{пр})$ и $P_v = f\,(V_{пр})$.

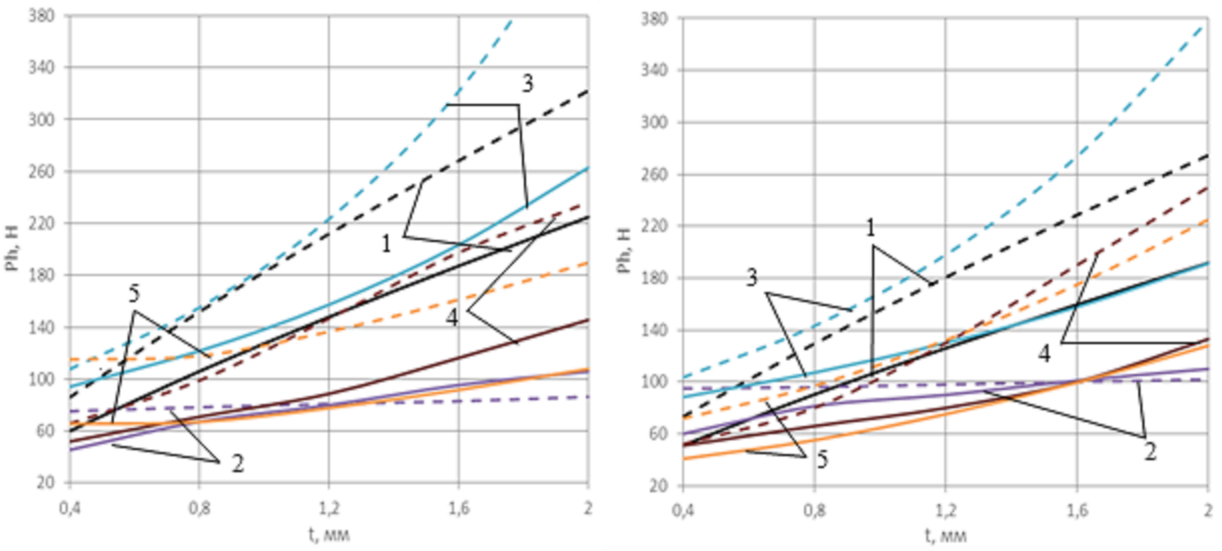


а) б)

Рис. 4.14. Зависимость $P_y = f\,(V_{пр})$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ t = 0,4 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 0,4 мм; S_z = 0,3 мм/зуб;
б) _____ t = 1,2 мм; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ t = 1,2 мм; S_z = 0,3 мм/зуб.

С увеличением глубины резания в присутствии МР-99 и И-20 увеличение скорости приработки вызывает более интенсивное снижение P_y.

Наибольшее влияние на интенсивность изменения составляющих P_h, P_v и P_y оказывает глубина резания (рис 4.15, 4.16, 4.17 – а и б).



а) б)

Рис. 4.15. Зависимости $P_h = f(t)$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);

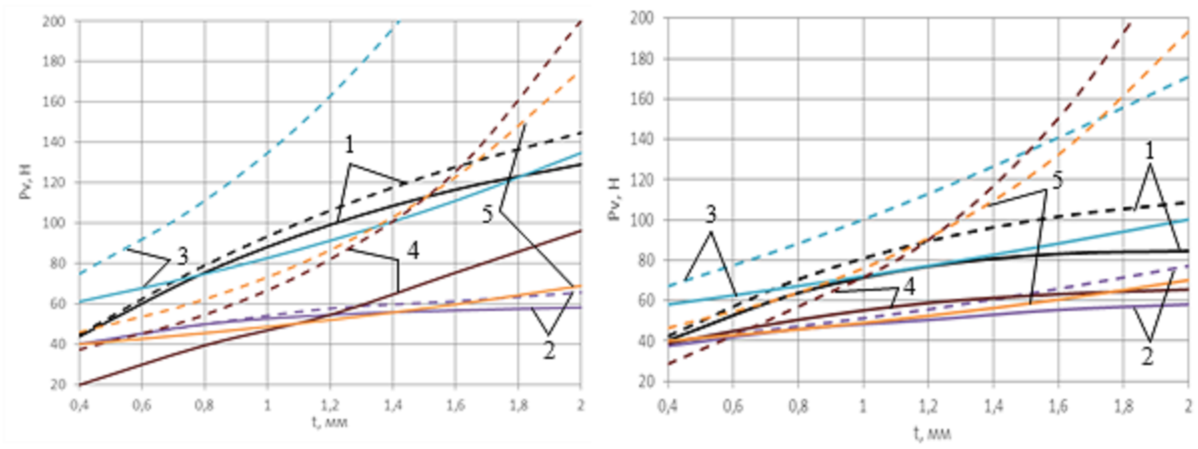
а) ______ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб;

б) ______ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб.

Это объясняется тем, что изменение глубины резания практически не влияет коэффициент усадки стружки, так как в зону резания вводится только новые участки режущей кромки.

Следует отметить, что увеличение подачи при той же толщине приводит к уменьшению степени пластической деформации. Одновременно силы на задней поверхности остаются неизменными. Поэтому влияние глубины резания на силу больше, чем подачи [2].

Такое влияние глубины резания на составляющие силы резания подтверждается экспериментальными исследованиями [85].



а) б)

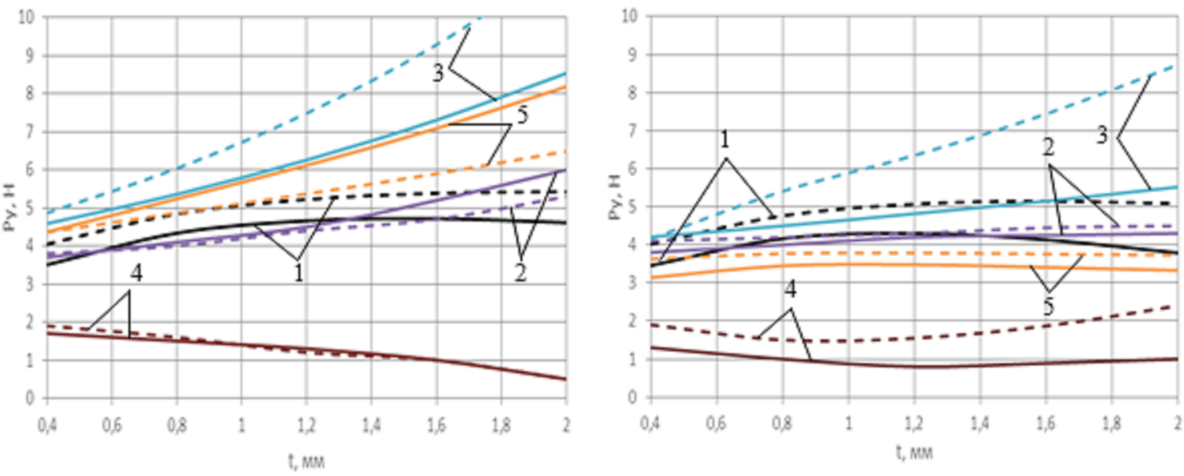
Рис. 4.16. Зависимость $P_v = f(t)$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) ______ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб;
б) ______ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб.

Как показывает анализ зависимостей P_h=f(t) и P_v=f(t) (рис 4.15 и 4.16 – а и б) в общем случае увеличение глубины резания приводит к росту составляющих силы резания P_h и P_v.

Вместе с тем, в присутствии рапсового масла наблюдается наименьшее приращение P_h и P_v независимо от скорости приработки и подачи на зуб.

Анализ графических зависимостей $P_y = f(t)$, приведенных на рис.4.17 - а и б показывает, что при $V_{пр}$ = 15,5 м/мин, независимо от рассматриваемых СОТС, за исключением касторового масла, увеличение глубины резания в исследуемом диапазоне вызывает увеличение P_y, а в среде касторового масла - снижение.

В присутствии касторового масла с увеличением глубины резания при скорости приработки и подачах в равной степени как S_z = 0,15 мм/зуб, так и S_z = 0,3 мм/зуб осевая сила P_y уменьшается. В тоже время при $V_{пр}$ = 28 м/мин, подачах на зуб S_z = 0,15 мм/зуб и S_z = 0,3 мм/зуб с ростом глубины резания (при S_z = 0,15 мм/зуб до t = 1,2 мм и при S_z = 0,3 мм/зуб t = 0,8 мм) вначале наблюдается снижение P_y, а затем некоторое повышение. Отличие влияния режимов резания на осевую составляющую силы резания в присутствии касторового масла еще раз подтверждает отличие механизма образовании упрочненных слоев на контактных поверхностях инструмента в сравнении с упрочнением в других средах.



а) б)

Рис. 4.17. Зависимость $P_y = f(t)$ при фрезеровании стали 12Х18Н10Т: **1)** – сухая обработка, **2)** – рапсовое масло (ТМС), **3)** – И-20А (ТМС), **4)** – касторовое масло (ТМС), **5)** – МР-99 (ТМС);
а) _____ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб;
б) _____ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; _ _ _ _ $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,3 мм/зуб.

Исследования влияния режимов упрочняющей приработки на значения составляющих P_h, P_v и P_y показали, что они проявляются во взаимосвязи, но их взаимосвязь различна для рассматриваемых СОТС. Кроме того, в присутствии каждой из СОТС взаимовлияние режимов резания на составляющие P_h, P_v и P_y проявляются по-разному.

Вместе с тем, максимальное повышение стойкости в присутствии каждой из рассматриваемых СОТС достигается практически при минимальных значениях подачи и глубины резания. Можно предложить, что при этих значениях S_z и t значение силы резания при использовании той или иной среды, характеризуемой комплексом воздействий этой среды, определяет максимально допустимый эффект повышения стойкости инструмента за счет упрочнения.

Рассматривая образование вторичных упрочненных слоев на контактных поверхностях инструмента по аналогии с фрикционными парами [42-44], чем выше уровень контактных напряжений, тем выше степень упрочнения и ниже степень износа.

Согласно [15] оценка величины действующих контактных нагрузок на рабочих поверхностях инструмента определяется отношением соответствующей составляющей силы резания (в данном случае P_z) и площади контакта. По данным [2, 101] среднее соотношение между силами при употребляемых отношениях t/D при встречном фрезеровании $P_h = (1,1 \div 1,2)\ P_z$. Поэтому при определении режимов упрочняющей обработки, при которых на контактных поверхностях инструмента можно формироваться вторичный упрочненный слой во время приработки в исследуемых средах, будем рассматривать значениях P_h, когда достигается максимальная стойкость инструмента.

Как показали исследования влияния режимов приработки (в рассматриваемых границах их изменения) на стойкость, её наибольшее значение, независимо от СОТС, достигается при наименьших подачах на зуб, что ведет к увеличению времени приработки.

В связи с этим, возникает задача определения допустимого интервала режимов приработки, обеспечивающих минимум затрат времени на её осуществление с наименьшими потерями стойкости приработанного инструмента.

Влияние режимов приработки на изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы резания P_h, рассчитанное по моделям (3.1, …, 3.15), проведены в приложении Г.

Так при сухой обработке при одних и тех же значениях глубины резания и подачи на зуб с увеличением скорости приработки наблюдается снижение составляющей P_h.

С увеличением скорости приработки с 12 м/мин до 28 м/мин при одной и той же глубине, и подаче на зуб составляющая P_h уменьшается на 20%.

В тоже время, увеличение скорости в указанных границах в диапазоне t = 0,4 ÷ 0,5 мм при подаче S_z = 0,1 мм/зуб уменьшает стойкость на 1,2%, а при S_z = 0,15 мм/зуб – на 2,7 ÷ 3%, что ниже средне статический погрешности при экспериментальных исследований, т.е. в это случае влияние $V_{пр}$ на стойкость не существенно.

Изменение глубины резания от 0,4 мм до 0,6 мм при сухой обработке в диапазоне скоростей приработки $V_{пр}$ = 12 ÷ 28 м/мин и подачах на зуб S_z = 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента.

На стойкость инструмента наиболее значимое влияние из приработочных режимных параметров оказывает подача. Так её изменения с 0,1 мм/зуб до 0,15 мм/зуб вызывает снижение стойкости в диапазоне рассматриваемых скоростей приработки и глубины резания на 24 ÷ 30,5%. Однако, следует отметить, что на значение усилия резания наблюдается более сильное влияния приработочной глубины резания. С увеличение глубины резания усилия увеличиваются.

Подача оказывает меньше влияние на усилия резания, увеличивая их. В общие случая увеличение режимных параметров при сухой обработке приводит к увеличению усилия резания. Это видно на примере влияния режимов приработки на P_h (приложение Г). Следует отметить, что при низких скоростях приработки значение P_h больше, чем при более высоких.

Проведенные исследования влияние на стойкость инструмента и на усилия резания приработочных скорости, глубины и подачи на зуб показывают, что можно рекомендовать следующие режимы приработки при сухой обработке: скорость приработки $V_{пр}$ = 28 м/мин, подачу S_z = 0,1 мм/зуб, глубину резания t = 0,4 ÷ 0,6 мм.

При этих режимах приработки расчетное снижение стойкости инструмента не будет превышать более 6,7%, что соизмеримо с ошибкой эксперимента.

Аналогично сухой обработке при использовании МР-99 для одних и тех же значений глубины резания и подачи на зуб с увеличением $V_{пр}$ снижаются и стойкость, и усилия резания. Анализируя, рассчитанные по моделям изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы резания P_h при сухой обработке, а также при использовании МР-99 и И-20А, установлено, что при одних и тех же значениях S_z и t повышение $V_{пр}$ = 28 м/мин вызывает наибольше снижение стойкости при использование И-20А. При использовании МР-99 влияние глубины резания незначительное. Наиболее сильное влияние на снижение стойкости при использовании И-20А и МР-99 оказывает подача.

При изменении режимных параметров приработки в исследуемых диапазонах с учетом взаимовлияния $V_{пр}$, S_z и t. P_h снижается в присутствии И-20А на 35%, МР-99 на 31% при снижении стойкости соответственно на 62% (И-20F) и 19,72% (МР-99).

На основании приведенного анализа при фрезеровании стали 12Х18Н10Т могут быть рекомендованы следующие режимы приработки в присутствии:

МР-99 $V_{пр}$ = 28 м/мин; t = 0,4 ÷ 0,6 мм, S_z = 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб.

И-20А, МР-99 $V_{пр}$ = 15 ÷ 20 м/мин; t = 0,4 ÷ 1,2 мм, S_z = 0,1 мм/зуб.

При использовании рапсового масла с повышением скорости приработки наблюдается повышение P_h. С повышением P_h стойкость уменьшается. Анализ значений P_h при фрезеровании в среде рапса, показывает, что во всем диапазоне приработочных режимов, значение P_h значительно ниже чем при сухой обработке и в присутствии И-20А и МР-99. Это позволяет утверждать, что площадь контактируемых поверхностей зуба фрезы меньше при рапсовом масле, чем у других СОТС.

Горизонтальная составляющая силы резания P_h при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии И-20А значительно больше в сравнении с другими средами, что также подтверждается результатами других исследований и может объясняться физико-химическими свойствами той или иной СОТС, от которых зависит действия (эффекты) каждой из них.

В отличие от рассмотренных видов СОТС, у которых с повышением скорости резания снижается стойкость, с использованием касторового масла повышение скорости приработки в диапазоне глубины 0,4÷0,6мм при подаче S_z = 0,1 мм/зуб вызывает повышение стойкости и снижение P_h, которые достигают максимума – минимума (соответственно для t и P_h) при $V_{пр}$ = 28 м/мин. Большое влияние на снижение стойкости и P_h при касторовом масле оказывает глубина и подача.

Снижение стойкости при S_z = 0,1 мм/зуб и глубине резания t = 0,4 мм при снижении $V_{пр}$ от 28 до 12 м/мин составляет более чем на 26%, а при S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,6 мм – 71%.

Кроме того, следует отметили, что при использовании остальных смазок (сухая обработка, МР-99, И-20А и рапсовое масло), наблюдается снижение стойкости инструмента после приработки в диапазоне изменения эксплуатационных скоростей в пределах 1%, в то время как при касторовом масле - почти в 2 раза. Это позволяет утверждать, что касторовое масло можно рекомендовать использовать только для чистовой обработки.

Сравнивая значения P_h, при которых достигается максимальна стойкость зубьев фрезы в присутствии касторового масла, можно отметить, что значение P_h при этом несколько больше, чем при использовании рапсового масла и ниже в случае использования других рассматриваемых СОТС, что согласуется с выводами работы [15].

Вместе с тем, такое отличие влияния режимов приработки при использовании касторового масла от других СОТС может быть объяснено на основании микроструктурных исследований приработанного в этой среде инструмента.

В результате проведенного анализа можно рекомендовать следующие режимы в приработки с использованием:

- рапсового масла:

1) $V_{пр} = 12 \div 28$ м/мин; $t = 0,4 \div 0,5$ мм, $S_z = 0,$ 1мм/зуб.

2) $V_{пр} = 12 \div 15$ м/мин; $t = 0,4 \div 0,5$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб.

- касторового масла: $V_{пр} = 20 \div 28$ м/мин; $t = 0,4$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб.

Изменении рекомендуемых режимов приработки в присутствии рапсового масла в указанном диапазоне по первому варианту вызывает снижении стойкости инструмента не более, чем на 7%, и по второму – на 20%.

Изменение скорости приработки при использовании касторового масла от 28 м/мин до 20 м/мин снижает стойкость на 14%.

Сопоставляя значения стойкости, приработанных зубьев фрез, с использованием различных СОТС, можно рекомендовать использование той или иной СОТС для различных условий фрезерования, а именно:

МР-99 – черновая – чистовая обработка;

И-20А – черновая обработка;

Рапсовое масло – черновая – чистовая обработка;

Касторовое масло – получистовая, чистовая обработка.

Указанный диапазон рекомендуемых режимов фрезерования, согласуется с результатами исследований по шероховатости.

Рекомендуемые режимы приработки после экспериментальной проверки могут служить основной для разработки рекомендаций по упрочению контактных слоев инструмента резанием при фрезерования стали 12Х18Н10Т быстрорежущим инструментом.

Выводы

1. Впервые на основании комплексных модельных исследований установлена степень влияния технологических сред и режимов приработки инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т на стойкость, шероховатость обработанной поверхности и усилия резания.

2. На основании проведенных по моделям исследований можно рекомендовать для обеспечения низкой шероховатости обработанной поверхности использовать в качестве СОТС – касторовое, рапсовое масла и МР-99.

3. На основании анализа значений горизонтальной составляющей силы резания подтверждено положение об уменьшении площади контакта при использовании СОТС, содержащих растительные масла.

4. Впервые модельными исследованиями выявлено различное влияние режимов приработки, в зависимости от используемых СОТС на стойкость и силовые характеристики.

5. Анализируя силовые характеристики процесса приработки можно предположить, что при использовании исследуемых сред механизм образования упрочненных слоев один и тот же кроме касторового масла. Это объясняется тем, что стойкость приработанного инструмента при касторовом масле превосходит все другие смазки только при малых подачах и глубинах резания.

6. Установлены режимы приработки инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т с использованием рассматриваемых СОТС, а именно:

- для сухой обработке: $V_{пр}$ = 28 м/мин; t = 0,4 ÷ 0,6 мм; S_z = 0,1 мм/зуб;
- при МР-99: $V_{пр}$= 28 м/мин; t = 0,4 ÷ 0,6 мм; S_z= 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб;
- при И-20А: $V_{пр}$ = 12 ÷ 15 м/мин; t = 0,4 ÷ 1,0 мм; S_z = 0,1 мм/зуб;
- при рапсовом масле:

1) $V_{пр}$ = 28 м/мин; t = 0,4 ÷ 0,6 мм; S_z = 0,1 мм/зуб;

2) $V_{пр}$ = 12 ÷ 15 м/мин; t = 0,4 ÷ 0,5 мм; S_z = 0,15 мм/зуб;

- при касторовом масле: $V_{пр}$ = 20 ÷ 28 м/мин; t = 0,4 мм; S_z = 0,1 мм/зуб.

РАЗДЕЛ 5
ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ

Определение возможности повышения работоспособности быстрорежущего инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса за счет эффективного использования СОТС были проведены на основе исследования моделей, синтезированных с применением одного из алгоритмов самоорганизации – упрощенного алгоритма МГУА.

Для разработки рекомендаций эффективного использования исследуемых СОТС необходимо было провести лабораторно-промышленную проверку этих результатов.

Однако в результате модельных исследований было установлено, что прослеживается один и тот же характер влияния на стойкость приработанного инструмента в присутствии каждой из исследуемых сред, за исключением касторового масла, прослеживался во всем диапазоне режимов резания, рассматриваемых при моделировании.

Положительное влияние касторового масла ограничивается по результатам моделирования только малыми подачами на зуб и малыми глубинами резания. При увеличении подачи до S_z= 0,3 мм/зуб и глубины t = 2,0 мм стойкость инструмента снижается ниже уровня сухой обработки.

Это позволяет высказать предположение о несколько другом состоянии контактных слоев инструмента после приработки в сравнении с другими СОТС, в среде которых проводилась приработка инструмента.

