

На правах рукописи



Кисель Антон Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА
СОЖ**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ОмГТУ»).

Научный руководитель: **Ражковский Александр Алексеевич**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Наумов Александр Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный университет»,
профессор кафедры экспериментальной и
технической физики, заведующий лабораторией
физико-технических исследований

Васильев Дмитрий Вячеславович
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»,
заведующий лабораториями резания, доцент
кафедры «Станки и инструменты»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический
университет»

Защита состоится «27» декабря 2018 г., в 14-00, на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.003.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32) и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3, первый учебный корпус, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета: www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Веткисов Н. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Анализ известной научно-технической информации и производственного опыта показал, что на точность заготовки при ее механической обработке, кроме традиционно исследуемых факторов, таких как жесткость оборудования и технологической оснастки, через изменение силы резания влияет смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Это известный факт.

Однако до настоящего времени недостаточно исследованы закономерности этого явления и его количественная оценка при лезвийной обработке нежестких заготовок.

Обработка нежестких заготовок имеет присущие ей особенности – недостаточно интенсивные режимы обработки, сложные технологические наладки, большие погрешности при обработке нежестких элементов, которые регламентируют точность всей детали, необходимость применения всего арсенала технологических средств для снижения сил резания и деформаций заготовки до допустимой величины. Одним из таких средств могут являться современные СОЖ, которые применяют при резании на большинстве металлообрабатывающих предприятий, что объясняется их достоинствами: обеспечивают повышение стойкости инструмента, точности и качества поверхностей обработанных деталей и производительности обработки в целом.

Однако ассортимент современных СОЖ настолько велик, что выбор конкретного состава для конкретных условий обработки является достаточно трудоемкой задачей. Очевидно, это связано с тем, что различные составы СОЖ по-разному влияют на процесс резания. Это влияние характеризуется их функциональными действиями. Поэтому целесообразно оценить основные составы СОЖ, систематизировать их и на основе исследований их функциональных действий разработать методику выбора состава СОЖ, обеспечивающего наименьшую силу резания при токарной обработке. В результате снижения силы резания уменьшится упругая деформация заготовки в диаметральной направлении, и точность обработки возрастет. Это особенно важно при обработке нежестких заготовок, где допуски составляют несколько микрометров.

Степень разработанности проблемы. Весомый вклад в изучение влияния СОЖ на процесс обработки внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Энтелис С. Г., Худобин Л. В., Гордон М. Б., Наумов А. Г., Шолом В. Ю., Марков В. В., Макаров Р. В., Ковальногов В. Н., Булыжев Е. М., Берлинер Э.М., Бабичев А. П., Боровский Г. В., Веткасов Н. И., Киселев Е. С., Латышев В.Н., Абдулгазис У. А., Якубов Ф. Я., Гисметулин А. Р., Дубровский Ю. С., и Graham T. Smith, Jerry P. Byers, Mang T., Dresel W., Viktor P. Astakhov, Meister B. E., Cakir O., Yardimeden A., Ozben T., Kuram E., Ozcelik B., Demirbas E., Sik E., Adler D. P., Hii W. W-S, Michalek D. J., Sutherland J. W. и др.

Несмотря на то, что проведено большое число исследований в данной области, не существует научно-обоснованной методики выбора СОЖ, обеспечивающей снижение деформации нежесткой заготовки для конкретных

условий токарной обработки. Отсутствуют методы и обоснованные параметры экспресс-анализа технологических свойств СОЖ.

Целью работы является уменьшение деформации нежестких заготовок при токарной обработке путем рационального выбора СОЖ.

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

1. Экспериментально установить область режимов резания, где влияние СОЖ на силы при токарной обработке нежестких заготовок существенно;
2. Разработать экспериментальную методику количественной оценки эффективности СОЖ по смазочному и охлаждающему действиям в условиях, моделирующих зону резания при токарной обработке нежестких заготовок;
3. Предложить методику и программу расчета упругих деформаций при токарной обработке нежестких заготовок в установленной области режимов обработки за счет применения эффективной СОЖ;
4. Внедрить результаты работы в производство.