В этой связи возникла задача исследования приработочных контактных слоев на поверхностях инструмента в среде касторового масла.

5.1. Исследование состояния приработочных контактных слоев при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии касторового масла

Среди наименее изученных СОТС на основе растительных масел является касторовое масло. Особенно это касается изменения свойств инструментального материала, которые определяются при резании степенью и скоростью деформации, интенсифицирующими процессы упрочнения и температурой, стимулирующей процессы разупрочнения [41].

Было установлено, что, если создать условия резания, при которых будет превалировать деформационное упрочнение контактных слоев, то процесс резания может рассматриваться как процесс деформационного упрочнения инструмента, за счет чего повысится стойкость инструмента. Такое упрочнение инструмента может быть достигнуто путем приработки на менее жестких режимах.

В работе [2] отмечается, что упрочнение инструмента резанием в режиме приработки зависит от среды, в которой оно осуществляется. Однако, данные о возможности образования упрочненного слоя во время приработки в условиях фрезерования стали 12Х18Н10Т в присутствии касторового масла отсутствуют.

В работе [103] указывается, что в среде касторового масла при резании отмечается, снижение шероховатости, усилий резания, что способствует повышению стойкости инструмента при определенных режимах резания.

В основу исследований состояния приработочных контактных слоев при фрезеровании стали 12Х18Н10Т из быстрорежущей стали Р6М5 с использованием в качестве СОТС касторового масла, были положены микроструктурные исследования образцов элементов зубьев фрез после приработки. В исследованиях принимали участие 2 пары фрез, каждая пара из них прирабатывалась на одних и тех же режимах. Так первая пара фрез (фрезы №1 и №2) прирабатывались на режимах $V_{пр}$ = 15,47 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t

= 0,8 мм, а вторая пара (фрезы №3 и №4) – $V_{пр}$ = 15,44 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 1,6 мм.

Приработка осуществлялась на заготовках, обеспечивающих измерение значений приработочного износа $h_{зпр}$ (фаска износа по задней поверхности) через каждые 200 мм. Параллельно с измерением износа также измерялись составляющие усилий резания – P_v, P_h и P_y.

При изготовлении образцов для микроструктурных исследований приработанные до заданных значений $h_{зпр}$ зубья вырезались на электроэрозионном станке модели CHMER CW-532S латунной проволокой Ø 0,25 мм, а затем тем же способом образцы разрезались перпендикулярно режущей кромке на 2-3 образца. После этого изготавливались шлифы каждого из них.

Для исследования контактных слоев образцы протравливались 5% раствором азотной кислоты. Микроструктурные исследования проводились на металлографическом агрегатном микроскопе МЕТАМ – Р1, предназначенном для изучения структуры металлов в отраженном свете.

Наличие упрочненного слоя определялось по цвету протравленных образцов вблизи режущей кромки, передней и задней поверхностей на каждом исследуемом образце. Полученные структуры образцов фотографировались и таким образом, определялось состояние этого слоя вдоль режущей кромки.

Твердость этих же образцов исследовалось после снятия протравленного слоя. Перед измерением микротвердости образцы полировались до снятия протравленного слоя и достижения требуемой шероховатости поверхности.

До приработки зубьев в среде касторового масла была измерена твердость трех неприработанных образцов, средние значения твердости одного из них образцов, приведены на рис. 5.1.

При измерении усилий резания наблюдалось вначале снижение составляющих, затем рост, после которого опять наблюдалось падение. Поэтому возникла задача определения значений приработочного износа $h_{зпр}$, при котором зубья фрезы можно было считать окончательно приработанным, т.е. определение значения $h_{зпр}$, обеспечивающего образование упрочненных контактных слоев на зубьях фрезы.

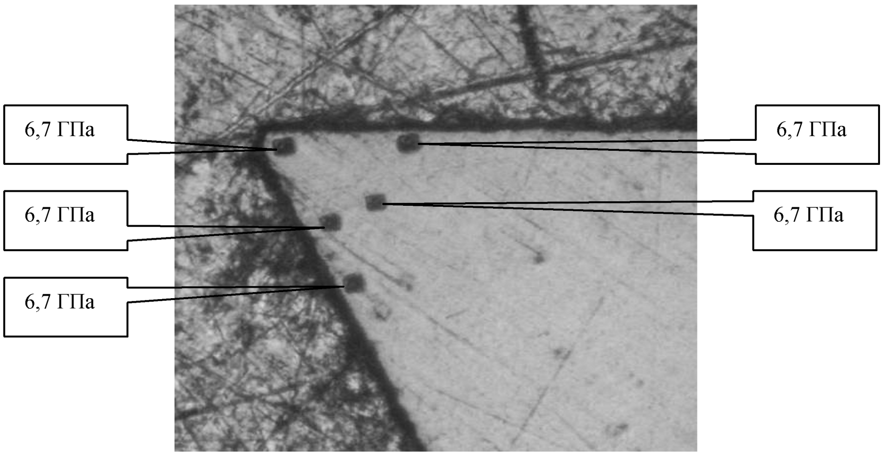


Рис. 5.1. Средняя твердость неприработанных образцов зубьев фрезы из стали Р6М5 (увеличение Х200).

Для этого зубья каждой пары изнашивались до $h_{зпр}$ – 0,056 мм, при котором наблюдалось первое снижение составляющих усилий резания, а вторая – до следующего снижения P_v, P_h и P_y. Средние значения $h_{зпр}$, P_h и P_v после каждого измерения представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Средние значения приработочного износа зубьев фрезы $h_{зпр}$ и соответствующие им составляющие усилий резания P_h и P_v

№ фрезы	Значения $h_{зпр}$ после каждого замера, мм					Значения P_h после каждого замера, Н					Значения P_v после каждого замера, Н				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0,07	-	-	-	-	58,3	-	-	-	-	29,0	-	-	-	-
2	0,07	0,077	0,084	0,098	-	59,1	59,8	56,3	66,1	-	29,9	28,7	28,4	34,0	-
3	0,056	0,07	0,077	-	-	121,6	126,1	133,0	-	-	68,6	71,3	78,3	-	-
4	0,042	0,056	0,077	0,098	0,112	116,4	124,1	133,4	125,0	135,6	58,7	67,8	75,7	66,3	104,3

Анализ микроструктуры образцов, приработанных на различных режимах, показывает, что в присутствии касторового масла на контактных поверхностях образуется разрыхленный слой (рис. 5.2 и 5.3).

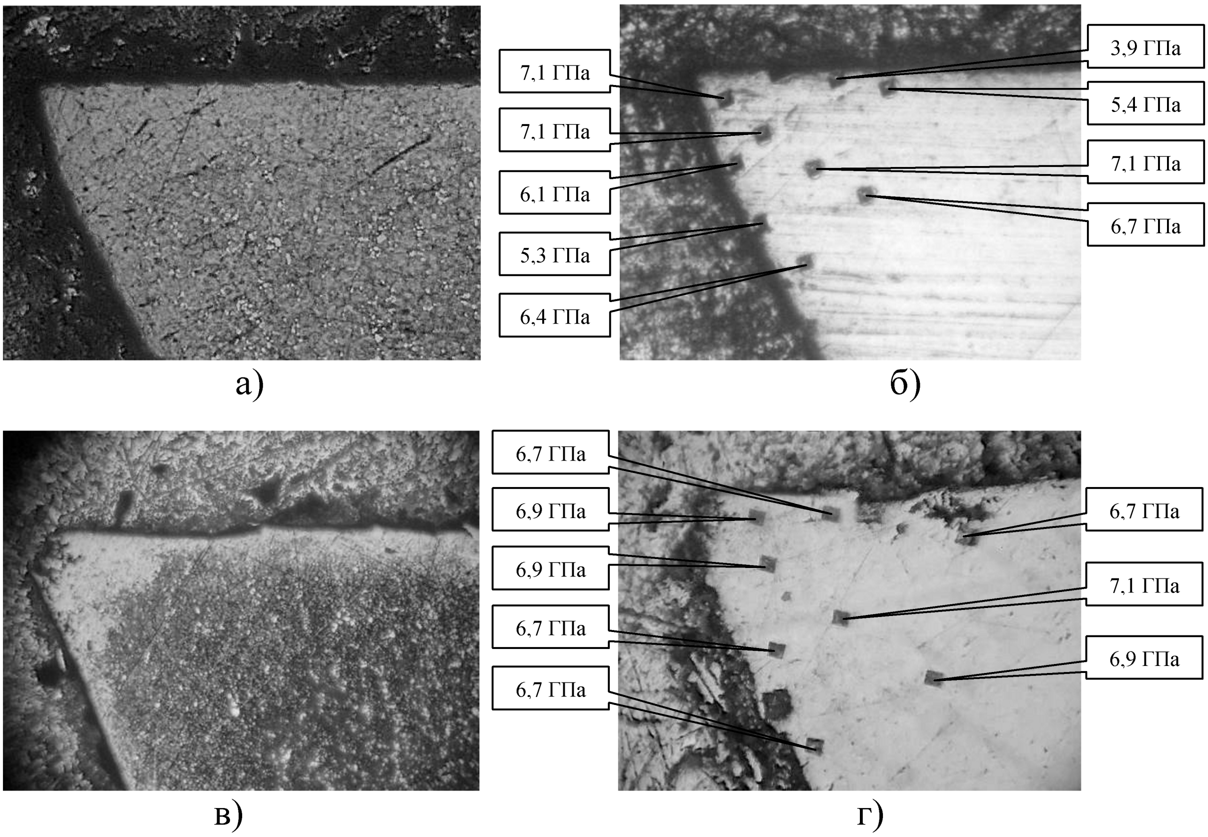


Рис. 5.2. Микроструктура и твердость образцов:
$V_{пр}$ = 15,47 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 0,8 мм; а, б – $h_{зпр}$ = 0,07 мм; в, г – $h_{зпр}$ = 0,098 мм (увеличение X200).

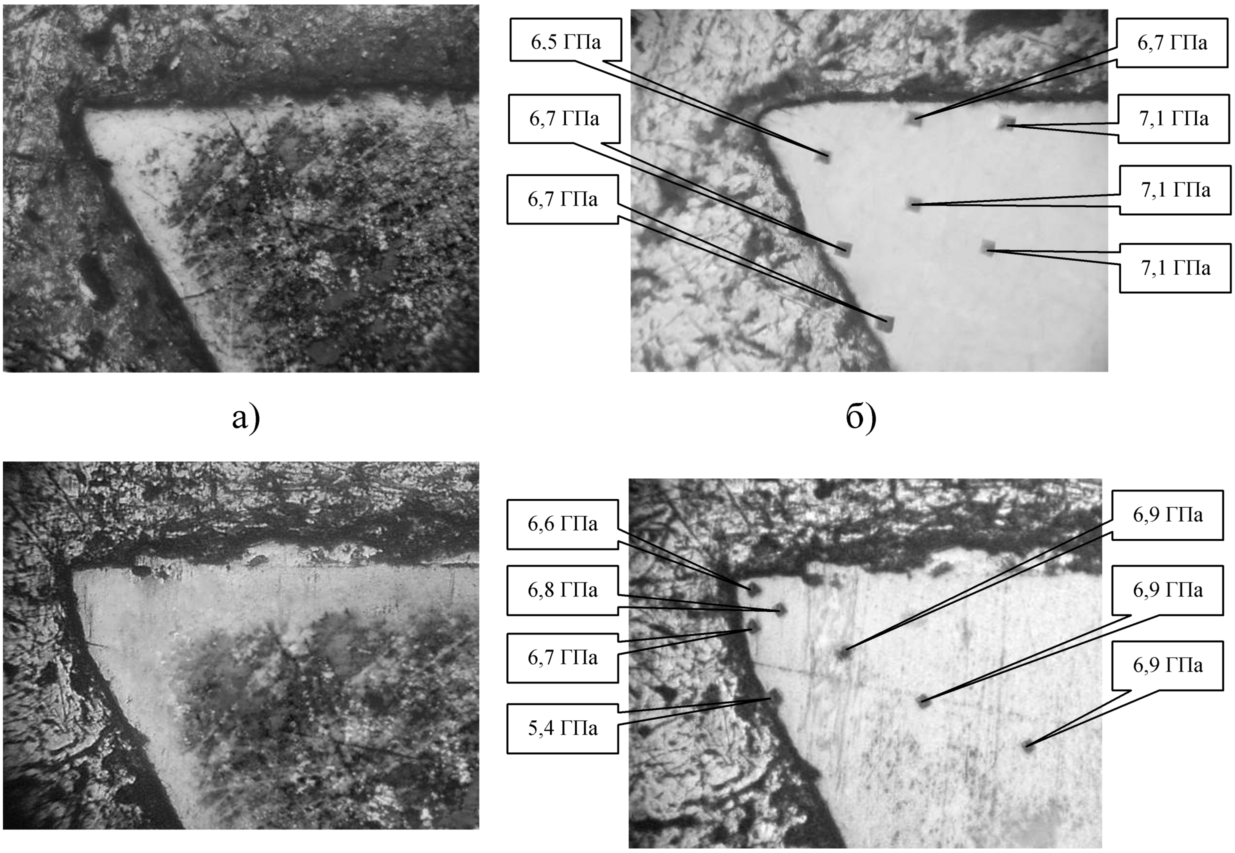
В зависимости от времени приработки и режимов резания под рыхлым слоем наблюдается более плотный (рис. 5.2 а) и рис. 5.3 а) и в)). Твердость этого слоя выше твердости верхнего и зависит от режимов приработки.

После приработки на режимах $V_{пр}$ = 15,47 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб до износа $h_{зпр}$ = 0,07 мм, т.е. после первого снижения усилий резания, которое соответствовало времени приработки $T_{пр}$ = 20 мин, образуется разупрочненный рыхлый слой. Разрыхленность этого слоя подтверждается измерениями твердости (рис. 5.2 б)).

При приработке зубьев на тех же режимах (фреза №1, таблица 5.1) до $h_{зпр}$ = 0,098 мм ($T_{пр}$ = 60 мин) на всех исследуемых образцах зубьев этой фрезы наблюдаются светлые слабосветящиеся неравномерные (наибольшие по величине у вершины режущей кромки) разрыхленные слои.

Измерение твердости этих слоев показало значительное ее повышение в сравнении с исследуемыми образцами фрезы №1 (рис. 5.2 б) и г)). Это может быть объяснено с одной стороны образованием плотных, более высокой твердости контактных слоев на поверхности инструмента с одновременным разрыхлением этих слоев вследствие проявления эффекта Ребиндера. Очевидно, это вызвано высоким содержанием рицинолеиновой кислоты (до 90%) в составе касторового масла, служащей поверхностно-активным веществом (ПАВ).

На рис. 5.3 проведены микроструктура и твердость по Виккерсу исследуемых образцов зубьев фрез, приработанных на более жестких режимах ($V_{пр}$ = 15,44 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 1,2 мм).



а) б)

в) г)

Рис. 5.3. Микроструктура и твердость образцов, приработанных фрез: $V_{пр}$ = 15,44 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 1,6 мм; а, б – $h_{зпр}$ = 0,077 мм; в, г – $h_{зпр}$ = 0,098 мм (увеличение X200).

При обработке образцов на этих режимах первое снижение составляющих усилий резания в среднем отмечалось после приработки до $h_{зпр}$ = 0,077 мм, затем усилия росли до $h_{зпр}$ = 0,098 мм, после этого опять отмечалось падение (таблица 5.1).

На протравленных образцах (рис. 5.3 а) и в)) разрыхленный образованный разрыхленный слой наблюдался сразу после первого измерения и продолжал увеличиваться с увеличением времени приработки.

Анализ результатов приведенных исследований позволяет предположить, что механизм образования контактных слоев в присутствии касторового масла связан с тем, что при знакопеременных нагрузках, возникающих в процессе приработки, в отдельных микрообъемах реализуются микроскопические деформации, приводящие к росту плотности дислокаций в поверхностных слоях. Мощным препятствием для выхода дислокаций является пассивированная, более высокой твёрдости поверхность, образующаяся под разрыхленным слоем. Повышенная плотность дислокаций является препятствием для более глубокого разрыхления поверхностных слоев, образовавшихся в результате химической адсорбции в присутствии исследуемой СОТС.

Таким образом, исследования показывают, что состояние контактируемых слоев инструмента с обрабатываемым материалом после приработки, по состоянию отличаются от полученных ранее [15] в присутствии других СОТС. Этим объясняется характер влияния режимов резания на стойкость инструмента при касторовом масле, т.е. микроструктурными и исследованиями твердости инструмента на различных режимах приработки установлено образование композиционных контактных слоев, которые состоят из верхних разрыхленных и лежащих под ними более плотных пассивированных повышенной твердости.

Кроме того, проведенные исследования позволяют высказать гипотезу о возможности неоднократной приработки инструмента за счет изменения режимов резания в процессе фрезерования с использованием различных СОТС.

5.2. Лабораторная проверка результатов исследований влияния режимов резания на стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности

Лабораторная проверка предусматривала постановку серии экспериментов для каждой из исследуемых в работе технологических сред с целью подтверждения результатов модельного исследования влияния режимов резания на стойкость шероховатость поверхности.

Лабораторные испытания проводились для каждой из СОТС по методике, предложенной в разделе 2 до фаски затупления по задней поверхности $h_з$ = 0,27 ÷ 0,35 мм. Такой диапазон изменения фаски износа определен невозможностью получения фиксированного износа каждого из зубьев фрезы и равномерного износа вдоль режущей кромки.

Учитывая рекомендуемые значения режимов упрочняющей приработки (раздел 4.3) режимы приработки инструмента выбраны из рекомендуемого диапазона с учетом условий обеспечения наименьшего времени приработки.

Так для всех испытуемых инструментов в присутствии исследуемых в работе сред глубина принята минимальной из рекомендуемых значений и равной t = 0,4 мм, а подача максимальной из рекомендуемых приработочных подач и равной S_z = 0,15 мм/зуб. Скорость для каждой серии испытаний была выбрана наибольшая из рекомендуемого диапазона, а именно – при сухой обработке и в присутствии МР-99 и И-20А скорость приработки принималась равной $V_{пр}$ = 15 ÷ 15,5 м/мин, а при использовании рапсового и касторового масел - $V_{пр}$ = 27 ÷ 28 м/мин, что определялось приработкой инструмента.

Исследования влияния режимов резания на стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности, приведенные по моделям (3.2…3.6 и 3.19…3.23) показали, что степень этого влияния каждого параметра режимов резания (V_c, S_z и t) проявляется во взаимосвязи друг с другом и в зависимости от используемой среды проявляется по-разному.

Таблица 5.2

Экспериментальная проверка результатов моделирования

№ п/п	Среда	Режимы приработки	Режимы резания			Сравнение результатов					
			V_c, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	$T_{экс}$, мин	$T_{расч}$, мин	**ΔT, %**	$R_{aэкс}$, мкм	$R_{aрасч}$, мкм	**ΔR_a, %**
1	Сухая обработка	$V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,4 мм	27,9	0,3	0,8	15,8	14	**12,8**	9,78	11,2	**14,5**
2			43,2	0,15	1,6	44,0	42,8	**2,8**	4,65	4,4	**6,6**
3			28,0	0,1	0,4	91,0	85,0	**7,0**	6,8	5,98	**13,7**
4			38,0	0,2	0,8	37,9	36,9	**2,7**	8,7	9,6	**10,0**
5	И-20А	$V_{пр}$ = 15,5 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,4 мм	27,45	0,3	0,4	51,2	52,06	**1,6**	3,7	3,6	**2,8**
6			38,0	0,1	0,4	121,0	132,2	**9,2**	5,1	4,83	**9,6**
7			37,8	0,2	0,8	78,8	63,1	**15,7**	6,1	6,25	**2,5**
8			27,5	0,15	2,0	97,0	95,4	**1,7**	10,8	11,0	**1,8**
9	МР-99	$V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,4 мм	48,9	0,1	1,2	87,0	92,0	**5,7**	0,71	0,8	**12,7**
10			38,0	0,2	0,8	58,0	56,2	**3,2**	0,78	0,7	**11,4**
11			39,8	0,3	0,4	34,0	37,4	**10,0**	1,3	1,44	**15,8**
12			35,6	0,3	0,8	33,0	36,7	**11,2**	1,1	1,2	**9,0**
13	Рапсовое масло	$V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,4 мм	27,51	0,1	0,8	145,0	159,7	**10,1**	3,7	3,52	**5,1**
14			48,0	0,25	2,0	6,1	5,48	**11,3**	3,82	3,52	**8,5**
15			38,0	0,2	0,8	43,1	39,7	**8,5**	1,57	1,39	**12,9**
16			28,0	0,25	1,2	76,0	67,5	**12,6**	1,12	1,08	**3,7**
17	Касторовое масло	$V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,4 мм	43,3	0,1	0,8	76,6	68,6	**11,6**	0,64	0,73	**10,6**
18			27,7	0,3	1,6	37,4	32,0	**17,0**	1,58	1,61	**1,9**
19			38,0	0,2	2,0	36,8	35,98	**1,02**	1,46	1,41	**3,5**
20			38,6	0,2	0,8	57,1	52,9	**7,9**	0,78	0,79	**1,3**

Для лабораторной проверки были выбраны по четыре опыта из статистического плана экспериментов, исследуемых для построения моделей, которые в лабораторных испытаниях отличались значением скорости приработки.

Такой подход выбора условий испытаний продиктован возможностью проверки влияния на стойкость инструмента режимов образования упрочненных слоев резанием.

Статистически обработанные результаты экспериментальных испытаний при моделировании и при лабораторной проверке в сравнении с рассчитанными по моделям приведены в таблице 5.2.

5.2.1. Стойкость и износ инструмента

Анализ лабораторных испытаний инструмента (таблица 5.2 - лабораторная проверка) подтверждает результаты исследований влияния режимов резания на стойкость инструмента, рассчитанные по моделям. Сопоставление экспериментальных значений стойкости с расчетными показывает их расхождение в пределах 10%. Это подтверждает выводы в результате модельных исследований о влиянии режимов резания на стойкость инструмента.

Относительно влияния режимов приработки на стойкость инструмента исследованиями по моделям установлено, что при сухой обработке и в присутствии МР-99 при S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,4 мм скорость приработки $V_{пр}$ в исследуемом ее диапазоне практически не оказывает влияния на стойкость инструмента. Это подтверждается и лабораторной проверкой (эксперименты 1, 2, 3, 4 – сухая обработка и 9, 10, 11, 12 – МР-99, таблица 5.2).

Таким образом можно рекомендовать в этом случае при фрезеровании стали 12Х18Н10Т скорость приработки выбирать равной до 28 м/мин. Это значительно сократит время приработки и позволит повысить стойкость инструмента при более высоких режимах его эксплуатации.

При фрезеровании в присутствии И-20А увеличение скорости приработки с 12 м/мин до 15,5 м/мин при глубине t = 2,0 мм и S_z = 0,3 мм/зуб по расчетным данным стойкость уменьшается примерно на 11%, что подтверждается экспериментально (эксперимент 12, таблица 5.2).

При приработке в среде рапсового и касторового масел результаты лабораторных исследований на принятых режимах приработки подтверждают результаты модельных.

В результате лабораторных испытаний для приработки с целью обеспечения образования вторичных упрочненных слоев по результатам модельных и лабораторных исследований можно рекомендовать скорость приработки до 28 м/мин для исследуемых сред, кроме И-20А. При приработке в среде, И-20А рекомендуемая скорость приработки находится в пределах $V_{пр}$ = 12 ÷ 15,5 м/мин. Рекомендуемые значения подачи на зуб и глубины резания находятся в интервале S_z = 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб, t = 0,4 ÷ 0,6 мм в присутствии любой из исследуемых сред.

В процессе лабораторных испытаний исследовалось состояние передней и задней поверхности зубьев фрезы, изношенных примерно до $h_з$ = 0,3 мм. Результаты этих исследований при сухой обработке и в присутствии касторового масла показаны на рисунках 5.4 и 5.5 соответственно.

передняя поверхность задняя поверхность

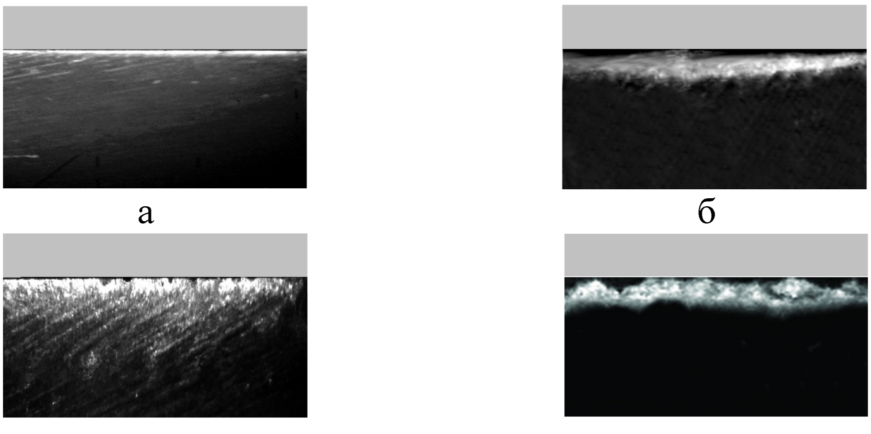


Рис. 5.4. Передняя и задняя поверхности изношенного инструмента при сухой обработке стали 12Х18Н10Т: V_c = 28 м/мин, t = 0,4 мм; а и б – S_z = 0,15 мм/зуб; в и г – S_z = 0,3 мм/зуб.

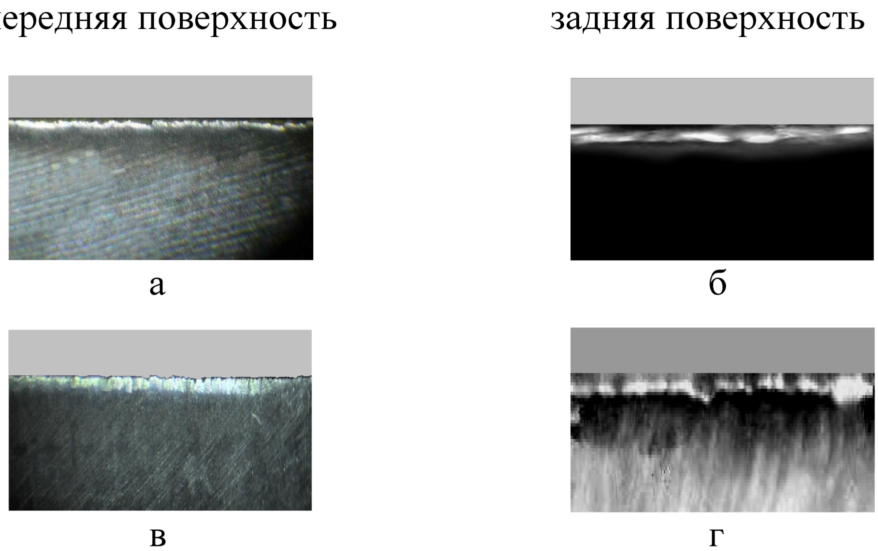


Рис. 5.5. Передняя и задняя поверхности изношенного инструмента в присутствии касторового масла при обработке стали 12Х18Н10Т: V_c = 28 м/мин, t = 0,4 мм; а и б – S_z = 0,15 мм/зуб; в и г – S_z = 0,3 мм/зуб.

Анализ изношенной до $h_з$ = 0,3 мм задней поверхности зубьев фрезы при подачах S_z = 0,15 мм/зуб и S_z = 0,3 мм/зуб, показывает, что при S_z = 0,15 мм/зуб наблюдается более плавный износ по задней поверхности вдоль режущей кромки чем при S_z = 0,3 мм/зуб (рис. 5.4 и 5.5 – в и г). На передней поверхности имеются следы контакта (в виде бликов) стружки с передней поверхностью, которые в определенной степени характеризуют особенности этого контакта.

Так, сравнивая их по ширине, следует отметить, что при сухой обработке по ширине они больше, чем в присутствии касторового масла (рис. 5.4 и 5.5 – а и б), что является подтверждением снижение площади контакта при использовании СОТС с передней поверхностью. Уменьшение ширины контакта стружки с передней поверхностью наблюдалось в большей или меньшей степени во всех случаях исследования СОТС.

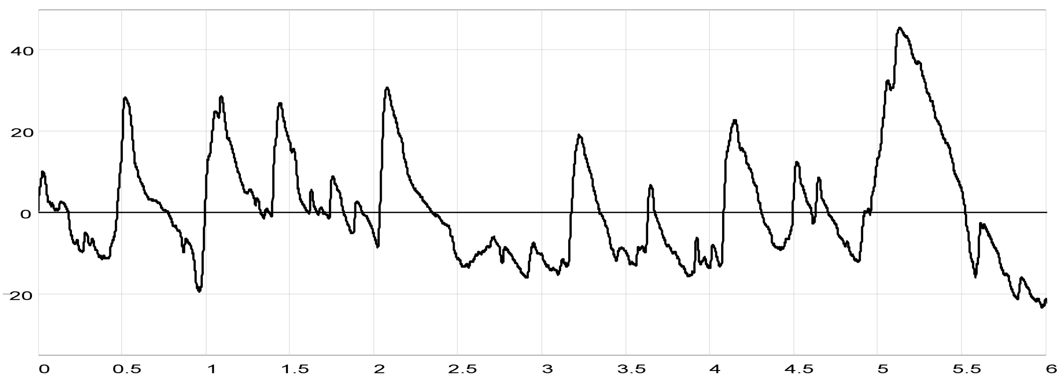
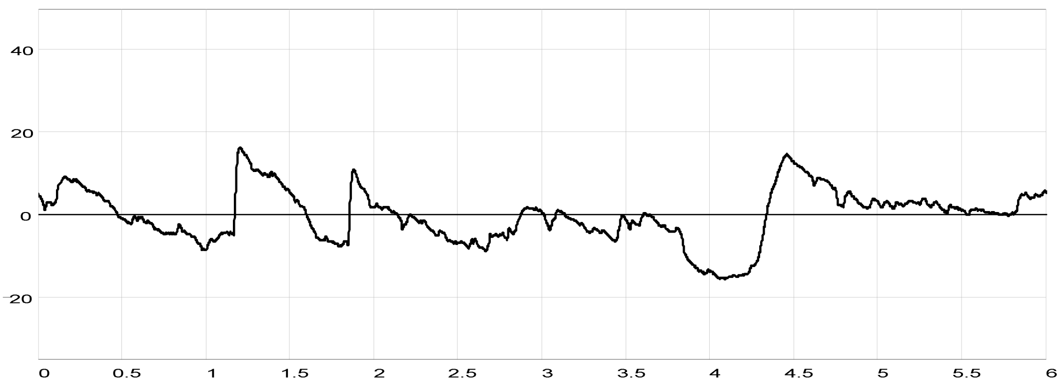
Анализ приведенных на рисунках 5.4 и 5.5 фотографий показывает, что ширина контакта стружки с передней поверхностью зависит также от подачи. С увеличением подачи их ширина увеличивается.

5.2.2. Исследование шероховатости поверхности

Проверка результатов исследований влияния режимов резания на шероховатость поверхности по моделям (3.19…3.23) проводилась проверкой равенства дисперсий, рассматриваемых экспериментальных выборок значений R_a для каждой из используемых технологических сред. Таким образом, были подтверждены результаты моделирования.

На рис. 5.6 (1, 2, 3, 4) приведены профилограммы шероховатости обработанной поверхности опытов наиболее близких к среднеарифметическому значению лабораторных испытаний при сухой обработке, представленных в таблице 5.2 (1, 2, 3, 4).

На представленных профилограммах наблюдается неустойчивый, для каждого опыта в различной степени, процесс образования шероховатости, что может объясняться неустойчивостью стружкообразования, вызванного, прежде всего износом контактных площадок зубьев фрезы, изменением сил трения и тепловых потоков [1].

№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
1	9,78	
2	4,65	

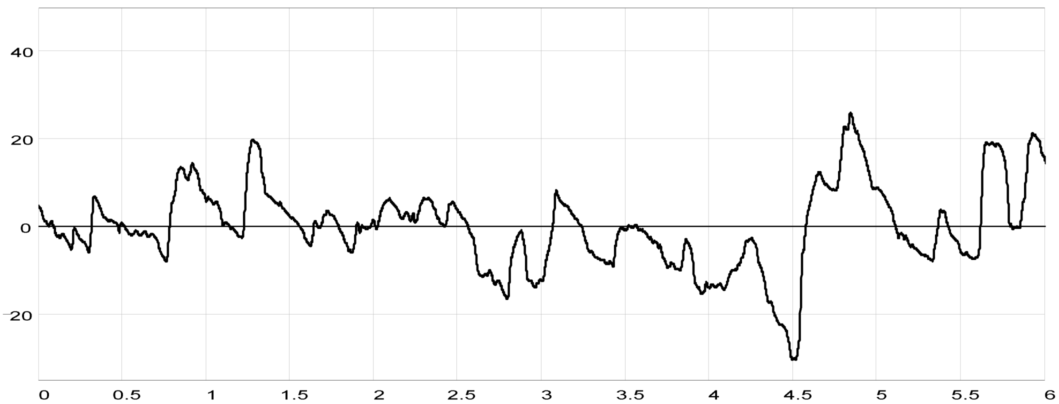
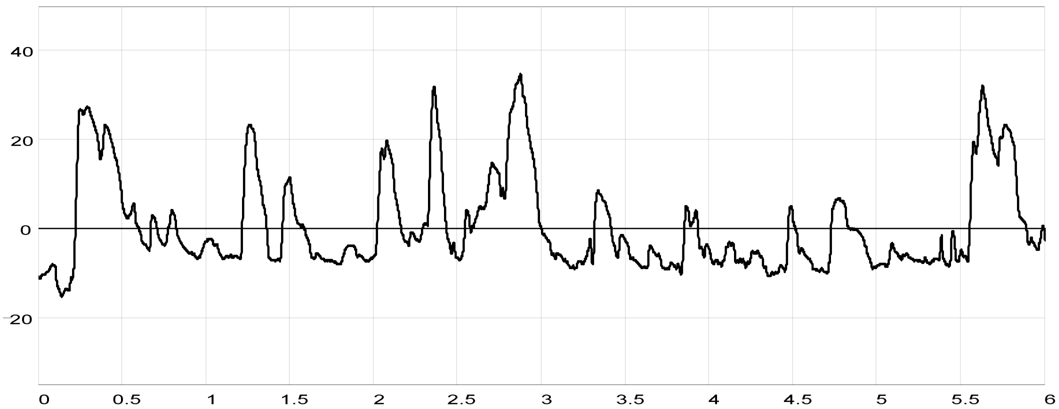
<table>
<tr><th>№</th><th>Ra, мкм</th><th>Профилограммы шероховатости обработанной поверхности</th></tr>
<tr><td>3</td><td>6,8</td><td>
</td></tr>
<tr><td>4</td><td>8,7</td><td>
</td></tr>
</table>

Рис. 5.6. Профилограммы шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании всухую стали 12Х18Н10Т: **1** – V_c = 27,9 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,8 мм; **2** – V_c = 43,2 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 1,6 мм; **3** – V_c = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм; **4** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,8 мм.

Аналогично сухой обработке при различных режимах фрезерования на рис. 5.7 (1, 2, 3, 4) рассмотрены профилограммы шероховатости обработанной поверхности с использованием И-20А. При фрезеровании стали 12Х18Н10Т в этом случае шероховатость практически не отличается от шероховатости при сухой обработке.

Для рассматриваемого случая анализ результатов влияния режимов резания на шероховатость поверхности при лабораторной проверке подтверждает результаты моделирования. Так, с увеличением глубины резания и скорости V_c шероховатость обработанной поверхности увеличивается (рис. 5.7).

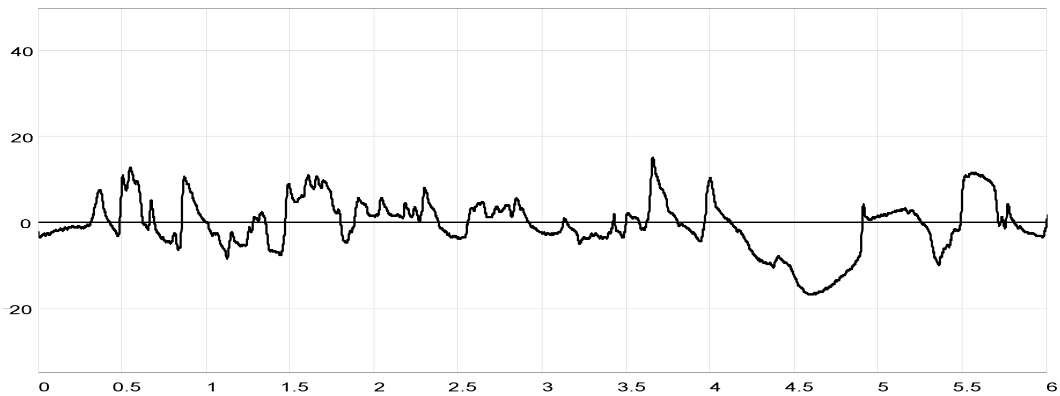
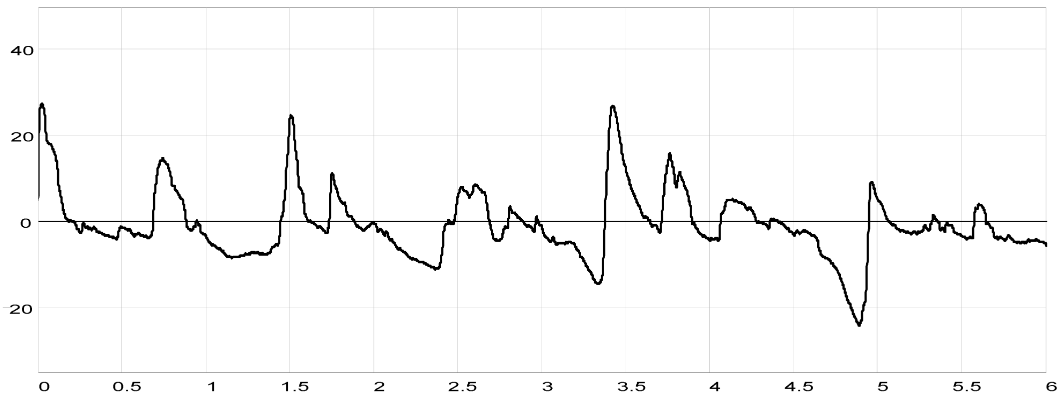
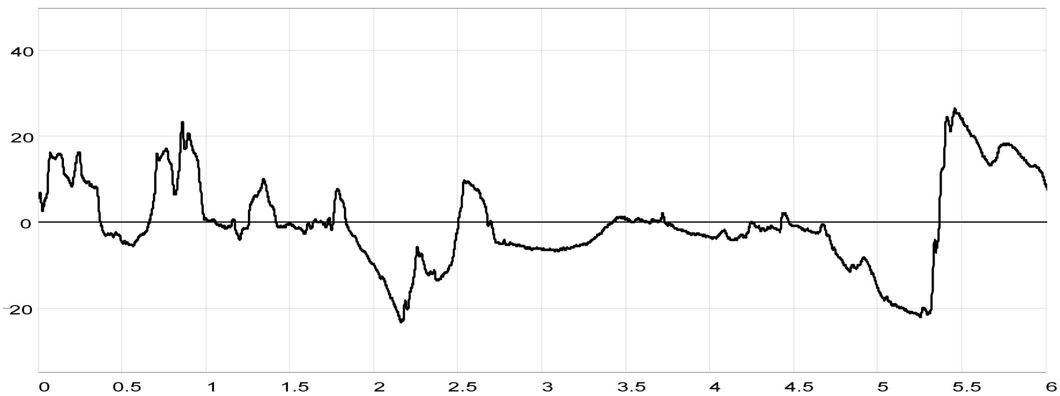
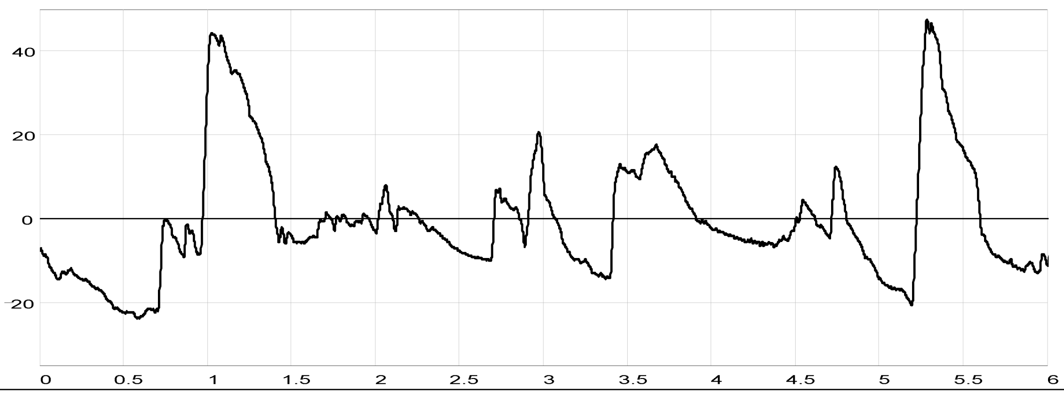
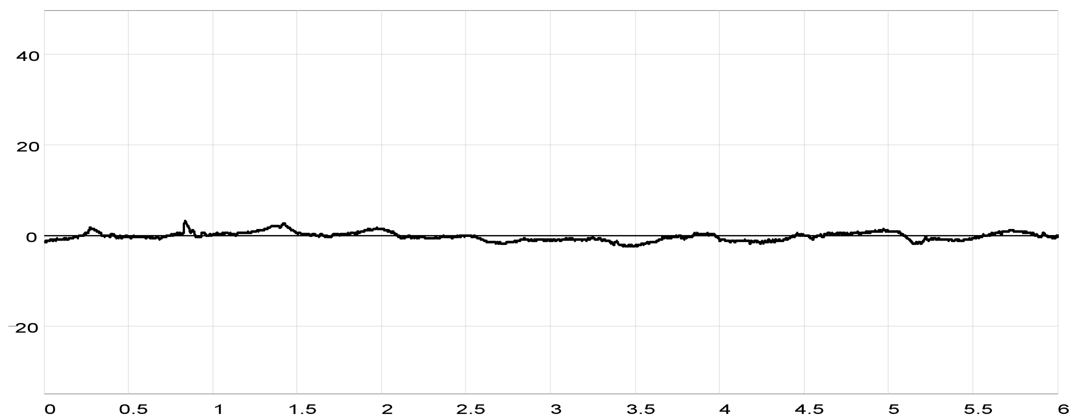
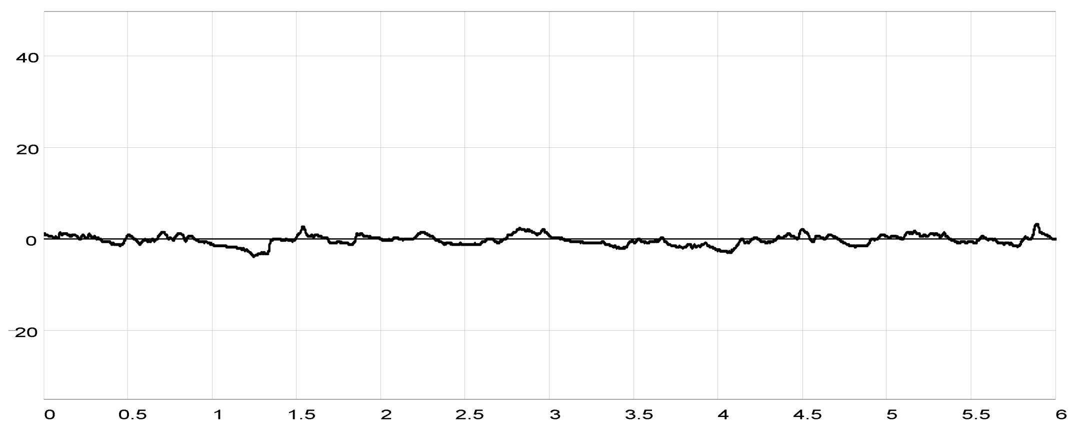
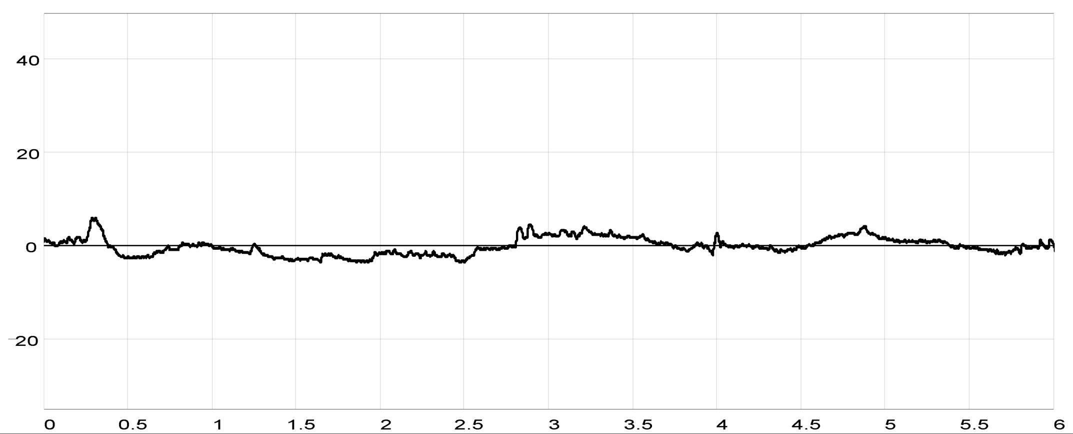
№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
1	3,7	
2	5,1	
3	6,1	
4	10,8	