Методы исследования. Теоретические исследования влияния и применения СОЖ при токарной обработке нежестких заготовок проводили, опираясь на теории резания, трения и износа, теплофизики и планирования эксперимента. Обработку теоретических и экспериментальных результатов проводили в среде Microsoft Excel, а также в программах STATISTICA v 10.0 и КОМПАС v 14. Разработанные теоретические положения и новые технические решения опробованы экспериментально в лабораториях кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ и ЗАО НПО «Промэкология». Исследования проводили с использованием современных стандартных и специальных измерительных приборов: машины трения ИИ 5018, установки для определения охлаждающей способности закалочных сред «Компатон», динамометра УДМ-600, усилителя сигнала УТ4-1.

Научная новизна результатов исследований заключается в:

- 1) разработанной методике выбора СОЖ на основе количественной оценки снижения сил резания в зависимости от смазочного и охлаждающего действий СОЖ при токарной обработке нежестких заготовок;
- 2) разработанной установке для определения охлаждающей способности СОЖ при высоких температурах, характерных для зоны резания;
- 3) методике расчета эффективности СОЖ по смазочному действию в зависимости от ее плотности и кинематической вязкости для пары «инструмент-деталь».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- 1) экспериментально установлены области режимов токарной обработки нежестких заготовок, при которых влияние СОЖ на силы резания максимально;
- 2) зависимости коэффициента эффективности СОЖ по силам резания при токарной обработке нежестких заготовок от показателей эффективности смазочного и охлаждающего действий СОЖ;
- 3) зависимости коэффициента трения от физических свойств СОЖ при испытаниях образцов из различных сплавов на машине трения.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждается высокой вероятностью совпадения результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. Расхождение результатов расчетов с экспериментальными данными не превышает 10 %.

Практическая ценность заключается в:

1) разработанных способах оценки эффективности СОЖ, основанных на определении силы резания (патент РФ на изобретение № 2528294) и параметров функциональных действий (патент РФ на изобретение № 2548938), позволяющих повысить эффективность обработки;

2) разработанной методике и программе выбора эффективной СОЖ для токарной обработки нежестких заготовок по результатам исследований смазочного и охлаждающего действий СОЖ;

3) представленных технологических рекомендациях по выбору эффективного состава СОЖ для токарной обработки, позволяющих снизить деформацию обрабатываемых нежестких заготовок;

4) разработанном устройстве для определения охлаждающей способности жидкой среды (патент РФ на полезную модель № 130081).

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: региональной студенческой научной конференции «Наука и молодежь в XXI веке» (Омск, 2012 г.), инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (Кемерово, 2012 г.), VI международной научно-практической заочной конференции «Теоретические и методологические проблемы современных наук» (Новосибирск, 2012 г.), III региональной молодежной научно-технической конференции «Омский регион – месторождение возможностей» (Омск, 2012 г.), международной научно-практической конференции «Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе» (Уфа, 2013 г.), I международной научно-практической конференции «Перспективы развития научных исследований в 21 веке» (Москва, 2013 г.), XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики XXI века» (Братск, 2013 г.), V всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (Омск, 2013 г.), на заседании кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (Омск, 2014 г.), а также на заседании кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (Омск, 2015 г.), XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики XXI века» (Братск, 2015 г.), международной научно-практической конференции «Инновационные методы исследований в технике и технологиях» (Магнитогорск, 2017 г.).

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат формулировка цели и задач исследований, проведение и обработка результатов экспериментов, математического моделирования, проектирование и создание лабораторных и опытно-производственных установок.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 21 публикации, из них 5 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, получено два патента РФ на изобретение, один патент на полезную модель и свидетельство о регистрации электронного ресурса.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы из 184 наименований, изложена на 175 страницах машинописного текста, включая 44 иллюстрации, 20 таблиц и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена ее структура, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов исследования.

В первой главе выполнен анализ степени влияния основных технологических факторов, включая СОЖ, на силу резания и деформацию заготовки. Установлено, что наименее исследованным является выбор эффективного состава СОЖ, применение которого оказывает благоприятное влияние на силы резания и в ряде случаев позволяет снизить деформацию заготовки до требуемой величины.

Исследованы физико-механические процессы, происходящие в зоне резания при применении СОЖ, и определены доминирующие факторы, влияющие на силу резания. В качестве основных функциональных действий в большей степени определяющих силы резания, были приняты смазочное и охлаждающее действия СОЖ.

Проанализированы существующие методы выбора СОЖ, приведенные в научных трудах С. Г. Энтелиса, Л. В. Худобина, М. Б. Гордона, А. Г. Наумова, В. Ю. Шолома, В. В. Маркова, Р. В. Макарова, В. Н. Ковальногова, Е. М. Булыжева, Э. М. Берлинера, А. П. Бабицева, Г. В. Боровского, Н. И. Веткасова, Е. С. Киселева, В. Н. Латышева и других ученых, Отмечена их пригодность для оценки влияния состава СОЖ на силу резания. В результате проведенного анализа установлено, что в настоящее время не определена взаимосвязь параметров, характеризующих функциональные действия СОЖ, и технологических параметров процесса резания.

Несмотря на большое количество разработанных методик оценки влияния СОЖ, в настоящее время не существует единой методики, которая позволила бы однозначно выбирать эффективный состав СОЖ по критерию обеспечения наименьшей силы резания.

Предложен следующий алгоритм разработки методики выбора СОЖ, которая позволит снизить деформации нежестких заготовок при токарной обработке:

1. Установить номенклатуру составов СОЖ, материалов обрабатываемых заготовок и режущих инструментов;

2. Определить область режимов, в которой влияние СОЖ на силу резания при точении нежестких заготовок будет существенно;

3. Экспериментально оценить влияние СОЖ на силу резания при токарной обработке нежестких заготовок;

4. Экспериментально исследовать смазочное и охлаждающее действия выбранных составов СОЖ в лабораторных условиях;

5. С целью прогнозирования снижения силы резания при токарной обработке нежестких заготовок с применением СОЖ установить ее зависимость от функциональных действий СОЖ.;

6. Разработать методику выбора СОЖ, позволяющую прогнозировать величину силы резания по результатам лабораторных испытаний и математических расчетов.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния СОЖ на силу резания при токарной обработке нежестких деталей. Дана количественная оценка влияния СОЖ на величину упругой деформации нежестких заготовок в диаметральной направлении при их токарной обработке.

Для проведения исследований произведен выбор эффективных для исследования СОЖ и режимов токарной обработки нежестких заготовок, при которых СОЖ наиболее эффективно влияет на силы резания. Рациональными в работе приняты такие режимы, при которых снижение сил резания от применения СОЖ максимально.

В ходе исследования варьировали 11 составами водных СОЖ, обладающими рядом достоинств по сравнению с масляными СОЖ и более широко распространенными при лезвийной обработке заготовок. Для сравнения испытания проводили и без применения СОЖ.

Опираясь на приведенную в главе классификацию и данные по номенклатуре нежестких деталей и материалов, из которых они изготовлены, в качестве объекта исследования были выбраны представители наиболее распространенных групп сталей и сплавов различной обрабатываемости резанием:

1. Титановый сплав ВТ3-1;
2. Жаропрочный сплав ХН77ТЮР;
3. Сталь 45;
4. Алюминиевый сплав Д16.

В качестве инструментального материала были приняты твердые сплавы, относящиеся к группам Р10 и К10 по стандарту ISO (аналоги Т15К6 и ВК6-ОМ), содержащие 79 – 92 % карбида вольфрама, что обеспечивает приблизительно равные коэффициенты трения между материалами инструмента и заготовки для каждой пары трения. Геометрия данных режущих пластин следующая: $\gamma=5^\circ$, $\varphi=95^\circ$, $\alpha=0^\circ$, $\varepsilon=80^\circ$ (пластины без задних углов).