Рис. 5.7. Профилограммы шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии И-20А: **1** – V_c = 27,45 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм; **2** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм; **3** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,8 мм; **4** – V_c = 27,5 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб, t = 0,2 мм.

При этом влияние глубины резания шероховатость поверхности проявляется в большей степени, чем скорость. Подача же в исследуемом диапазоне ее изменения не оказывает значимого влияния на шероховатость обработанной поверхности (рис. 5.7).

На рис. 5.8 (1, 2, 3, 4) представлены, аналогично предыдущим, профилограммы шероховатости поверхности с использованием МР-99. Их анализ показывает, что во всем диапазоне модельных исследований влияние на R_a режимов резания проявляется в тесной взаимосвязи друг с другом.

№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
1	**0,71**	
2	**0,78**	
3	**1,3**	

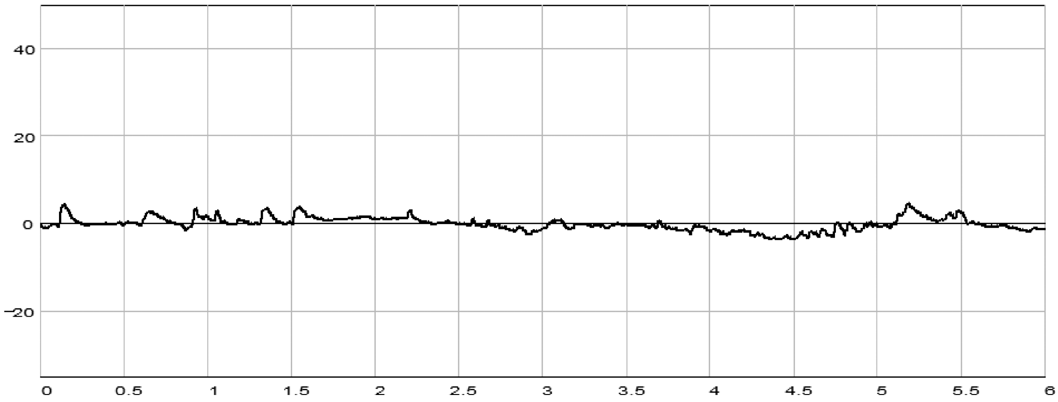
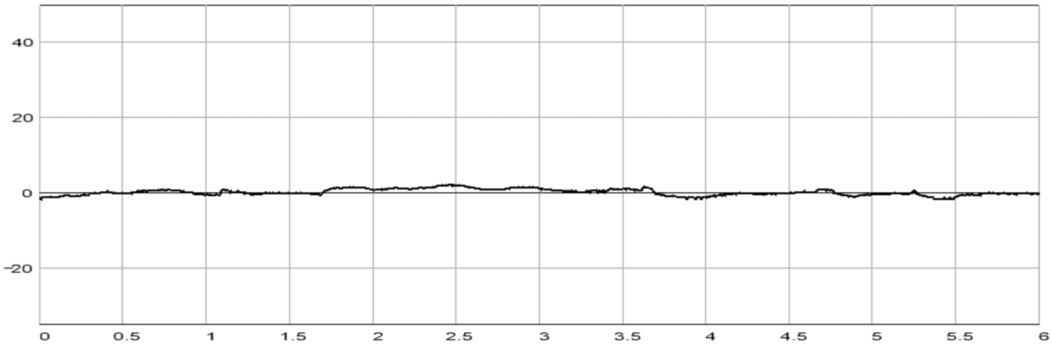
№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
4	1,1	

Рис. 5.8. Профилограммы шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии МР-99: **1** – V_c = 48,9 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 1,2 мм; **2** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,8 мм; **3** – V_c = 39,8 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,4 мм; **4** – V_c = 35,6 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 0,8 мм.

Сравнение профилограмм, полученных всухую, а также в присутствии И-20А и МР-99, показывает, что для получения минимальной шероховатости поверхности следует применять МР-99.

При использовании МР-99 в случае фрезерования инструментом, зубья каждого приработаны со скоростью максимально допустимой при исследовании ее влияния наблюдается повышение шероховатости в сравнении с инструментом, приработанным на рекомендуемых скоростях $V_{пр}$.

На рис. 5.9 (1, 2, 3, 4) изображены профилограммы обработанной поверхности с использованием рапсового масла, значения шероховатостей которых, как и в ранее рассмотренных случаях, в наибольшей степени приближаются к среднеквадратичному значению из девяти замеров (таблица 5.2).

№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
1	3,7	

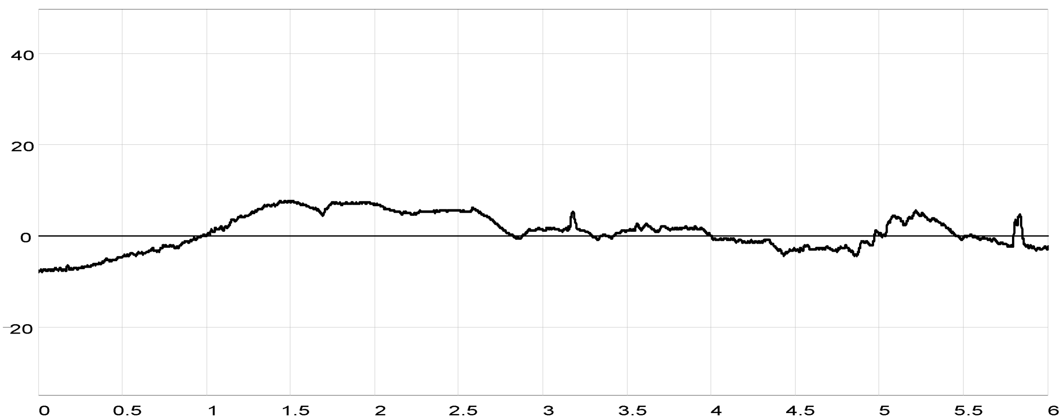
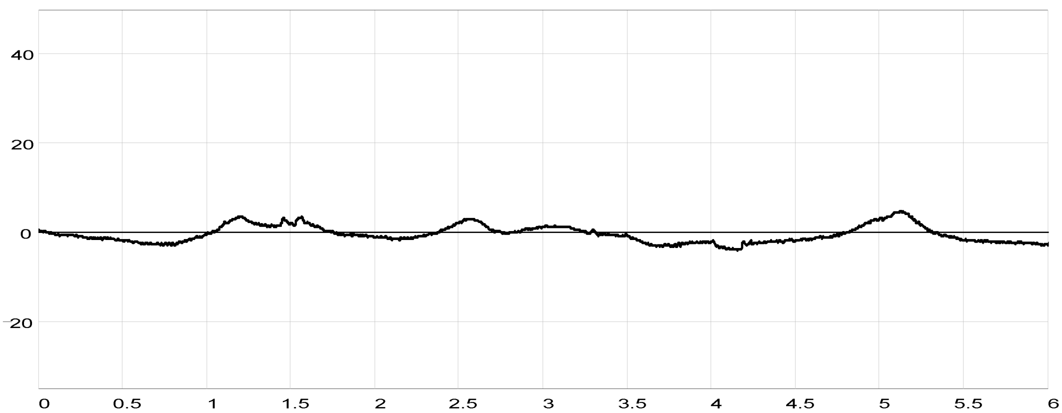
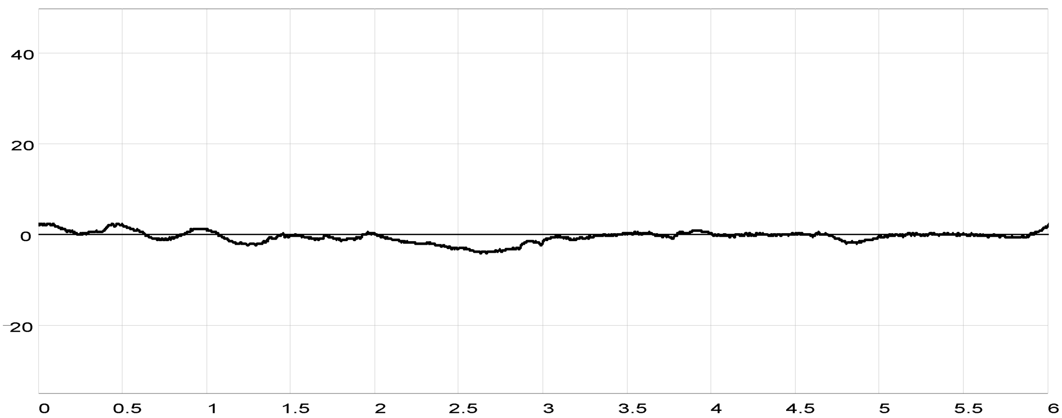
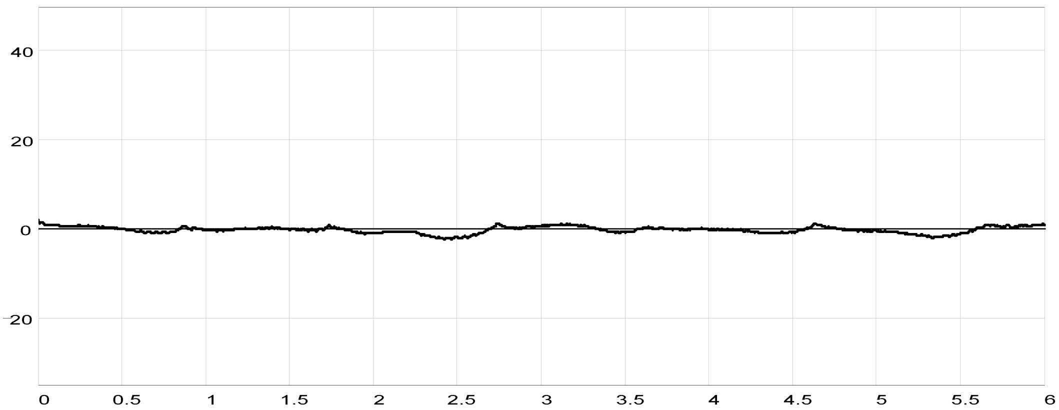
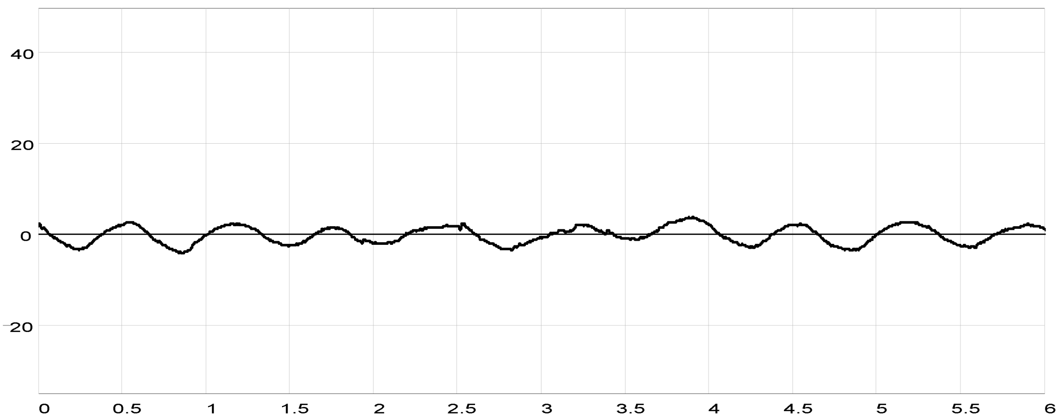
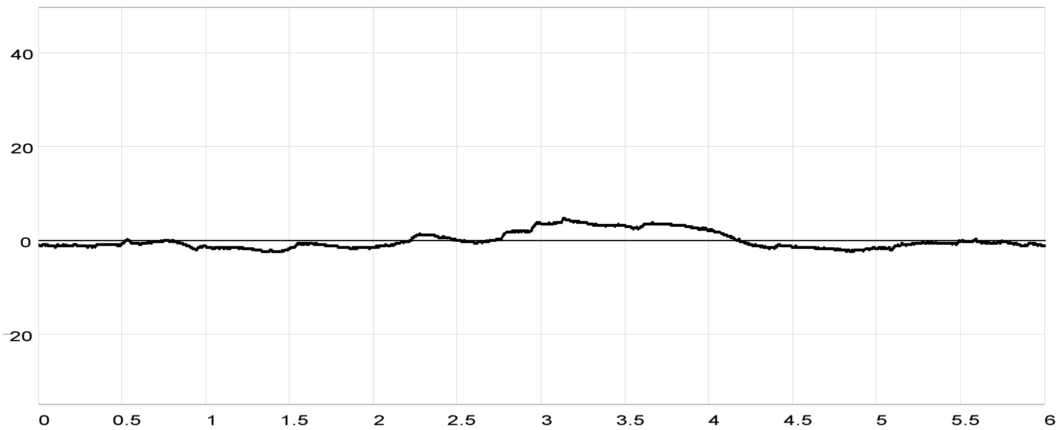
№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
2	3,82	
3	1,57	
4	1,12	

Рис. 5.9. Профилограммы шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии рапсового масла: **1** – V_c = 27,5 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм; **2** – V_c = 48 м/мин, S_z = 0,25 мм/зуб, t = 2,0 мм; **3** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,8 мм; **4** – V_c = 28 м/мин, S_z = 0,25 мм/зуб, t = 1,2 мм.

Как показывают экспериментальные и модельные исследования с увеличением подачи на зуб, скорости и глубины резания шероховатость обработанной поверхности увеличивается. Влияние режимных параметров на шероховатость поверхности при этом проявляется во взаимосвязи друг с другом. Однако наибольшее влияние на увеличение R_a оказывает глубина резания.

На рис. 5.10 (1, 2, 3, 4) представлены профилограммы шероховатости при фрезеровании стали 12Х18Н10Т инструментом из стали Р6М5 в присутствии касторового масла.

Анализ экспериментальных исследований показывает, что наибольшее влияние на изменение шероховатости оказывает подача и глубина резания, что подтверждает результаты модельных исследований (таблица 5.2 - эксперименты 19, 20). При этом влияние подачи и глубины проявляется во взаимосвязи.

№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
1	0,64	
2	1,58	
3	1,46	

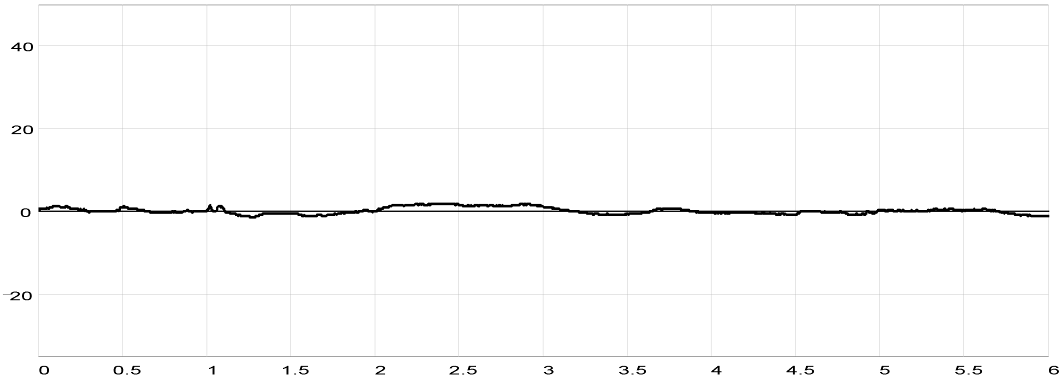
№	Ra, мкм	Профилограммы шероховатости обработанной поверхности
4	0,78	

Рис. 5.10. Профилограммы шероховатости при фрезеровании стали 12Х18Н10Т в присутствии касторового масла: **1** – V_c = 43,3 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,8 мм; **2** – V_c = 27,7 м/мин, S_z = 0,3 мм/зуб, t = 1,6 мм; **3** – V_c = 38 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 2,0 мм; **4** – V_c = 38,6 м/мин, S_z = 0,2 мм/зуб, t = 0,8 мм.

5.3. Разработка рекомендаций по назначению режимов резания, обеспечивающих образование упрочненных вторичных слоев резанием

Разработка рекомендаций по назначению режимов приработки проведена на основании их влияния на стойкость инструмента по моделям с их последующей экспериментально-лабораторной проверки. Эффект образования упрочненных слоев основан на деформационной приработке инструментов, предшествующих износу быстрорежущей стали, работающих по технологическим ограничениям в диапазоне определенных температур, которые в условиях непрерывного резания составляют в интервале 200 ÷ 400 °С.

При определении режимов приработки, кроме условия достижения максимального возможной стойкости, необходимо учитывать также и условие минимально возможного времени, при котором достигается эффект упрочнения. В связи с этим возникает задача определения времени необходимого на приработку. Время приработки при фрезеровании определяется минутной подачей, которая в свою очередь зависит от скорости резания, диаметра фрезы и подачи на зуб, а также количеством зубьев.

Для экспериментальной проверки рекомендованных в результате модельных исследований режимов приработки в среде каждой из исследуемых СОТС было проведено три серии опытов, а именно:

– при фрезеровании плоскостей однозубой торцовой фрезой Ø100 мм по ГОСТ 26595-85;

– при фрезеровании дисковой фрезой Ø100 мм с разнонаправленными зубьями (Z = 14) по ГОСТ 28527-90;

– при фрезеровании концевой фрезой Ø10 мм (Z = 3) по ГОСТ 17026-71.