В результате оценки режимов резания, применяемых на омских авиационных предприятиях при токарной обработке нежестких заготовок, для проведения испытаний были определены следующие режимы:

– при обработке заготовки из сплава ВТ3-1 – скорость резания $V = 30...50$ м/мин, глубина резания $t = 0,25...1$ мм и подача $S = 0,1...0,38$ мм/об;

– при обработке заготовки из сплава ХН77ТЮР – скорость резания $V = 20...40$ м/мин, глубина резания $t = 0,25...1$ мм и подача $S = 0,05...0,19$ мм/об;

– при обработке заготовки из стали 45 – скорость резания $V = 35 \dots 60$ м/мин, глубина резания $t = 0,25 \dots 1$ мм и подача $S = 0,1 \dots 0,38$ мм/об;

– при обработке заготовки из сплава Д16 – скорость резания $V = 70 \dots 160$ м/мин, глубина резания $t = 0,25 \dots 1$ мм и подача $S = 0,1 \dots 0,38$ мм/об.

Экспериментальные исследования влияния различных составов СОЖ на силу резания проводили на токарном станке повышенной жесткости модели ФТ-11, оснащенном универсальным динамометром УДМ-600. Подачу СОЖ в зону резания осуществляли через сопло, которое регулировали таким образом, чтобы поток подаваемой СОЖ был близок к потоку, реализуемому непосредственно с помощью станочной системы подачи СОЖ. По результатам проведенных опытов были установлены значения составляющих силы резания P_x , P_y и P_z , после чего рассчитаны значения равнодействующей силы P .

Каждый эксперимент повторяли пять раз, определяли средние значения составляющих силы резания и сводили их в таблицу. Для оценки технологической эффективности СОЖ в работе предложен и запатентован параметр, который рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{СОЖ}} = \frac{P_{\text{СОЖ}}}{P_{\text{безСОЖ}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{СОЖ}}$ – сила резания, полученная с применением СОЖ, Н; $P_{\text{безСОЖ}}$ – сила резания, полученная без применения СОЖ, Н.

Чем меньше величина коэффициента $K_{\text{СОЖ}}$, тем более эффективным является состав СОЖ при данных условиях резания.

С целью определения влияния параметров режима резания на коэффициент $K_{\text{СОЖ}}$ в работе были построены графические зависимости этого коэффициента от скорости резания и подачи. По результатам предварительных экспериментов было установлено, что величина глубины резания практически не влияет на коэффициент $K_{\text{СОЖ}}$, поэтому для проведения всех исследований была принята глубина 1 мм. Оценив графики зависимостей $K_{\text{СОЖ}}$ от скорости резания и подачи, установили, что прямого влияния на $K_{\text{СОЖ}}$ состав СОЖ не оказывает, что делает проблематичной разработку математических зависимостей этого коэффициента от параметров режима резания. Следовательно, в ходе дальнейших исследований необходимо установить рациональные режимы резания нежестких заготовок для каждого обрабатываемого материала и разработать методику выбора СОЖ именно для рациональных режимов.

Полученные по результатам экспериментов данные позволяют определить рациональные режимы обработки с точки зрения эффективности применения СОЖ, а также подобрать эффективный состав СОЖ по силам резания для выбранных режимов. Однако, при этом следует иметь ввиду, что режимы обработки следует выбирать такие, чтобы возникающие в зоне резания температуры не превышали допускаемые теплостойкостью инструментального материала.

С целью определения средней температуры резания при обработке заготовок из выбранных сплавов с установленными режимами был выполнен

расчет с помощью программы, основанной на термомеханическом методе, разработанном профессором В. С. Кушнером.

По результатам расчетов установлены рациональные режимы резания для всех испытанных материалов с учетом возникающих сил резания. Рациональными режимами считались те, при которых средний коэффициент $K_{\text{СОЖ}}$ принимает минимальное значение, а средние температуры не превышают допустимые теплостойкостью инструментального материала. В случае соизмеримости среднего $K_{\text{СОЖ}}$ для разных подач выбиралась меньшая подача, так как при этом качество обработанной поверхности заготовки повышается.

Таким образом, установлены следующие рациональные режимы резания:

1) для обработки заготовки из сплава ВТЗ-1 – скорость резания $V = 31$ м/мин и подача $S = 0,38$ мм/об;

2) для обработки сплава ХН77ТЮР – скорость резания $V = 20$ м/мин и подача $S = 0,1$ мм/об;

3) для обработки стали 45 – скорость резания $V = 57$ м/мин, и подача $S = 0,1$ мм/об;

4) для обработки сплава Д16 – скорость резания $V = 157$ м/мин и подача $S = 0,1$ мм/об.

По полученным данным разработана таблица рекомендаций по применению испытанных СОЖ для токарной обработки (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендации по выбору СОЖ для токарной обработки заготовок из различных материалов

Вид СОЖ	Обрабатываемый материал			
	Сталь 45	ВТЗ-1	ХН77ТЮР	Д16
1,5% в.р.к.с.	○	-	○	-
Blasocut 2000	-	○	-	-
Blasocut 4000	-	●	●	-
Isogrind-130EP	-	○	○	○
Смальта-3	○	●	-	-
Смальта-3*EP	○	○	-	○
Смальта-11	●	○	●	○
Addinol WN430	●	-	-	●
Росойл-500	●	-	○	●
Биосил С	●	-	○	-
Биосил М	-	-	○	●

● – рекомендованная (первый выбор)

○ – возможно рекомендовать

- – не рекомендована

Полученные результаты позволили выполнить расчет деформаций на торцевой части заготовок круглого сечения, изготовленных из выбранных сплавов. Расчет произведен по методу конечных элементов в программе КОМПАС v 14 для случаев обработки без применения СОЖ и с применением эффективной марки СОЖ при рекомендованных режимах резания. Заготовка в

программе была представлена в виде балки с жесткой заделкой при длине вылета из кулачков 100 мм и наружном диаметре 25 мм. Деформация заготовки при этом определяется по разнице диаметров у торца и патрона.

В результате расчета было установлено, что за счет применения эффективной марки СОЖ можно снизить упругие деформации заготовки в диаметральном направлении при токарной обработке стали 45 в 2 раза, при обработке сплава Д16 – в 1,6 раза, при обработке сплава ВТ3-1 – в 1,1 раза и при обработке сплава ХН77ТЮР – в 1,1 раза. Частное от деления величины упругой деформации с применением СОЖ и величины деформации без применения СОЖ приблизительно равно рассчитанной для данных условий величине $K_{\text{СОЖ}}$. Таким образом, применение СОЖ, обеспечивающей наименьшую величину $K_{\text{СОЖ}}$, позволит снизить упругие деформации заготовки в диаметральном направлении во столько же раз, во сколько снизится равнодействующая сила резания.

В дальнейшем необходимо экспериментально оценить смазочное и охлаждающее действия применявшихся марок СОЖ и установить зависимости коэффициентов $K_{\text{СОЖ}}$ от показателей этих действий.

В третьей главе представлены исследования СОЖ по смазочному и охлаждающему действиям.

С целью исследования смазочного действия применяемых марок СОЖ выбрана машина трения модели ИИ 5018. Испытания проводились по схеме «колодка-ролик», при которой неподвижную колодку прижимали к вращающемуся ролику. Выбор такой схемы испытаний обусловлен установленным доминирующим влиянием пары трения на величину коэффициента трения.