Размеры заготовок соответствовали принятым в экспериментах при формировании матрицы экспериментальных данных (раздел 2). При обработке однозубой фрезой на заготовках за один проход обрабатывались все уступы (7 уступов).

Так при сухой обработке режимами приработки, при которых образуется упрочненные слои на контактных поверхностях инструмента, были рекомендованы $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,1 мм/зуб, t = 0,4 мм.

Соответственно, для фрез, участвующих в лабораторных испытаниях, минутная подача равнялась: $S_м$ = 9 мм/мин – однозубая торцовая; $S_м$ = 126 мм/мин – дисковая; $S_м$ = 270 мм/мин – концевая. Результаты испытаний до принятого критерия затупления $h_з$ = 0,1 мм этих фрез после статистической обработки показали, что среднее значение времени приработки составило для:

– однозубой торцовой фрезы Ø100 мм – 85 мин;

– дисковой фрезы Ø100 мм с Z = 14 – 11 мин;

– концевой фрезы Ø10 мм с Z = 3 – 5 мин.

Таким образом, по результатам лабораторных испытаний можно прийти к выводу, что чем меньше диаметр фрезы и чем больше число зубьев, тем меньше затрачивается времени на приработку. Следует отметить, что время приработки не находится в прямой зависимости от этих конструктивных элементов фрез. Это может быть объяснено теплофизическими процессами, происходящими в процессе фрезерования фрезами с различными значениями таких конструктивных элементов как диаметр и количество зубьев.

Рассматривая фрезерование как процесс, состоящий из периодически повторяющихся рабочего хода, во время которого режим резания сохраняется постоянным, и холостого хода, во время которого теплота в режущий клин (зуб) не поступает. Согласно [105] при многократном повторении рабочих и холостых ходов температура резания тем выше одиночного реза, чем меньше длительность холостого хода по отношению к рабочему ходу. Это подтверждается и результатами, полученными при приработке, рассматриваемых видов фрез.

Расчетами по моделям (приложение Г) показано, что с увеличением подачи при приработке значительно снижается стойкость зубьев фрез при работе на последующих эксплуатационных режимах.

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены в среде каждой из исследуемых СОТС. По результатам этих исследований установлено, что их отклонение от исследований по моделям в среднем составляет не более ±10% для каждой серии опытов.

Таким образом, экспериментальные исследования в полной мере подтвердили результаты модельных опытов. В результате чего показано, что исследования влияния режимов приработки по моделям на стойкость инструмента с учетом минимизации времени приработки позволяют в определенных условиях производства при фрезеровании определенных изделий несколько расширить диапазон рекомендованных режимов приработки с допустимой потерей стойкости инструмента.

С целью возможности сокращения времени приработки (для сравнения с рекомендованными режимами и режимами, учитывающими снижения времени приработки) были проведены в среде каждой из СОТС стойкостные испытания неупрочненного инструмента на скоростях V_c = 28 м/мин и V_c = 40 м/мин, подачей S_z = 0,2 мм/зуб, глубиной t = 0,5 мм. Результаты стойкостных исследований в сравнении с рассчитанными приведены на рис. 5.11.

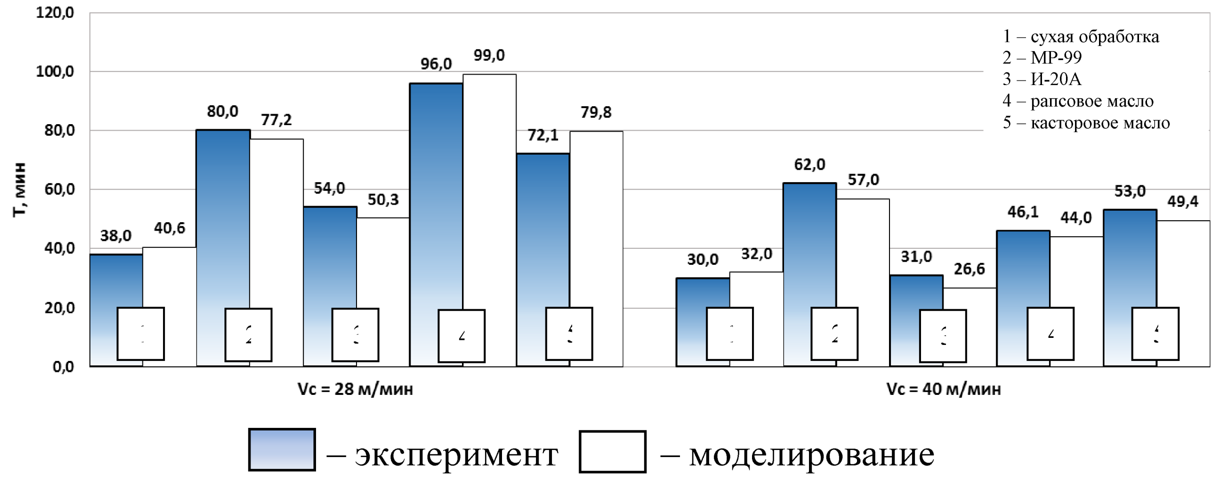


Рис. 5.11. Сравнение экспериментальных и расчетных значений стойкости при $V_{пр}$ = 28 м/мин; S_z = 0,2 мм/зуб; t = 0,5 мм.

В качестве стойкости неприработанного инструмента, относительно которой определилась степень упрочнения его контактных поверхностей, принята за результатами эксперимента стойкость равная 38 мин.

На рис. 5.12 приведена стойкость зубьев фрез, в среде исследуемых СОТС при различных режимах приработки и эксплуатационными скоростями V_c = 28 м/мин и V_c = 40 м/мин при подачах и глубинах, соответствующих режимам приработки.

Анализ приведенных на рис. 5.12 результатов показывает, что стойкость инструмента независимо от используемой СОТС приработанного на рекомендуемых в результате моделированиям режимах значительно выше стойкости инструмента в сравнении с неприработанным в условиях сухой обработки (T_o). При этом степень повышения стойкости при одних и тех же режимах эксплуатации инструмента зависит от среды, в которой производится процесс фрезерования стали 12Х18Н10Т.

Режимы приработки, отличающиеся от рекомендованных снижают стойкость зубьев фрез. Степень допустимости этого снижения определяется конструкцией инструмента и конкретными требованиями производства.

Во сколько раз увеличивается или уменьшается стойкость инструмента при различных режимах приработки приведено в таблице 5.3.

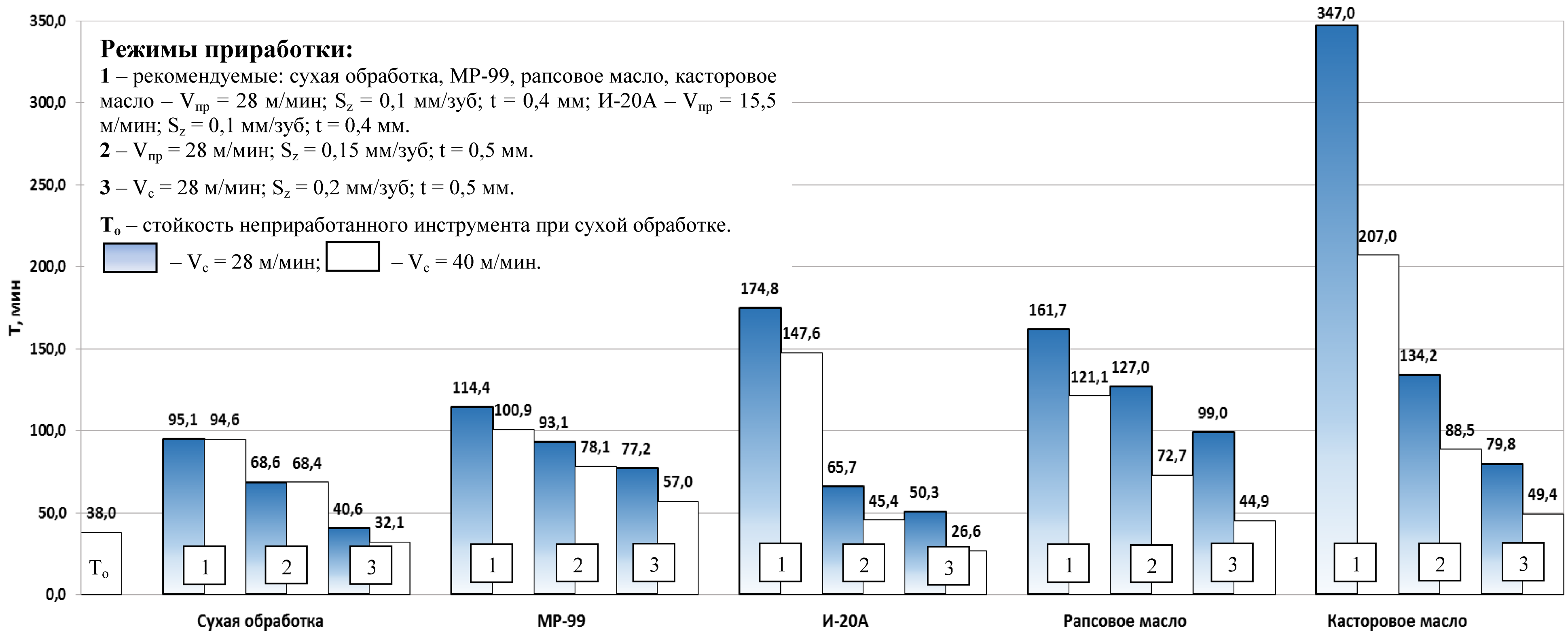


Рис. 5.12. Относительная стойкость инструмента при различных режимах приработки и разных скоростях резания приработанного инструмента.

Таблица 5.3

Изменение стойкости при использовании различных СОТС

Среда	Режимы приработки					
	1		2		3	
	Эксплуатационная скорость резания					
	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин	V_c = 28 м/мин	V_c = 40 м/мин
Сухая обработка	в 2,5 – 2,4	в 2,5 – 2,4	в 1,8	в 1,8	в 1,1	в **(1,1 – 1,2)**
МР-99	в 3,0 – 2,9	в 2,7 – 2,6	в 2,5	в 2,1 – 2,0	в 2,0	в 1,5 – 1,4
И-20А	в 4,6 – 4,2	в 3,8 – 3,4	в 1,7	в 1,2	в 1,3	в **(1,4)**
Рапсовое масло	в 4,3 – 4,2	в 3,2 – 3,1	в 3,4	в 2,4	в 2,6	в 1,18
Касторовое масло	в 9,1 – 7,8	в 5,4 – 4,5	в 3,8	в 2,3	в 2,1	в 1,3

На основании различного влияния режимов приработки на стойкость инструмента можно предположить, что при рекомендуемых режимах приработки наиболее полно реализуется ресурс упрочнения контактных слоев инструмента.

Согласно взаимному влиянию температурно-силового нагружения (рис. 1.1 состояние II) в процессе приработки на трансформацию свойств контактных слоев инструмента из быстрорежущей стали можно утверждать, что при режимах приработки, отличных от рекомендуемых, наблюдается меньшая степень пластической деформации поверхностных слоев, что приводит к образованию меньшей степени упрочненных слоев.

Такое объяснение снижение стойкости при режимах отличных от рекомендуемых в данных исследованиях подтверждается исследованиями проф. В.С. Майбороды [107-109], направленными на упрочнение контактных слоев инструмента методом магнитно-абразивной обработки.

Обработка резанием в присутствии различных технологических сред осуществляется во взаимосвязи всех действий, присущих той или иной СОТС.

В зависимости от обрабатываемого материала, режимов приработки и режимов эксплуатации приработанного инструмента наблюдается преобладание того или иного эффекта наряду с остальными. Проведенные исследования в среде рапсового масла, МР-99, И-20А и при сухой обработке при взаимном влиянии имеющихся воздействий наблюдается один и тот же механизм образования вторичных упрочненных структур. Это подтверждается корреляцией стойкости инструмента и усилий резания в зависимости от режимов приработки. В данных исследованиях и подтверждается исследовании механизма образования вторичных упрочненных структур на контактных поверхностях инструмента.

Таким образом, можно утверждать, что в зависимости от используемой СОТС (рапсовое масло, МР-99, И-20А и сухой обработке) при приработке превалирует эффект упрочнения, степень которого зависит для каждой из рассматриваемых СОТС от режимов приработки.

В присутствии касторового масла реализуется механизм отличный от рассмотренного выше. Преобладающим воздействием данной среды (как было показано) является эффект Ребиндера.

Анализируя влияние режимов приработки на стойкость инструмента при различных скоростях его дальнейшей эксплуатации можно рекомендовать ужесточить режимы приработки за счет некоторой потери стойкости (рис. 5.12) за счет увеличения подачи до 0,15 мм/зуб.

Приработка инструмента при S_z = 0,2 мм/зуб за исключением сухой обработки и И-20А обеспечивает повышение стойкости более чем в 2 раза только при последующей его эксплуатации со скоростью V_c = 28 м/мин.

Таким образом, с позицией допустимой потери стойкости, рекомендуемые модельными исследованиями режимы резания можно ужесточить за счет увеличение подачи до S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,5 мм в диапазоне дальнейших скоростей эксплуатации. При приработке с подачей S_z = 0,2 мм/зуб наибольшее увеличение стойкости при эксплуатационной скорости V_c = 28 м/мин в среде МР-99, рапсового и касторового масел.

Для определения рекомендаций по эффективному использованию СОТС в условиях чистовой, получистовой и черновой обработки при фрезеровании сталей аустенитного класса рассмотрим влияние режимов эксплуатации на шероховатость поверхности.

Так исследование шероховатости в условиях сухого фрезерования стали 12Х18Н10Т приработанным инструментом при $V_{пр}$ = 28 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,5 мм во всем диапазоне изменения режимов приработки обеспечивает шероховатость обработанной поверхности по R_a в пределах 4,65 ÷ 9,78 мкм.

При фрезеровании в среде И-20А в исследуемом диапазоне изменения режимов эксплуатации инструмента после приработки обеспечивается шероховатость поверхности R_a = 3,7 ÷ 10,8 мкм.

При фрезеровании в среде:

– МР-99 от режимов фрезерования приработанного инструмента значение шероховатости обработанной поверхности R_a = 0,71 ÷ 1,3 мкм;

– рапсового масла при фрезеровании с V_c = 28 м/мин, S_z = 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб и t = 0,8 ÷ 1,2 мм – R_a = 1,12 мкм;

при V_c = 38 ÷ 48 м/мин, S_z = 0,2 ÷ 0,3 мм/зуб и t = 2,0 мм – R_a = 1,57 ÷ 3,82 мкм;

– касторового масла при фрезеровании с V_c = 43,3 м/мин, S_z = 0,1 ÷ 0,15 мм/зуб и t = 0,8 мм – R_a = 0,64 ÷ 0,78 мкм;

при V_c = 27,7 ÷ 38 м/мин, S_z = 0,2 ÷ 0,3 мм/зуб и t = 1,6 ÷ 2,0 мм – R_a = 1,41 ÷ 1,58 мкм.

Таким образом, приработанным инструментом с V_c = 28 м/мин, S_z = 0,15 мм/зуб и t = 0,5 мм в присутствии И-20А и при сухой обработке обеспечивается от режимов фрезерования шероховатость поверхности, которая обычно соответствует черновой обработке.

При использовании МР-99 шероховатость поверхности соответствует условиям получистовой и чистовой обработке.

Фрезерование в среде рапсового масла шероховатость соответствующая чистовой обработке достигается при минимальной скорости фрезерования приработанным инструментом в диапазоне подач $S_z = 0,1 \div 0,15$ мм/зуб и $t \leq 1,2$ мм. В остальных случаях шероховатость соответствует получистовой обработке.

В среде касторового масла аналогично рапсовому маслу шероховатость поверхности соответствует чистовой обработке при $V_c = 28$ м/мин, $S_z = 0,1 \div 0,15$ мм/зуб и $t = 0,8 \div 1,2$ мм. Увеличение режима эксплуатации инструмента шероховатость поверхности повышается.

Таким образом, с точки зрения обеспечение низкой шероховатости рекомендуется применять в качестве технологической среды МР-99, рапсовое и касторовое масла.

В зависимости от требований производства и конструктивных особенностей, и требований к нему в соответствии с гистограммой (рис. 5.12) можно назначить соответствующие режимы приработки.

5.4. Промышленная проверка результатов исследований

Промышленная проверка результатов исследований по упрочненному действию СОТС при фрезеровании деталей из стали 12Х18Н10Т.

Испытания проводились при фрезеровании плоскостей детали «Плита» 5Р2. 213.00.014 распределителя 5-ти ступенчатого из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на горизонтально-фрезерном станке модели 6Т83Г в среде различных СОТС. В качестве технологической среды были выбраны рапсовое и касторовое масла, рекомендуемая СОТС при резании сталей аустенитного класса – МР-99, а также в условиях сухой обработки.

В присутствии каждой из сред испытывались по 3 фрезы до принятого критерия затупления $h_з = 0,3$ мм (фаска износа по задней поверхности).

Испытывались цилиндрические фрезы из стали Р6М5, Ø80 мм, длиной L = 80 мм с Z = 10, изготовленные по ГОСТ 29092-91, с передним углом – γ = 15°±1°, задним углом – α = 12°±1°, углом наклона зубьев – ω = 10°±1°.

Процесс испытаний состоял из приработки зубьев фрезы, с целью образования вторичных упрочненных структур на их контактных поверхностях с последующим изменением режимов резания, рекомендуемых для получистового и чистового фрезерования с использованием технологии минимального смазывания.

Режимы приработки: $V_{пр}$ = 28 м/мин; $S_{zпр}$ = 0,15 мм/зуб; t = 0,5 мм в среде рапсового и касторового масел, МР-99 и при сухой обработке.

Были назначены следующие режимы резания при фрезеровании предварительно приработанным инструментом:

– при получистовом фрезеровании:

V_c = 35 м/мин; S_z = 0,2 мм/зуб; t = 1,2 мм в среде рапсового масла, касторового масла, МР-99 и при сухой обработке;

– при чистовом фрезеровании:

V_c = 45 м/мин; S_z = 0,15 мм/зуб; t = 0,5 мм в среде рапсового масла, касторового масла, МР-99 и при сухой обработке.

В результате статистической обработки стойкость фрез составила:

– при получистовом фрезеровании:

в среде рапсового масла – 110 мин;

в среде МР-99 – 85 мин;

в среде касторового масла – 82 мин;

при сухой обработке – 35 мин.

– при чистовом фрезеровании:

в среде касторового масла – 170 мин;

в среде рапсового масла – 130 мин;

в среде МР-99 – 90 мин;

при сухой обработке – 43 мин.

Таким образом, проведенные промышленные испытания подтвердили результаты исследований по упрочненному действию СОТС и назначении режимов приработки, которые при последующем фрезеровании на более жестких условиях обеспечивают необходимое повышение стойкости зубьев фрез.

Выводы

1. Впервые рассмотрен механизм образования упроченных контактных слоев инструмента при фрезеровании стали в присутствии касторового масла. Установлено, что в его основе лежит преобладание эффекта Ребиндера и образование разрыхленного слоя, который служит в процессе резания твердой смазкой.

2. На основе сравнительного анализа приработанного инструмента и шероховатости обработанной поверхности, рассчитанных по моделям, и результатов экспериментальной проверки подтверждена адекватность моделей, полученных виде зависимостей $T = f(V_{пр}, S_z, V_c, t)$ и $R_a = f(S_z, V_c, t)$, изучаемому процессу. Это позволяет на основе исследования процесса по моделям, разрабатывать рекомендации по назначению режимов приработки и дальнейшей эксплуатации приработанного инструмента с заданной шероховатостью поверхности.

3. На основе исследований состояния изношенных зубьев инструмента подтверждено, что при фрезеровании сталей, аналогично непрерывному резанию с использованием смазочно-охлаждающей жидкости, площадь контакта зубьев уменьшается. Показано, что с увеличением подачи на зуб ширина контакта увеличивается.

4. На основе анализа изменения стойкости и горизонтальной составляющей силы резания P_h и режимов приработки при использовании различных СОТС показано, что в заданных пределах изменения $V_{пр}$, S_z и t наибольший эффект повышения стойкости в условиях использования МР-99,

рапсового масла, и касторового масел и при сухой обработке наблюдается на наименьших значения подачи на зуб и глубине резания. Рекомендуемой значением скорости приработки в присутствии рассматриваемых СОТС (за исключением И-20А, является $V_{пр}$ = 28 м/мин.

5. С учетом допустимого уменьшения времени приработки разработаны рекомендации по назначению режимов приработки при рекомендуемой скорости приработки в среде И-20А – $V_{пр}$ = 12 ÷ 15,5 м/мин фрезерование сталей аустенитного класса типа 12Х18Н10Т в различных средах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Впервые на основе моделирования, с использованием упрощенного алгоритма метода группового учета аргументов, основных характеристик процессов упрочняющей приработки и дальнейшей эксплуатации инструмента определены условия образования вторичных упрочненных структур на его контактных поверхностях и условия повышения работоспособности инструмента при фрезеровании сталей аустенитного класса в среде различных СОТС. Показаны преимущества упрочняющего действия СОТС на растительной основе с использованием технологии минимальной смазки.