Определение коэффициента трения выполнялось при условиях, близких к условиям токарной обработки. Колодка изготовлена из твердых сплавов групп **P10** и **K10**, а ролики из стали 45, алюминиевого сплава Д16, титанового сплава ВТ3-1 и жаропрочного сплава ХН77ТЮР. Контактная поверхность колодки выполнена с радиусом 25 мм, превышающим наружный радиус ролика – 20 мм, что обеспечивало контакт между ними, близкий к линейному. В результате дальнейших экспериментов установлено, что такой контакт между колодкой и роликом обеспечивает напряжение в зоне контакта, соответствующее возникающему при резании.

Исследования проводились при усилии прижима колодки к ролику $P=800$ Н и частоте вращения ролика $n=250$ об/мин (при испытаниях на ролике из стали 45 и из сплавов ВТ3-1 и ХН77ТЮР), а также при силе $P=400$ Н и частоте вращения ролика $n=500$ об/мин (при испытаниях на ролике из сплава Д16). С каждой маркой СОЖ выполнялось по 5 опытов и записывалось в таблицу среднее арифметическое значение коэффициента трения f . Также испытания проводились без применения СОЖ.

Эффективность применения каждой марки СОЖ определялась в сравнении с обработкой без применения СОЖ. Величина эффективности $K_{\text{см}}$ по смазочному действию при обработке различных материалов определялась по формуле:

$$K_{\text{см}} = \frac{f_{\text{СОЖ}}}{f_{\text{безСОЖ}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{СОЖ}}$ – коэффициент трения с применением испытываемой СОЖ; $f_{\text{безСОЖ}}$ – коэффициент трения без применения СОЖ.

Чем меньше значение $K_{\text{см}}$, тем эффективнее данная марка СОЖ по смазочному действию при обработке детали из испытанного материала.

Несмотря на то, что, в литературе прямой зависимости между физическими свойствами СОЖ и их функциональными действиями не установлено, найти такую зависимость, даже эмпирическую, представляется важным для практики.

Известно, что пленка жидкости, разделяющая два трущихся тела, оказывает на них расклинивающее давление. Поэтому с целью определения зависимости коэффициента трения от физических свойств СОЖ силу трения с применением СОЖ предложено разложить на две составляющие – силу сухого трения и силу расклинивающего давления. Схема действия сил на колодку и ролик представлена на рисунке 1.

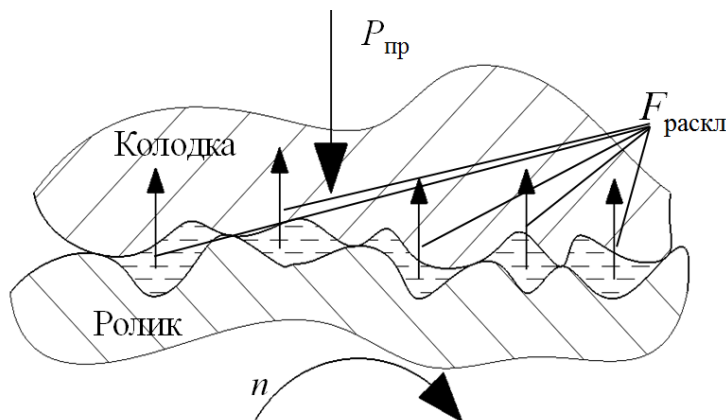


Рисунок 1 – Схема действия сил на колодку и ролик при испытаниях на машине трения ($P_{\text{пр}}$ – усилие прижима колодки к ролику; n – частота вращения ролика; $F_{\text{раскл}}$ – сила расклинивающего давления со стороны СОЖ)

Распределение расклинивающего давления описывается уравнением Рейнольдса:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h_0 - h}{h^3}, \quad (3)$$

где h_0 – толщина слоя смазки в зоне, где $dP/dx = 0$, м; h – толщина слоя смазки в заданной точке, м; η – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

После подстановки уравнения Рейнольдса в уравнение равенства сил было выведено уравнение для расчета коэффициента трения с применением СОЖ:

$$f_{\text{СОЖ}} = f_{\text{безСОЖ}} + \frac{6\eta V_p a^2 l}{h^2 P_{\text{пр}}} X, \quad (4)$$

где X – выведенный поправочный коэффициент, учитывающий проникновение СОЖ в зону трения за счет низкой вязкости, который может принимать как положительное, так и отрицательное значение; a – ширина контакта, м; l – длина контакта, м; V_p – окружная скорость вращения ролика, м/с.

В работе установлено, что коэффициенты X зависят от кинематической вязкости СОЖ, т. к. величины достоверности при этом наивысшие по сравнению с зависимостями от других физических свойств. Построенные по экспериментальным данным зависимости коэффициента X от кинематической вязкости 10% раствора СОЖ представлены на рисунке 2.

Выведенные по экспериментальным данным выражения для расчета коэффициента X следующие:

– для стали 45:

$$X = -12,8624 \cdot v^3 + 36,7011 \cdot v^2 - 34,6576 \cdot v + 10,7666; \quad (5)$$

– для сплава Д16:

$$X = -1,0209 \cdot v^3 + 2,9285 \cdot v^2 - 2,7339 \cdot v + 0,7898; \quad (6)$$

– для сплава ВТ3-1:

$$X = -1,6413 \cdot v^3 + 3,8173 \cdot v^2 - 2,8093 \cdot v + 0,66; \quad (7)$$

– для сплава ХН77ТЮР:

$$X = 2,4626 \cdot v^3 - 6,2961 \cdot v^2 + 5,2723 \cdot v - 1,4578. \quad (8)$$

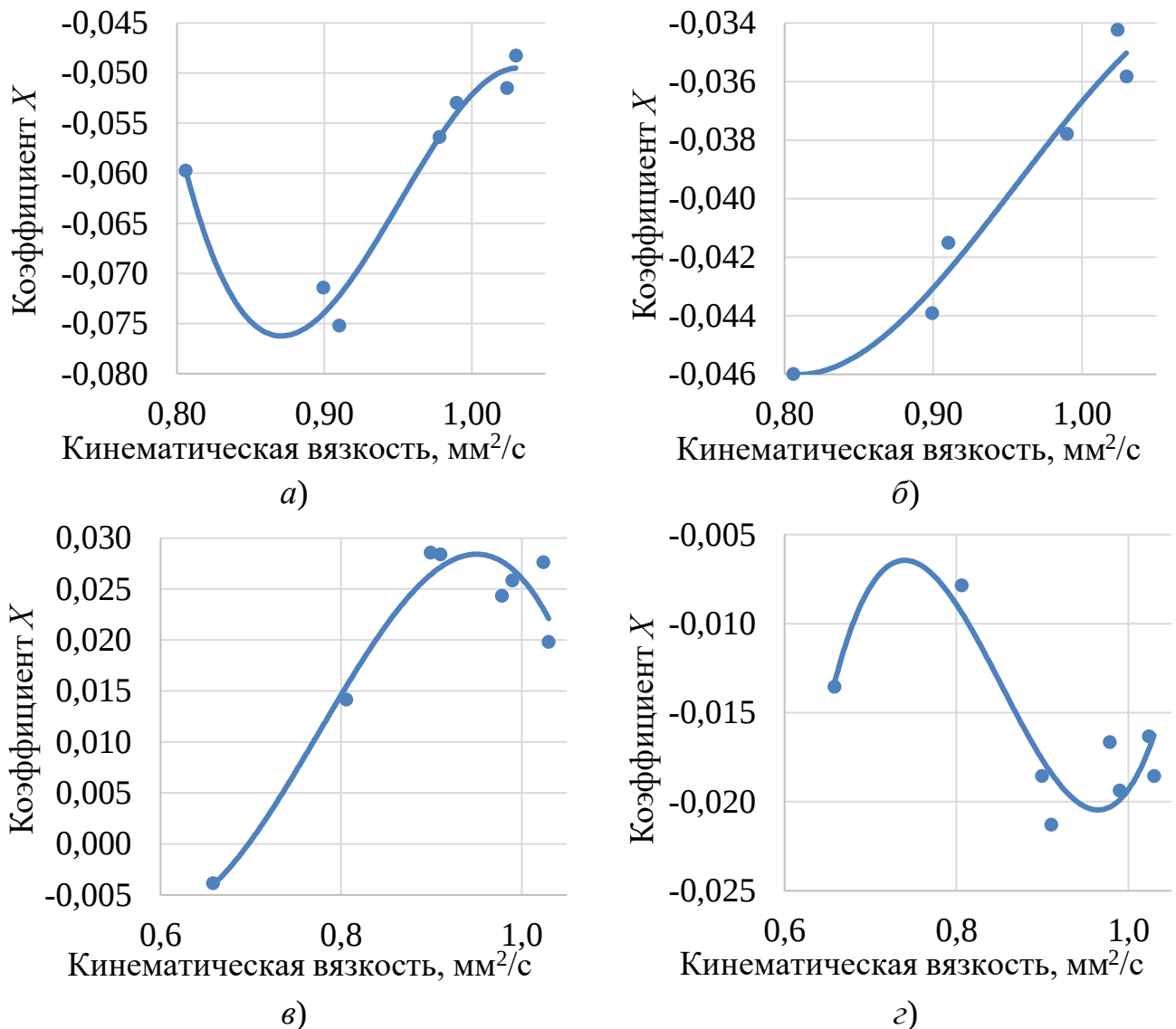


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента X от кинематической вязкости растворов СОЖ для испытанных материалов:

а – сталь 45; б – сплав Д16; в – сплав ВТ3-1; г – сплав ХН77ТЮР