1. Установлено, что завершение процесса формирования вторичных упрочненных структур на поверхностях инструмента в среде различных СОТС характеризуется наибольшим значением горизонтальной составляющей силы резания P_h, по достижении которого P_h снижается и независимо от режимов приработки для каждой из СОТС соответствует одному и тому же значению фаски износа приработки по задней поверхности. Значение P_h, при завершении упрочняющей приработки для определенной среды определяется режимами приработки.

2. Выявлено, что механизм упрочняющего действия касторового масла при фрезеровании сталей аустенитного класса отличается от действия других СОТС.

3. Впервые на основе экспериментальных данных получены адекватные изучаемым процессам модели, в виде зависимостей:

– составляющих сил резания от режимов укрепляющей приработки;

– стойкости инструмента от скорости приработки и эксплуатационных режимов резания как с учетом адгезионной составляющей коэффициента трения, так и в среде каждой из СОТС отдельно;

– шероховатости обрабатываемой предварительно приработанного инструмента от режимов резания.

4. Показано, что адгезионная составляющая коэффициента трения не может служить обобщенной характеристикой свойств СОТС.

5. Модельными исследованиями установлена и экспериментально подтверждена степень влияния на устойчивость предварительно приработанного инструмента среде различных СОТС. Показано, что касторовое масло имеет преимущества перед другими из исследуемых сред только при ее использовании в условиях чистовой обработки, т.е. при малых подачах на зуб и глубинах резания.

6. Установлены режимы приработки в различных технологических средах, обеспечивающие максимальное повышение стойкости инструмента во всем диапазоне режимов резания.

7. Упрочняющее действие СОТС для пары обрабатываемого и инструментального материалов определяются взаимодействием всех эффектов СОТС, от которых при определенных режимах приработки зависит образование упрочненных слоев на контактных поверхностях инструмента и максимально возможное повышение его стойкости. Впервые установлено, что в присутствии касторового масла образуется на контактных поверхности инструмента верхний рыхлый слой, как следствие химической адсорбции (эффект Ребиндера) и плотный упрочненный нижний слой.

8. Установлено, что использование СОТС растительной природы (рапсовое и касторовое масла) и на ее основе (МР-99) во всем диапазоне режимов резания обеспечивают более низкую шероховатость обрабатываемой поверхности по сравнению с сухой обработкой и в среде И-20А.

9. Разработаны рекомендации по назначению режимов приработки, обеспечивающих максимальное упрочнение контактных поверхностей инструмента, а именно при использовании:

– сухой обработки, МР-99 и рапсового масла - $V_{пр} = 28$ м/мин; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 0,4 \div 0,6$ мм;

– И-20А – $V_{пр} = 12 \div 15$ м/мин; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 0,4 \div 1,0$ мм;

– касторового масла – $V_{пр} = 28$ м/мин; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 0,4$ мм.

10. Для снижения времени приработки со снижением допустимого упрочняющего действия СОТС при фрезеровании сталей аустенитного класса в диапазоне эксплуатационных скоростей $V_c = 28 \div 40$ м/мин, при сухой обработке и касторового масла и при И-20А в диапазоне $V_c = 28 \div 35$ м/мин можно рекомендовать следующие режимы приработки: $V_{пр} = 28$ м/мин, $S_z = 0{,}15$ мм/зуб и $t = 0{,}5$ мм.

11. На ЧАО «Пневматика» проведены производственные испытания, которые подтвердили результаты исследований по упрочняющему действию СОТС. Рекомендации по назначению режимов упрочнения поверхностей инструмента резанием в присутствии различных СОТС переданы для внедрения на данном производстве.

12. Результаты исследований используются в учебном процессе РВУЗ «КИПУ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ящерицын П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е издание, исправлено и дополнено – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

2. Мазур Н.П. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Н.П. Мазур [и др.]; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

3. Верещака А.С. Резание материалов: учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высшая школа, 2009. – 539 с.

4. Подураев В.И. Резание труднообрабатываемых материалов / В.И. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

5. Энтелис С.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.

6. Годлевский В.А. Повышение эффективности и качества обработки материалов резанием путем управления смазочным действием СОТС: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент” / В.А. Годлевский. – Рыбинск, 1995. – 36 с.

7. Гордон М.Б. К вопросу о механизме смазочного действия СОЖ при резании металлов / М.Б. Гордон, В.М. Федоров, В.А. Мишин // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. – Саратов, 1983. – С. 12–16.

8. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер / избранные труды: Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 382 с.

9. Клушин М.И. Технологические свойства СОЖ для обработки металлов резанием / Под ред. М.И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1992. – 270

с.

10. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

11. Андреев Г.С. Тепловые явления в режущей части инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. – 1973. – № 9. – С. 69 – 72.

12. Кабалдин Ю.Г. О некоторых особенностях влияния внешней среды при прерывистом резании // Тр. ГНИ, 1972. – Т. 28. – Вып. 2. – С. 6 – 7.

13. Латышев В.Н., Верещака А.С., Наумов А.Г., Бушев А.Е. Экологически чистые смазочно-охлаждающие технологические средства // Вестник машиностроения. – 1999. – № 7. – С. 32 – 35.

14. Подгорков В.В. Исследование эффективности и некоторых физических сторон действия распыленных СОЖ при резании металлов: дис. … канд. тех. наук: 05.03.01 / Подгорков Владимир Викторович. – Горький, 1967. – 150 с.

15. Якубов Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография» (СГТ), 2008. – 156 с.

16. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. / М.И. Гольдштейн, В.М. Фарбер – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.

17. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты: учебник [для вузов] / П.Р. Родин. – 2-е издание переработано и дополнено – К.: Высшая школа, 1979. – 432 с.

18. Филиппов Г.В. Режущий инструмент / Г.В. Филиппов – Л.: Машиностроение, 1981. – 392 с.

19. Равська Н.С., Мельничук П.П., Кас’янов А.Г., Родін Р.П. Технологія інструментального виробництва. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 555 с.

20. Палей М.М. Технология производства металлорежущих инструментов: учебное пособие / М.М. Полей. – 2-е издание, переработано и дополнено. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.

21. Марочник сталей и сплавов: справочник / под общ. ред. В.Т. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

22. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

23. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. – [2-изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.

24. Абдулгазис Д.У. К вопросу об использовании масел растительного происхождения в качестве смазочно-охлаждающих технологических средств при обработке металлов резанием / Д.У. Абдулгазис, И.Э. Аметов, Э.Р. Ваниев // Ученые записки Крымского госуд. инж.-пед. ун-та. Вып. 3. Симферополь: Доля, 2002. С. 26 – 29.

25. Loladze T.N., Totchiev E.G., Tkemaladze G.N. Some Features of Brittle Failure of Cutting Tools During Interrupted Cutting – In: Proc. of the International M.T.D.R. Conference. Swansea. – 1980. – pp. 297 – 303.

26. Латышев В.Н. Механохимические процессы и эффективность применения смазочных сред при трении и обработке металлов // Физика, химия и механика трибосистем. – Иваново, 2002. – С. 5 – 10.

27. Тихонов В.М., Сухоруков З.М. Трение и износ при резании в вакууме / В кн.: Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием. Т.3. – Горький, 1975. – С. 203 – 219.

28. Doyle E.D., Home J.G. Adhesion in metal cutting: anomalies associated with oxygen. – Wear, 1980. – vol. 60. – pp. 383 – 391.

29. Тимофеев П.В. Смазочно-охлаждающие жидкости, применяемые при резании металлов / П.В. Тимофеев. – М.: Машгиз, 1960. – 172 с.

30. Зайцев В.М. Влияние охлаждающих веществ на стойкость инструмента и чистоту поверхности / В.М. Зайцев // Станки и инструменты. – 1956. – № 6. – С. 12–14.

31. Верещака А.С. Анализ основных аспектов проблемы экологически безопасного резания / А.С. Верещака, Ф. Лиерат, Л. Дюбнер // Резание и инс-

трумент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – Вып. 57. – С. 29 – 34.

32. Кундиев Ю.Н. Гигиена и технология смазочно-охлаждающих жидкостей для механической обработки металлов [Методические рекомендации] / Ю.Н. Кундиев, И.М. Трахтенберг, Г.В. Поруцкий. – Киев: Здоровье, 1982. – 120 с.

33. Гигиенические мероприятия при применении смазочно-охлаждающих жидкостей для механической обработки [Методические рекомендации] – К.: ВНИИПК нефтехим, 1977. – 26 с.

34. Клушин М.И. Смазочно-охлаждающие жидкости для обработки металлов резанием [Рекомендации по применению] / Под. ред. М.И. Клушина. – М.: НИИМАШ, 1979. – 96 с.

35. Цупков М.Е. Средства защиты рук рабочих на машиностроительных предприятиях / М.Е. Цупков, В.Н. Ардасенова. – М.: Машиностроение, 1983. – 111 с.

36. Инструкция по профилактике кожных заболеваний при работе со смазочно-охлаждающими жидкостями. – К.: ВНИИПК нефтехим, 1981. – 20 с.

37. N. N.: Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland, 2001. In: Information des Bundesamts für Wirtschaft (BAW), Eschborn, 2001.

38. Lange, M.: Hautschutzmassnahmen beim Umgang mit Kühlschmierstoffen, Tribologie + Schmierungstechnik, 41. Jg., 1/1994. – P. 30 – 33.

39. Менумеров Э.Р. О возможности повышения эксплуатационных характеристик СОТС на основе растительных масел / Менумеров Э.Р, Якубов Ч.Ф., Э.Р. Ваниев // Тези доповідей Шостої всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «МАШИНОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ ОЧИМА

МОЛОДИХ: прогресивні ідеї - наука – виробництво», 25-28 жовтня 2006 р. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – С. 68–70.

40. Розенберг Ю.А. Резание материалов: учебник для технических вузов / Ю.А. Розенберг. – Курган: ОАО "Полиграфический комбинат", Зауралье, 2007. – 294 с.

41. Якубов Ф.Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким. – Симферополь, 2005. – 300 с.

42. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 128 с.

43. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1978. – 136 с.

44. Дмитриева Т.В. Композиции на основе рапсового масла и функциональных добавок / Т.В. Дмитриева, Л.А. Сироватка, В.И. Бортницкий // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 6. – С. 693–698.

45. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техника, 1976. – 292 с.

46. Якубов Ф.Я. Пути повышения стойкости металлорежущих инструментов на основе анализ термодинамики контактных процессов. Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Ташкент-Тбилиси. ТПИ, 1984. – 414 с.

47. А.с. №1055991 СССР Способ повышения стойкости металлорежущего инструмента / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким, Э.Г. Симашев (СССР). – опубл. 22.06.83.

48. Руднев А.В. Техника минимальной смазки – перспективное применение СОТС / А.В. Руднев, М.Д. Узунян // Высокие технологии в машиностроении : сборник научных трудов НТУ "ХПИ". – Х., 2001. – С. 231–234.

49. Пат. 61421А Україна, МПК 7С10М 173/00 Мастильно-охолодний технологічний засіб / Абдулгазіс Д.У., Ванієв Е.Р., Амєтов І.Е. Заявник і патентовласник автори; заявл. 03.02.2003 ; опубл. 17.11.2003. Бюл. № 11.

50. Худобин Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.

51. Ташлицкий Н.И. Рациональное применение СОЖ при обработке сталей лезвийным инструментом / Н.И. Ташлицкий, М.Е. Кущева // Вестник машиностроения. – 1976. – №8 – С. 73 – 75.

52. Попке Х. Применение техники подачи СОТС при сверлении, зенкеровании, развертывании инструментами из быстрорежущей стали / Х. Попке, Т. Эммер // Резание и инструмент в технологических системах. – Вып. 51 – Харьков, ХТПУ, 1997 – С. 62 – 65.

53. N. N.: Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland, 2001. In: Information des Bundesamts für Wirtschaft (BAW), Eschborn, 2001.

54. Ваниев Э.Р. Особенности цилиндрического фрезерования с применением технологии минимального смазывания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 74. – С. 27–30.

55. Дмитриева Т.В. Композиции на основе рапсового масла и функциональных добавок / Т.В. Дмитриева, Л.А. Сыроватка, В.И. Бортницкий // Трение и износ. Т22 – №6 – 2001. – С. 693 – 698.

56. Einsatz der Minimalmengenschmierung in der Zerspanung (Projektbericht), Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Universität Magdeburg.

57. Технологические смазки. Выпуск II. Тезисы докладов / Под ред. д.т.н. проф. М.С. Пасечника. – К., 1983. – 84 с.

58. Котляров А.Я., Созиков А.И., Кимаск Ю.Ю. Прочность адгезионной связи со стружкой при прерывистом резании сплавов титана // Станки и инструменты. – 1979. – №9. – С. 19 – 21.

59. Соболев Н.П., Валитов А.М. Применение CO_2 при точении трудно-обрабатываемой стали // Станки и инструменты. – 1956. – №3 – С. 18 – 21.

60. Мухитдинов Н.Ш. Исследование обрабатываемости нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ22 на основе энергетических соотношений: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. – Ташкент - Томск, ТПИ. – 1981. – 116 с.

61. Точение нержавеющей стали с охлаждением струей воздуха / Zhang Junzhi // Jixie gongcheng xuebao. – 1999. – №4. – С. 93–95.

62. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

63. Ивкович Б. Трибология резания (смазывающе-охлаждающие жидкости) / Б. Ивкович; Под ред. П.И. Ящерицына. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 144 с.

64. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. / Костецкий Б.И. – К.: Техника, 1970. – 396 с.

65. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

66. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

67. Андреев Г.С. Определение режущих свойств инструментальных материалов при периодическом резании // Станки и инструмент. 1975. – № 5 – С. 23 – 25.

68. Андреев Г.С. Тепловые явления в режущей части инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. 1973. – № 9 – С. 69 – 72.

69. Беккер М.С, Куликов М.Ю., Егорычева Е.В. Физическая модель изнашивания инструмента из быстрорежущей стали // Вестник машиностроения. 1997. – №8 – С. 41 – 44.

70. Верещака А.С. Проблемы создания и совершенствования инструмента из быстрорежущей стали с износостойким покрытием // Проблемы резания материалов в современных технологических процессах. – Харьков: ХПИ, 1991. – С. 56 – 70.

71. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализацией новых технологических возможностей: дис. … доктора техн. наук: 05.03.01 / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с.

72. Подураев В.Н. Автоматические регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 300 с.

73. Подураев В.Н. Физико – химические методы обработки / В.Н. Подураев – М.: Машиностроение, 1973. – 346 с.

74. Васин С.А., Верещака А.С, Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

75. Ваниев Э.Р. Вопросы методологии исследования влияния СОТС на процесс резания / Э.Р. Ваниев, Ю.И. Бесарабец, П.В. Скрынник // Вісник Сумського державного університету: Серія «Технічні науки». 2010. – №4. – С. 70–76.

76. Клушин М.И. Технологические свойства СОЖ для обработки металлов резанием / Под ред. М.И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1992. – 270 с.

77. Крагельский И.В., Добычин М.И., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 552 с.

78. Якубов Ч.Ф. Моделирование стойкости фрезы из Р6М5 при измерении условий ее предварительной приработки и дальнейшей эксплуатации при фрезеровании стали 12Х18Н10Т / Ч.Ф. Якубов, Э.Р. Ваниев // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львов, Вид-во Львівської політехніки, 2012. – №746. – С. 207–210.

79. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных

условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Изд-во. Наука, 1976. – 279 с.

80. Ивахненко А.Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. – К.: Техніка, 1971. – 268 с.

81. Родин П.Р. Монолитные твердосплавные концевые фрезы / П.Р. Родин, Н.С Равская, А.И. Касьянов. – К.: Вища школа, 1985. – 64 с.

82. Равская Н.С. Разработка прогрессивных режущих инструментов на основе моделирования их работы методом самоорганизации: дис. … доктора техн. наук: 05.03.01 / Равская Наталья Сергеевна. – К., 1991. – 372 с.

83. Кабалдин Ю.Г. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Олейников, А.М. Шпилев, А.А. Бурнов. – Владивосток, Дальнаука, 2000. – 195 с.

84. Ковалева Л.И. Основные положения алгоритма для моделирования процесса резания с учетом физических явлений, его сопровождающих / Л.И Ковалева, Л.Г. Дюбнер, П.В. Скрынник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Вип. 15. – Київ – Краматорськ, 2004. – С. 52–58.

85. Остафьев В.А. Физические основы процессов резания металлов / В.А. Остафьев. – К.: Высшая школа, 1976. – 136 с.

86. Залога В.А. Влияние различных СОТС на адгезионную составляющую коэффициента трения при высоких контактных давлениях / В.А. Залога, О.А. Залога, Э.Р. Ваниев // Вісник СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вып. 118. – С. 37 – 40.

87. Процишин В.Т. Трибологические свойства современных СОТС / В.Т. Процишин, О.А. Мищук, М.В. Бондарь // Трение, износ, смазка. 2008. – Том 10, – №3. – С 34 – 37.

88. Bowden F. P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. - Oxford: Clarendon Press, 1964.

89. Залога В.А. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при

резании / В.А. Залога, Д. В. Криворучко, С.С. Некрасов // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук, 2010. – Випуск 6/2010 (65) частина 1. – С. 63 – 70.

90. Залога В.А. К вопросу об экспериментальном определении коэффициента трения / В.А. Залога, Д.В. Криворучко, О.А. Залога: Сб. научных статей. Вып. 25 – Краматорск: ДГМА, 2009. – С. 150 – 159.

91. Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник; В 2- х т. / Под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1. – 400 с.

92. Криворучко Д.В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Криворучко Дмитрий Владимирович. – Харків, 2010. – 40 с.

93. Бесарабец Ю.И. О возможности использования в качестве оценки трибологических свойств СОТС коэффициента трения пары инструментальный-обрабатываемый материалы / Ю.И. Бесарабец, Э.Р. Ваниев, П.В. Скринник // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 82. – С. 10-17.

94. Гуревич Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров – 2-е издание, исправлено и дополнено. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

95. Локтев А.Д. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: / Справочник: Том 1 / А.Д. Локтев, И.Ф. Гущин, В.А. Батуев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.

96. Гузеев В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: Справочник / Под общ. ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2005. – 368 с.

97. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под общ. ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

98. Панчук В.Г. Компьютерный комплекс исследования силовых хара-

ктеристик при резании. // Сб. Вестник «КПИ», серия «Машиностроение». – К.: КПИ, 1997. – №32 – С. 121 – 125.

99. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. / Под ред. А.Д. Мартынова. – 2-е издание, исправлено и дополнено – М.: Ротапринт ВНИИ, 1969. – 22 с.

100. Якубов Ф.Я. Пути повышения стойкости металлорежущих инструментов на основе анализ термодинамики контактных процессов. Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Ташкент-Тбилиси. ТПИ, 1984. – 414 с.

101. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / Всеволод Фомич Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

102. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. / В.К. Старков – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

103. Вульф А.М. Резание металлов. / А.М. Вульф – Изд. 2-е – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

104. Петруха П.Г. Обработка резанием высокопрочных, коррозионностойких и жаропрочных сталей. / Под ред. П.Г. Петрухи – М.: Машиностроение, 1980. – 167 с.

105. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

106. Алиев А.И. Повышение работоспособности сложнопрофильного режущего инструмента за счет применения технологических сред растительного происхождения: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01 / Алиев Азиз Ибрахимович. – Х., 2011. – 145 с.

107. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка быстрорежущего инструмента различными порошковыми магнитно-абразивными материалами / В.С. Майборода, А.В. Анисимова // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб.наук.праць. – Краматорськ, вип. №28, 2011. – С. 21-26.

108. Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення свердел виготовлених з швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Н.В. Мініцька, Д.Ю. Джулій, О.О. Бєляєв // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №31, 2012. – С. 271-278.

109. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість поверхневого шару свердел із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І.В. Ткачук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем Збірник наукових праць Краматорськ, вип. №32, 2013. – С. 263-267.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Матрица экспериментальных данных возможности использования μ_a для определения критерия оценки свойств СОТС

№ эксп,	№ опыта	План эксперимента					$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	μ_a,	V_c, м/мин	P_h, Н	P_v, Н	P_y, Н	T, мин
		X1	X2	X3	X4	X5									
		$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	μ_a,	V_c, м/мин									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	27	-1	+1	+1	+1	+2	15,5	0,25	1,6	0,26	49.61	209,0	117,0	17,0	44,76
2	36	-1	-2	-1		+1	15,47	0,1	0,8	0,26	43,32	87,3	48,8	3,9	88,7
3	33	0	0	+1		0	19,51	0,2	1,6	0,26	38,72	146,2	81,0	5,8	49,7
4	26	+1	+2	0		-2	24,75	0,3	1,2	0,26	27,85	125,9	75,7	5,5	16,2
5	45	0	+2	0		0	19,45	0,3	1,2	0,26	38,6	159,8	96,7	8,0	17,2
6	4	0	-1	-1		+1	19,35	0,15	0,8	0,26	43,19	74,6	41,7	4,2	85,11
7	15	-1	+2	+1		+1	15,44	0,3	1,6	0,26	27,79	251,6	136,7	11,9	36,0
8	17	0	-2	-1		-1	15,44	0,1	0,8	0,26	35,6	79,0	57,3	4,1	110
9	14	+1	0	+1		+2	24,63	0,2	1,6	0,26	49,6	135	104	4,9	22,8
10	24	0	-1	-1		-1	15,9	0,15	1,6	0,26	34,52	84,3	62,1	4,0	110
11	8	+1	+1	+1		0	24,65	0,25	1,6	0,26	38,52	160,2	103,8	7,9	20,2
12	12	+1	+1	+2	-2	+1	24,65	0,25	2,0	0,13	43,14	226,8	130,7	4,6	27,83
13	11	0	+2	-1		-1	19,29	0,3	0,8	0,13	37,8	121,9	62,9	5,8	18,3
14	39	+1	-1	-1		-1	24,65	0,15	0,4	0,13	27,93	30,5	23,9	1,9	10,5
15	40	+1	-2	-2		+2	24,57	0,1	0,4	0,13	49,15	38,4	32,3	1,3	83,6
16	30	+2	0	+2		+1	27,7	0,2	2,0	0,13	43,1	152,0	98,0	3,8	21,7
17	2	+2	0	-1		+2	27,73	0,2	0,8	0,13	49,31	42,7	37,7	3,4	35,0
18	20	+2	-1	-2		0	27,68	0,15	0,8	0,13	38,44	46,4	28,7	2,9	76,95

159

Продолжение приложения А

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
19	1	-1	-2	-2	-2	-2	15,3	0,1	0,4	0,13	27,65	63,1	47,2	4,5	106
20	38	+1	+1	-2		+2	24,6	0,25	0,4	0,13	49,2	67,5	48,6	2,4	62,3
21	37	-1	-2	-1	0	0	15,5	0,1	0,8	0,25	38,75	83,8	41,6	5,3	77,6
22	23	-2	+1	-1		+2	12,41	0,25	0,8	0,25	49,6	80,0	63,0	3,6	32,1
23	19	+2	+2	-1		-2	27,9	0,3	0,8	0,25	27,9	115,1	74,2	5,6	16,4
24	41	+2	+2	-2		0	27,9	0,3	0,4	0,25	38,75	76,0	61,6	4,6	11,5
25	46	0	0	0		0	19,51	0,2	1,2	0,25	38,7	72,6	63,2	3,2	29,8
26	18	+2	0	-1		+2	27,87	0,2	0,8	0,25	49,27	62,6	57,21	3,7	35,8
27	9	0	-1	+1		+1	19,44	0,15	1,6	0,25	43,23	175,2	103,6	7,5	41,3
28	32	+1	-2	-1		+1	24,5	0,1	0,8	0,25	43,6	74,41	52,2	3,1	82,4
29	47	+2	+2	-2		+2	27,9	0,3	2,0	0,25	27,9	105,4	87,8	7,2	10,44
30	42	+1	0	0		0	24,6	0,2	0,4	0,25	37,6	78,43	50,9	3,1	43,0
31	5	-2	+2	-2	+2	-2	12,2	0,3	0,4	0,31	27,45	119,8	90,6	5,7	53,44
32	7	-1	+2	0		-1	15,22	0,3	1,2	0,31	34,09	272,9	162,4	6,7	39,96
33	35	+2	+2	-1		+2	27,53	0,3	0,8	0,31	48,95	132,6	78,4	4,9	14,7
34	25	0	-2	+1		0	19,25	0,1	1,6	0,31	38,2	153,0	91,3	4,9	107
35	43	-2	-1	+2		-2	12,22	0,15	2,0	0,31	27,51	277,7	144,1	9,2	99,0
36	16	-1	+1	-2		+1	15,31	0,25	0,4	0,31	42,88	100,1	70,56	4,9	46,8
37	34	+2	+2	-2		-1	24,45	0,3	0,4	0,31	34,23	96,7	85,6	5,6	34,77
38	44	-2	0	-1		-1	12,2	0,2	0,8	0,31	34,16	146	87,0	5,3	84,5
39	48	-1	-1	-2		+2	15,5	0,15	2,0	0,31	27,51	281,1	151,2	9,3	91,6
40	10	-1	-2	-1	+1	-2	15,5	0,1	0,8	0,2	27,51	68,0	50,3	4,0	159,4
41	13	+1	-1	0		0	24,45	0,15	1,2	0,2	38,5	98,2	53,0	4,9	77,6

160

Продолжение приложения А

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
42	3	-1	+2	-2		-1	15,33	0,3	0,4	0,2	34,34	79,5	53,7	3,9	44,3
43	31	-2	0	-2		+2	12,27	0,2	0,4	0,2	49,1	48,2	38,1	3,2	31,5
44	6	-1	-2	+2		0	15,5	0,1	2,0	0,2	38,4	152,3	148,8	7,4	129,84
45	21	-1	-1	-2	+1	+1	15,6	0,15	0,4	0,2	43,25	53,1	41,8	3,9	76,0
46	22	+2	-1	-1		+2	27,9	0,1	0,8	0,2	49,1	71,3	51,2	4,3	86,5
47	28	+2	+1	+2		+2	27,8	0,25	2,0	0,2	48,8	89,2	53,0	4,6	6,7
48	29	0	0	0		0	19,9	0,2	1,2	0,2	38,2	79,3	50,3	5,0	53,6

161

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Статистический план экспериментов и матрица экспериментальных данных

№ эксп,	План эксперимента				$V_{пр}$ м/мин (X1)	S_z, мм/зуб (X2)	V_c, м/мин (X3)	t, мин (X4)	Среда	Выходные параметры				
	X1	X2	X3	X4						P_h, Н	P_v, Н	P_y, Н	T, мин	R_a, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-1	+1	+2	+1	15,5	0,25	49,6	1,6	Касторовое масло	209,0	117,0	17,0	44,76	1,3
2	-1	-2	+1	-1	15,47	0,1	43,3	0,8		87,3	48,8	3,9	88,7	0,57
3	0	0	0	+1	19,51	0,2	38,7	1,6		146,2	81,0	5,8	49,7	1,26
4	+1	+2	-2	0	24,75	0,3	27,8	1,2		125,9	75,7	5,5	16,2	1,38
5	0	+2	0	0	19,45	0,3	38,6	1,2		159,8	96,7	8,0	17,2	1,24
6	0	0	+1	-2	19,43	0,15	43,2	0,8		74,6	41,7	4,2	85,11	0,93
7	-1	+2	-2	+1	15,44	0,3	27,7	1,6		251,6	136,7	11,9	36,0	1,62
8	0	-1	-1	+1	15,47	0,1	35,6	0,8		79,0	57,3	4,1	110,0	0,7
9	-2	0	+1	-2	19,4	0,2	44,58	0,4		65,0	31,1	4,4	68,2	0,9
10	+1	0	+2	+1	24,63	0,2	49,6	1,6		135,0	104,0	4,9	22,8	1,27
11	+1	+1	-1	+1	24,65	0,25	34,52	1,6		84,3	62,1	4,0	110,0	0,56
12	+1	+1	0	+1	24,65	0,25	39,8	1,6		160,2	103,8	7,9	20,2	0,73
13	+2	+1	+1	-1	27,8	0,25	43,3	0,8		73,6	48,78	4,76	44,6	0,73
14	0	0	0	0	19,7	0,2	38	1,2		105,3	64,08	5,9	38,9	1,09
15	+2	0	0	+2	27,9	0,2	37,8	2		168,47	128,48	5,26	35,6	1,2
16	-2	0	-2	0	12	0,2	28	1,2		112,16	62,63	7,7	74,8	1,04
17	+2	0	+2	0	27,69	0,2	48	1,2		96,2	64,1	4,46	36,0	1,05
18	0	0	0	+2	19,78	0,2	38	2		184,12	127,1	6,64	34,1	1,42

162

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
19	+2	+2	-2	-1	27,7	0,3	27,7	1,6	Касторовое масло	194,0	150,0	6,1	58,0	1,6
20	0	0	0	-2	19,7	0,2	38	0,4		59,7	32,3	4,8	89,25	0,69
21	0	0	0	0	19,83	0,2	37,9	1,2		102,95	63,1	5,8	36,5	1,03
22	0	-2	0	0	19,73	0,1	37,9	1,2		74,0	44,0	1,33	52,2	0,74
23	+2	-1	-1	-1	27,89	0,15	35,6	0,8		65,8	41,05	2,65	53,0	0,8
24	+2	-2	+1	-1	27,69	0,1	43,3	0,8		61,5	37,4	1,17	61,3	0,7
25	+1	+1	+1	-2	24,65	0,25	43,14	2	МР-99	226,8	130,7	4,6	27,83	1,07
26	0	+2	-1	-1	19,29	0,3	37,8	0,8		121,9	62,9	5,8	18,3	1,97
27	+1	-1	-2	-2	24,65	0,15	27,93	0,4		30,5	23,9	1,9	10,5	0,92
28	+1	-2	+2	-2	24,57	0,1	49,15	0,4		38,4	32,3	1,3	83,6	0,752
29	2	0	+1	+2	24,7	0,2	43,1	2		152,0	98,0	3,8	21,7	0,99
30	-1	-1	+2	0	15,5	0,1	48,9	1,2		99,97	29,2	9,52	92,0	0,79
31	-1	0	0	0	15,5	0,2	38,5	1,2		76,8	58,7	6,0	56,7	0,72
32	-1	-2	0	-2	15,3	0,1	38,4	0,4		68,9	39,6	5,74	103,0	0,8
33	-1	+2	0	0	15,5	0,3	38,5	1,2		61,59	42,01	4,85	10,9	1,5
34	+2	0	+2	-1	27,73	0,2	49,31	0,8		42,7	37,7	3,4	35,0	1,28
35	+2	-1	0	-1	27,68	0,15	38,44	2		46,4	28,7	2,9	76,95	1,41
36	-1	-2	-2	-2	15,36	0,1	27,65	0,4		63,1	47,2	4,5	106,0	1,27
37	+1	+1	+2	-2	24,6	0,25	49,2	0,4		67,5	48,6	2,4	62,3	1,73
38	-1	+1	+2	-2	15,47	0,25	49,9	0,8		91,01	42,8	9,3	39,0	1,98
39	0	-1	-2	-2	19,8	0,15	27,9	0,4		62,0	32,9	6,0	95,0	1,1
40	0	-1	+2	+1	19,78	0,15	48,9	1,6		143,8	72,6	7,5	65,3	0,65
41	0	0	0	+2	19,69	0,15	38,3	1,2		104,8	74,2	7,3	75,0	0,72

163

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
42	+1	-2	+1	0	24,3	0,1	43	1,2	МР-	65,69	25,1	4,1	104,0	0,91
43	+1	-1	-2	-2	24,3	0,15	27,9	0,4		47,8	27,3	3,2	96,0	0,89
44	+1	+1	-2	-2	24,9	0,25	27,9	0,4		58,6	31,2	3,9	68,0	0,67
45	-1	-2	0	-1	15,5	0,1	38,75	0,8	Сухая обработка	83,8	41,6	5,3	77,6	10,25
46	-2	+1	+2	-1	12,41	0,25	49,6	0,8		104,6	91,0	3,67	32,1	8,78
47	+2	+2	-2	-1	27,9	0,3	27,9	0,8		115,1	74,2	5,6	16,4	11,21
48	+2	+2	0	-2	27,9	0,3	38,75	0,4		126,1	74,1	3,2	11,5	8,4
49	0	0	0	0	19,51	0,2	38,7	1,2		86,07	73,2	2,3	29,8	9,4
50	+2	0	+2	-1	27,87	0,2	49,27	0,8		62,6	57,21	6,7	35,8	9,4
51	0	-1	+1	+1	19,45	0,15	43,23	1,6		175,2	103,6	7,5	41,3	4,39
52	+2	+2	-2	+2	27,9	0,3	27,9	2		105,4	67,8	9,2	10,44	11,33
53	-2	-2	-2	-2	12	0,1	27,87	0,4		76,9	20,1	3,6	99,0	8,7
54	+1	-2	+1	-1	24,5	0,1	43,6	0,8		64,41	42,2	3,1	82,4	13,8
55	0	+1	-2	0	19,87	0,25	28,0	1,2		69,1	58,9	4,4	23,5	8,9
56	0	0	0	+2	19,8	0,2	27,79	1,2		152,7	93,1	7,8	22,7	9,0
57	+2	0	+2	0	27,87	0,2	48,4	1,2		81,4	53,6	3,9	32,1	5,1
58	+1	-2	0	0	24,5	0,1	38	1,2		74,0	61,9	2,29	73,4	12,3
59	+1	+2	0	0	24,2	0,3	37,9	1,2		38,1	31,9	1,9	12,0	5,3
60	+1	0	0	0	24,6	0,2	37,6	0,4		58,43	30,9	1,3	43,0	10,1
61	+1	0	0	+2	24,48	0,2	37,9	2		68,2	41,62	3,4	16,0	10,3
62	-1	+2	-2	-1	15,5	0,3	27,8	0,8		87,04	57,3	3,76	14,0	12,1
63	-1	-1	+1	+1	15,5	0,15	43,2	1,6		77,03	43,63	4,04	43,0	4,4
64	-1	+2	0	0	15,5	0,3	37,8	1,2		82,0	42,9	4,6	12,0	11,8

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
65	-2	+2	-2	-2	12,2	0,3	27,45	0,4	И-20А	119,8	90,6	5,7	53,44	3,6
66	-1	+2	-1	0	15,22	0,3	34,09	1,2		272,9	162,4	6,7	39,96	5,6
67	+2	+2	+2	-1	27,53	0,3	48,95	0,8		132,6	78,4	4,9	14,7	8,13
68	0	-2	0	+1	19,25	0,1	38,2	1,6		153,0	91,3	4,9	107,0	9,51
69	-2	-1	-2	+2	12,22	0,15	27,51	2		277,7	144,1	9,2	99,0	10,4
70	+1	-1	-2	0	25,2	0,15	27,48	1,2		139,1	80,46	5,58	72,36	7,7
71	-1	+1	-1	+1	15,31	0,25	42,88	0,4		100,11	70,56	4,97	46,8	4,99
72	+2	0	+2	0	28,6	0,2	48,75	1,2		144,39	78,80	5,34	26,7	10,99
73	+1	+2	-1	-2	24,45	0,3	34,25	0,4		96,7	85,6	5,6	34,7	4,23
74	-2	0	-1	-1	12,2	0,2	34,16	0,8		146,0	87,0	5,3	84,5	8,96
75	+2	0	+2	+2	27,8	0,2	47,9	2		246,89	152,8	6,2	25,6	10,1
76	0	-2	0	-2	19,8	0,1	38,4	0,4		82,08	53,89	4,4	116,0	4,79
77	0	0	0	0	19,7	0,2	38,6	1,2		173,6	106,8	6,9	51,4	8,1
78	0	-2	0	0	19,8	0,1	38,6	1,2		118,9	75,2	5,8	115,4	8,3
79	0	-2	0	1,2	19,75	0,3	38,4	1,2		205,1	128,7	7,26	34,0	7,5
80	-2	0	-2	0	12,2	0,2	27,9	1,2		208,2	131,6	8,35	81,4	7,9
81	+2	0	+2	-2	27,8	0,2	47,6	1,2		143,2	78,7	5,44	24,6	7,8
82	0	0	0	-2	19,7	0,2	38,3	0,4		94,2	65,8	5,1	48,2	4,3
83	0	0	0	+2	19,78	0,2	38,3	2		308,5	139,1	8,2	47,5	10,1
84	-1	-1	-2	+2	15,5	0,15	27,51	2		281,1	151,2	9,3	91,6	12,1
85	-1	-1	0	-1	15,5	0,15	38,1	0,8		85,1	54,9	4,7	65,1	5,8
86	+2	+2	0	-2	27,8	0,3	38,4	-0,4		129,4	69,9	4,6	45,2	6,9

165

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
87	-1	-2	-1	-1	15,25	0,1	27,51	0,8	Рапсовое масло	68,0	50,3	4,0	159,4	0,67
88	+1	-1	0	0	24,45	0,15	38,5	1,2		98,2	53,0	4,9	77,6	0,73
89	-1	-2	0	+2	15,5	0,1	38,4	2		152,3	148,8	7,4	129,84	0,65
90	-1	+2	-1	-2	15,33	0,3	34,4	0,4		79,5	53,7	3,9	44,3	1,08
91	-2	0	+2	-2	12,27	0,2	49,1	0,4		48,2	38,1	3,2	31,5	0,926
92	0	0	-1	0	20	0,2	34,34	1,2		78,1	51,2	4,3	70,8	1,2
93	0	-2	0	-1	20	0,1	38,4	0,8		56,3	34,4	4,0	131,4	0,75
94	-1	-1	+1	-2	15,6	0,15	43,25	0,4		53,1	41,8	3,9	76,0	0,67
95	+1	0	+1	+1	24	0,2	43,8	1,6		108,3	89,1	4,3	23,9	1,92
96	+2	-2	+2	-1	27,9	0,1	49,1	0,8		71,3	51,2	4,3	86,5	0,77
97	+2	+1	+2	+2	28	0,25	48,8	2		89,2	53,0	4,6	6,7	3,49
98	-2	+1	-2	0	12	0,25	28	1,2		74,8	49,1	5,0	98,7	1,2
99	0	0	0	0	20	0,2	38	1,2		79,3	50,3	5,0	53,6	1,25
100	+1	-2		0	24	0,1	43	1,2		89,7	51,8	4,2	108,9	0,8
101	0	+2	0	0	20	0,3	38	1,2		119,8	103,1	4,8	18,1	2,01
102	-2	0	-2	0	12,2	0,2	28	1,2		68,1	48,5	4,5	121,4	1,01
103	+2	0	+2	0	28	0,2	48	1,2		83,9	58,0	4,9	14,2	1,68
104	0	0	0	-2	20	0,2	38	0,4		65,8	57,1	3,67	58,9	0,88
105	0	0	0	+2	20	0,2	38	2		145,7	116,0	5,61	4,78	1,29

166

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Изменение приработочного износа и составляющих силы резания в процессе приработки

№ экс.	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	Среда	Измеряемые параметры	Измерение						
						1-е	2-е	3-е	4-е	5-е	6-е	7-е
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	24,75	0,3	1,2	Касторовое масло	$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,077	0,084	0,098	□	□
					P_h, Н	118,8	121,2	125,9	114,6	117,7	□	□
					P_v, Н	71,3	73,6	75,7	69,3	68,7	□	□
					P_y, Н	5,0	4,8	5,5	5,1	5,1	□	□
6	19,35	0,15	0,8		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,077	0,084	0,091	0,098	□
					P_h, Н	70,8	74,6	72,8	80,9	78,3	79,5	□
					P_v, Н	32,5	41,7	37,3	57,9	49,0	41,2	□
					P_y, Н	3,6	4,2	3,9	4,8	4,0	4,1	□
2	15,47	0,1	0,8		$h_{зпр}$, мм	0,063	0,077	0,077	0,084	0,098	□	□
					P_h, Н	81,7	87,3	71,8	74,8	63,7	□	□
					P_v, Н	40,3	48,8	42,7	47,3	30,5	□	□
					P_y, Н	3,5	3,9	3,8	3,9	2,8	□	□
11	24,65	0,25	1,6		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,077	0,084	0,091	□	□
					P_h, Н	152,1	160,2	151,8	160,4	170,7	□	□
					P_v, Н	76,7	103,8	96,3	87,2	110,8	□	□
					P_y, Н	5,6	7,9	7,5	7,5	7,8	□	□
13	19,29	0,3	0,8	МР-99	$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,07	0,084	0,098	0,098	□
					P_h, Н	116,1	118,1	119,5	120,4	121,9	109,0	□
					P_v, Н	53,0	58,1	59,1	60,1	62,9	52,7	□
					P_y, Н	5,2	5,3	5,4	5,4	5,8	4,8	□
26	27,7	0,2	2,0		$h_{зпр}$, мм	0,07	0,084	0,098	0,105	□	□	□
					P_h, Н	139,5	141,4	152,0	138,0	□	□	□
					P_v, Н	93,1	96,8	98,0	89,0	□	□	□
					P_y, Н	3,4	3,7	3,8	3,1	□	□	□
19	15,3	0,1	0,4		$h_{зпр}$, мм	0,063	0,077	0,084	0,098	0,105	□	□
					P_h, Н	43,8	49,7	57,1	63,1	60,2	□	□
					P_v, Н	26,6	32,3	44,3	47,2	46,7	□	□
					P_y, Н	5,9	3,9	4,2	4,5	3,8	□	□
20	24,6	0,25	0,4		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,077	0,084	0,098	0,105	□	□
					P_h, Н	48,4	62,5	64,7	67,5	66,2	□	□
					P_v, Н	35,0	39,8	42,4	48,6	47,4	□	□
					P_y, Н	3,6	2,3	2,1	2,4	3,1	□	□
21	15,5	0,1	0,8	Сухая	$h_{зпр}$, мм	0,056	0,056	0,063	0,07	0,077	0,098	0,105
					P_h, Н	67,6	70,5	71,1	80,7	81,3	83,8	48,1
					P_v, Н	34,9	38,3	39,4	40,0	41,8	41,6	25,5
					P_y, Н	4,6	3,9	3,4	3,9	3,5	5,3	3,5
23	27,9	0,3	0,8		$h_{зпр}$, мм	0,048	0,077	0,091	0,098	0,105	□	□
					P_h, Н	98,2	104,9	112,1	115,1	107,2	□	□
					P_v, Н	62,5	64,5	67,5	74,2	82,2	□	□
					P_y, Н	8,0	5,6	6,4	5,6	7,6	□	□

Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
24	27,9	0,3	0,4	Сухая	$h_{зпр}$, мм	0,084	0,091	0,098	0,105	□	□	□
					P_h, Н	58,6	60,6	76,0	66,5	□	□	□
					P_v, Н	47,4	49,7	61,6	60,2	□	□	□
					P_y, Н	2,9	3,4	4,6	2,3	□	□	□
27	19,44	0,15	1,6		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,077	0,084	0,098	0,105	□
					P_h, Н	140,6	157,2	157,7	173,9	175,2	93,1	□
					P_v, Н	75,8	80,2	92,6	93,6	103,6	63,1	□
					P_y, Н	8,6	8,2	5,0	6,7	7,5	3,8	□
31	12,2	0,3	0,4	И-20А	$h_{зпр}$, мм	0,056	0,063	0,077	0,084	0,098	0,105	□
					P_h, Н	81,6	115,3	116,8	117,9	119,8	101,1	□
					P_v, Н	53,8	82,0	82,4	86,9	90,6	81,0	□
					P_y, Н	4,4	5,2	5,6	6,6	5,7	5,0	□
33	27,53	0,3	0,8		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,063	0,07	0,077	0,084	0,098	0,105
					P_h, Н	102,4	105,3	106,1	110,3	120,5	132,6	104,1
					P_v, Н	65,0	66,0	68,2	70,9	71,7	78,4	64,0
					P_y, Н	5,9	4,9	4,6	4,8	3,9	4,9	3,5
34	19,25	0,1	1,6		$h_{зпр}$, мм	0,063	0,077	0,084	0,098	0,105	□	□
					P_h, Н	147,4	149,1	152,1	153	145,6	□	□
					P_v, Н	72,9	77,5	84,3	91,3	75,4	□	□
					P_y, Н	4,8	4,4	4,4	4,9	4,6	□	□
37	24,45	0,3	0,4		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,07	0,077	0,084	0,098	0,105	□
					P_h, Н	62,4	82,2	83,2	86,6	96,7	73,5	□
					P_v, Н	52,5	68,8	71,9	67,6	85,6	49,9	□
					P_y, Н	6,1	4,5	3,6	3,9	5,6	3,2	□
40	15,5	0,1	0,8	Рапсовое масло	$h_{зпр}$, мм	0,053	0,07	0,077	0,084	0,098	□	□
					P_h, Н	40,2	62,7	64,0	68,0	65,0	□	□
					P_v, Н	23,3	41,7	43,7	50,3	32,3	□	□
					P_y, Н	3,4	4,5	4,3	4,0	2,1	□	□
41	24,45	0,15	1,2		$h_{зпр}$, мм	0,042	0,056	0,07	0,084	0,098	□	□
					P_h, Н	84,8	89,2	97,0	98,2	90,3	□	□
					P_v, Н	43,0	57,0	57,0	53,0	58,1	□	□
					P_y, Н	4,3	3,1	6,0	4,9	4,5	□	□
42	15,33	0,3	0,4		$h_{зпр}$, мм	0,042	0,056	0,07	0,077	0,084	0,098	□
					P_h, Н	70,0	70,8	73,3	76,6	79,5	77,0	□
					P_v, Н	40,3	37,4	52,6	52,7	53,7	43,1	□
					P_y, Н	4,1	4,5	5,1	4,9	3,9	3,5	□
43	12,27	0,2	0,4		$h_{зпр}$, мм	0,056	0,063	0,07	0,077	0,084	0,098	□
					P_h, Н	36,2	38,5	40,7	45,3	48,2	45,3	□
					P_v, Н	26,7	26,4	26,7	37,3	38,1	34,7	□
					P_y, Н	1,3	2,4	1,7	3,9	3,2	2,9	□

Примечание: номера экспериментов соответствуют номерам в приложении А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы приработке P_h при изменении режимов приработки (МР-99)

№ п/п	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V=28м/мин		V=40м/мин		Отношение T_1/T_2	P_h, Н	Отклонение P_h от P_h при T_{max}, %
				T_1, мин	отклонение от $T_{1\ max}$, %	T_2, мин	отклонение от $T_{2\ max}$, %			
1	12	0,1	0,4	114,4	0	102	0	-	68,5	0
2	15			114,4	-0,009	101,96	-0,039	0,223	60,3	-11,971
3	20			114,4	-0,026	101,93	-0,069	0,382	49,4	-27,883
4	28			114,4	-0,044	101,88	-0,118	0,371	36,8	-46,277
5	12		0,5	113,3	-0,961	100,98	-1	0,961	65,2	-4,818
6	15			113,3	-0,97	100,96	-1,02	0,951	58,6	-14,453
7	20			113,3	-0,987	100,93	-1,049	0,941	49,8	-27,3
8	28			113,3	-1,014	100,87	-1,108	0,915	39,3	-42,628
9	12		0,6	112,5	-1,678	100,25	-1,716	0,978	64,1	-6,423
10	15			112,5	-1,686	100,22	-1,745	0,966	58,6	-14,453
11	20			112,5	-1,704	100,18	-1,784	0,955	51,3	-25,109
12	28			112,5	-1,739	100,11	-1,853	0,938	42,3	-38,248
13	12	0,15	0,4	94,8	-17,162	79,68	-21,882	0,784	55	-19,708
14	15			94,77	-17,188	79,63	-21,931	0,784	53,3	-22,19
15	20			94,73	-17,223	79,6	-21,961	0,784	52	-24,088
16	28			94,66	-17,284	79,4	-22,157	0,78	50,8	-25,839
17	12		0,5	93,31	-18,464	78,4	-23,137	0,798	72,4	5,693
18	15			93,27	-18,499	78,3	-23,235	0,796	65,1	-4,964
19	20			93,22	-18,542	78,25	-23,284	0,796	55,3	-19,27
20	28			93,1	-18,647	78,1	-23,431	0,796	43,6	-36,35
21	12		0,6	92,06	-19,556	77,33	-24,186	0,809	71,1	3,796
22	15			92,03	-19,582	77,26	-24,255	0,807	65	-5,051
23	20			91,97	-19,635	77,15	-24,363	0,806	56,9	-16,92
24	28			91,87	-19,722	76,96	-24,55	0,803	47	-31,387

Продолжение приложения Г

Изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы приработке P_h при изменении режимов приработки (И-20А)

№ п/п	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V=28м/мин		V=40м/мин		Отношение T_1/T_2	P_h, Н	Отклонение P_h от P_h при T_{max}, %
				T_1, мин	отклонение от $T_{1\ max}$, %	T_2, мин	отклонение от $T_{2\ max}$, %			
1	12	0,1	0,4	174,8	0	147,6	0	-	91	0
2	15			160,2	-8,352	130,3	-11,721	0,713	88,4	-2,857
3	20			138,5	-20,767	105,8	-28,32	0,733	85,1	-6,484
4	28			109,7	-37,243	75,9	-48,578	0,767	81,4	-10,549
5	12		0,5	174,8	0	147,6	0	-	96,3	5,824
6	15			160,2	-8,353	130,3	-11,721	0,713	92,9	2,088
7	20			138,5	-20,767	105,8	-28,32	0,733	88,6	-2,637
8	28			109,7	-37,243	75,9	-48,577	0,767	83,9	-7,802
9	12		0,6	174,8	0	147,6	0	-	101,3	11,319
10	15			160,2	-8,352	130,3	-11,721	0,713	97,6	7,253
11	20			138,5	-20,767	105,8	-28,32	0,733	92,2	1,319
12	28			109,7	-37,243	75,9	-48,577	0,767	86,3	-5,165
13	12	0,15	0,4	104,7	-40,086	88,4	-40,108	0,999	96,85	6,429
14	15			96	-45,08	78	-47,154	0,956	94,5	3,846
15	20			83	-52,517	63,4	-57,046	0,921	91,7	0,769
16	28			65,7	-62,414	45,4	-69,241	0,901	88,4	-2,857
17	12		0,5	104,7	-40,103	88,4	-40,108	1	104	14,286
18	15			96	-45,08	78	-47,154	0,956	101	10,989
19	20			83	-52,517	63,4	-57,046	0,921	97,1	6,703
20	28			65,7	-62,414	45,4	-69,241	0,901	92,8	1,978
21	12		0,6	104,7	-40,103	88,4	-40,108	1	111,6	22,637
22	15			96	-45,08	78	-47,154	0,956	107,7	18,352
23	20			83	-52,517	63,4	-57,046	0,921	102,8	12,967
24	28			65,7	-62,414	45,4	-69,241	0,901	58,97	-35,198

Продолжение приложения Г

Изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы приработке P_h при изменении режимов приработки (касторовое масло)

№ п/п	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V=28м/мин		V=40м/мин		Отношение T_1/T_2	P_h, Н	Отклонение P_h от P_h при T_{max}, %
				T_1, мин	отклонение от $T_{1\,max}$, %	T_2, мин	отклонение от $T_{2\,max}$, %			
1	12	0,1	0,4	256,6	-26,18	145,05	-0,299	87,476	57,9	9,04
2	15			270,5	-22,181	154,22	-0,255	86,991	57	7,34
3	20			296,6	-14,672	171,8	-0,17	86,282	53,5	0,753
4	28			347,6	0	207	0	-	53,1	0
5	12		0,5	215	-38,136	122,37	-0,409	93,278	60,1	13,183
6	15			217,2	-37,514	124,9	-0,397	94,586	59,1	11,3
7	20			221,2	-36,364	130,1	-0,371	97,884	57,5	8,286
8	28			232,2	-33,2	141,4	-0,317	104,759	55,1	3,766
9	12		0,6	186,4	-46,375	106,8	-0,484	95,805	62,3	17,326
10	15			181,8	-47,699	105,5	-0,49	97,277	61,3	15,443
11	20			175,4	-49,54	104,2	-0,497	99,754	59,6	12,241
12	28			168,2	-51,611	104,5	-0,495	104,229	57,1	7,533
13	12	0,15	0,4	195,7	-43,7	112,6	-0,456	95,824	60,3	13,56
14	15			193,6	-44,304	113,3	-0,453	97,875	58,8	10,734
15	20			192,5	-44,62	115,8	-0,441	101,276	56,5	6,403
16	28			194,8	-43,959	123,9	-0,401	109,5	52,9	-0,377
17	12		0,5	165,1	-52,503	96,03	-0,536	97,937	63,7	19,962
18	15			157,1	-54,804	93,1	-0,55	99,6	62,1	16,95
19	20			146,2	-57,94	89,9	-0,566	102,422	59,6	12,241
20	28			134,2	-61,392	88,5	-0,572	107,242	55,8	5,085
21	12		0,6	144	-58,573	84,7	-0,591	99,138	67,2	26,554
22	15			132,8	-61,795	79,9	-0,614	100,642	65,6	23,54
23	20			117,5	-66,197	73,9	-0,643	102,951	63	18,644
24	28			99,96	-71,243	68,4	-0,67	106,402	58,97	11,055

Продолжение приложения Г

Изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы приработке P_h при изменении режимов приработки (рапсовое масло)

№ п/п	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V=28м/мин		V=40м/мин		Отношение T_1/T_2	P_h, Н	Отклонение P_h от P_h при T_{max}, %
				T_1, мин	отклонение от $T_{1\ max}$, %	T_2, мин	отклонение от $T_{2\ max}$, %			
1	12	0,1	0,4	172,5	0	138,2	0	-	44	0
2	15			169,3	-1,855	133	-3,763	0,493	43,1	-2,045
3	20			165,5	-4,058	127	-8,104	0,5	42,4	-3,636
4	28			161,7	-6,261	121,1	-12,373	0,506	41,8	-5
5	12		0,5	172,1	-0,232	137,6	-0,434	0,534	48,8	10,909
6	15			169	-2,029	132,2	-4,342	0,467	47,8	8,636
7	20			165	-4,348	125,8	-8,973	0,485	47	6,705
8	28			161	-6,667	119,4	-13,603	0,49	46,3	5,227
9	12		0,6	172	-0,29	137,1	-0,796	0,364	53,8	22,273
10	15			168	-2,609	131,5	-4,848	0,538	52,7	19,773
11	20			164	-4,928	125	-9,551	0,516	51,7	17,5
12	28			160	-7,246	118,1	-14,544	0,498	51	15,909
13	12	0,15	0,4	145	-15,942	95,3	-31,042	0,514	55	25
14	15			140	-18,84	88,8	-35,745	0,527	53,3	21,136
15	20			134,3	-22,145	81,5	-41,027	0,54	52	18,182
16	28			128,2	-25,681	74,6	-46,02	0,558	50,8	15,455
17	12		0,5	144,4	-16,29	94,5	-31,621	0,515	59,2	34,545
18	15			139,3	-19,246	87,8	-36,469	0,528	57,5	30,682
19	20			133,2	-22,783	80,1	-42,04	0,542	56	27,273
20	28			127	-26,377	72,7	-47,395	0,557	54,7	24,318
21	12		0,6	144	-16,522	93,9	-32,055	0,515	63,7	44,773
22	15			138,7	-19,594	87	-37,048	0,529	61,8	40,341
23	20			132	-23,478	81,1	-41,317	0,568	60,1	36,591
24	28			125,7	-27,13	71,2	-48,48	0,56	58,9	33,864

Продолжение приложения Г

Изменение стойкости и горизонтальной составляющей силы приработке P_h при изменении режимов приработки (сухая обработка)

№ п/п	$V_{пр}$, м/мин	S_z, мм/зуб	t, мм	V=28м/мин		V=40м/мин		Отношение T_1/T_2	P_h, Н	Отклонение P_h от P_h при T_{max}, %
				T_1, мин	отклонение от $T_{1\ max}$, %	T_2, мин	отклонение от $T_{2\ max}$, %			
1	12	0,1	0,4	95,8	0	96,3	0	-	60,3	0
2	15			95,7	-0,104	96,2	-0,104	1,0052	56,7	-5,892
3	20			95,4	-0,418	95,4	-0,935	0,447	52,5	-12,863
4	28			94,65	-1,2	95,1	-1,246	0,963	47,9	-20,498
5	12		0,5	93,1	-2,818	93,3	-3,115	0,905	72,4	20,166
6	15			92,9	-3,027	93,2	-3,219	0,94	68,1	13,029
7	20			92,6	-3,34	92,8	-3,634	0,919	63	4,564
8	28			91,9	-4,071	92,2	-4,258	0,956	57,5	-4,564
9	12		0,6	90,4	-5,637	90,5	-6,023	0,936	84	39,419
10	15			90,3	-5,741	90,4	-6,127	0,937	79,1	31,286
11	20			89,9	-6,159	90,1	-6,438	0,957	73,2	21,494
12	28			89,3	-6,785	89,4	-7,165	0,947	66,8	10,871
13	12	0,15	0,4	72,55	-24,269	72,9	-24,299	0,999	64,4	6,888
14	15			72,3	-24,53	72,7	-24,507	1,001	60,6	0,581
15	20			71,7	-25,157	72,1	-25,13	1,001	56,1	-6,888
16	28			70,52	-26,388	70,1	-27,207	0,97	51,2	-15,021
17	12		0,5	70,4	-26,514	70,6	-26,687	0,993	77,3	28,299
18	15			70,2	-26,722	70,4	-26,895	0,994	72,8	20,83
19	20			69,6	-27,349	69,8	-27,518	0,994	67,3	11,701
20	28			68,46	-28,539	68,6	-28,764	0,992	61,5	2,025
21	12		0,6	68,4	-28,601	68,5	-28,868	0,9908	89,8	49,046
22	15			68,1	-28,914	68,2	-29,18	0,9909	84,5	40,249
23	20			67,6	-29,436	67,7	-29,699	0,991	78,2	29,793
24	28			66,5	-30,585	66,7	-30,737	0,995	71,4	18,506

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

УТВЕРЖДАЮ:
Председатель правления
ЧАО «Пневматика»
Васильев Н.В.
____
«06» декабря 2013г.

АКТ
технических испытаний

Мы, нижеподписавшиеся, представители ЧАО «Пневматика» и представители РВУЗ «КИПУ» составили настоящий акт в том, что в период с октября по декабрь 2013 г. на производственном участке ЧАО «Пневматика» проводились промышленные испытания цилиндрических фрез по ГОСТ 29092-91.

Испытания проводились при фрезеровании плоскостей детали «Плита» 5Р2. 213.00.014 распределителя 5-ти ступенчатого из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на горизонтально-фрезерном станке модели 6Т83Г в присутствии рапсового, касторового масел, рекомендуемой для обработки нержавеющих коррозионно-стойких сталей МР-99 и при сухой обработке.

В присутствии каждой из сред испытывались по 3 фрезы до принятого критерия затупления $h_з = 0{,}3$ мм (фаска износа по задней поверхности).

Подготовка каждой из фрез производилась путем переточек. В испытаниях принимали участие фрезы Ø80 мм; L = 80 мм; Z = 10, геометрия которых рекомендована стандартом.

Процесс испытаний состоял из приработки зубьев фрезы с целью образования вторичных упрочненных структур на их контактных поверхностях с последующим изменением режимов резания, рекомендуемых для получистового и чистового фрезерования с использованием технологии минимального смазывания.

Режимы приработки: $V_{пр} = 15{,}5$ м/мин; $S_{zпр} = 0{,}15$ мм/зуб; $t = 0{,}5$ мм в среде рапсового масла, МР-99 и при сухой обработке, а в среде касторового масла $V_{пр} = 25$ м/мин; $S_{zпр} = 0{,}15$ мм/зуб; $t = 0{,}5$ мм.

Режимы резания (стационарные):

– при получистовом фрезеровании: $V_c = 35$ м/мин; $S_z = 0{,}2$ мм/зуб; $t = 1{,}2$ мм в среде рапсового масла, касторового масла, МР-99 и при сухой обработке;

– при чистовом фрезеровании: $V_c = 45$ м/мин; $S_z = 0{,}15$ мм/зуб; $t = 0{,}5$ мм в среде рапсового масла, касторового масла, МР-99 и при сухой обработке.

В результате статистической обработки стойкость фрез составила:

– при получистовом фрезеровании: в среде рапсового масла – 110 мин; в среде МР-99 – 85 мин; при сухой обработке – 38 мин; в среде касторового масла – 32 мин.

– при чистовом фрезеровании: в среде касторового масла – 170 мин; в среде рапсового масла – 130 мин; в среде МР-99 – 90 мин; при сухой обработке – 43 мин.

Промышленные испытания подтвердили результаты исследований Ваниева Э.Р. по теме «Упрочняющее действие СОТС при фрезеровании нержавеющих сталей».

Рекомендации по упрочняющему действию используемых СОТС и режимам по упрочнению быстрорежущего инструмента при фрезеровании приняты к использованию.

Аспирант
РВУЗ «КИПУ»
Ваниев Э.Р. _______________
Доцент
РВУЗ «КИПУ»
Джемилов Э.Ш. _______________

Технический директор
ЧАО «Пневматика»
Кислый В.И. _______________
Инженер-технолог
ЧАО «Пневматика»
Курманов Р.Д. _______________

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор РВУЗ «КИПУ»,
к.т.н., доц.
______________ Э.М. Люманов

«20» декабря 2013 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Ваниева Эльдара Рустемовича

Комиссия в составе:

председатель – декан ИТФ РВУЗ «КИПУ», д.т.н., проф., У.А. Абдулгазис;

члены: зав. кафедры технологии машиностроения, д.т.н., проф., Ф.Я. Якубов;

ст. преп. кафедры технологии машиностроения, к.т.н., А.И. Алиев, составили настоящий акт, подтверждающий, что материалы и результаты диссертационной работы старшего преподавателя кафедры технологии машиностроения Ваниева Э.Р. на тему «Упрочняющее действие СОТС при фрезеровании сталей аустенитного класса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты внедрены в учебный процесс РВУЗ «КИПУ» при преподавании дисциплин «Теория резания», «Технология машиностроения» и лабораторных работ по этим курсам, а также при выполнении курсовых, дипломных и магистерских работ.

Декан ИТФ
РВУЗ «КИПУ», д.т.н., проф. ______________ У.А. Абдулгазис

Зав. кафедры технологии
машиностроения, д.т.н., проф. ______________ Ф.Я. Якубов

Ст. преп. кафедры технологии
машиностроения, к.т.н. ______________ А.И. Алиев