Пользуясь выведенными выражениями (3 – 7), с погрешностью 3...6 % можно предварительно рассчитать коэффициенты трения при применении различных СОЖ по их физическим свойствам.

С целью оценки охлаждающего действия СОЖ применялся запатентованный стенд, схема которого представлена на рисунке 3.

Исследование охлаждающего действия с помощью данного стенда позволяет осуществить выбор СОЖ с наибольшей охлаждающей способностью. Скорость охлаждения является переменной величиной, поэтому критерием оценки охлаждающего действия являлась максимальная скорость охлаждения $V_{\text{охлmax}}$, позволяющая судить об охлаждающем действии в начальный момент времени.

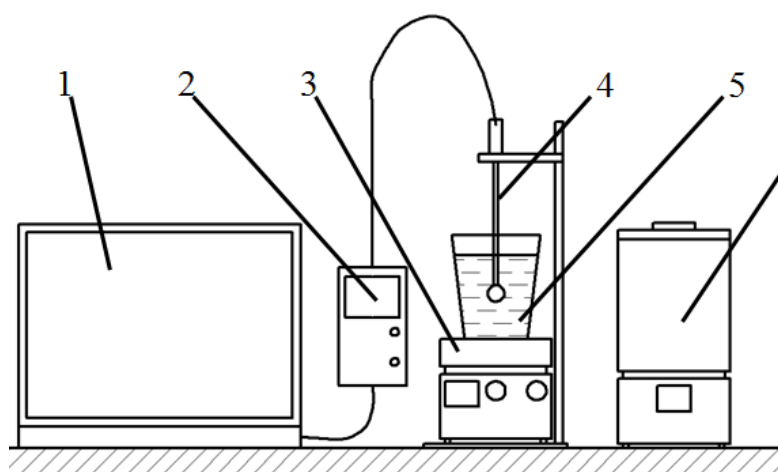


Рисунок 3 – Схема стенда для определения изменения температуры (1 – ЭВМ; 2 – термометр ТЦ-3; 3 – мешалка магнитная ММ-5; 4 – датчик температуры ТХА-720; 5 – емкость для исследуемой СОЖ; 6 – печь)

Эффективность СОЖ по охлаждающему действию оценивалась по коэффициенту $K_{\text{охл}}$, который рассчитывается по выражению:

$$K_{\text{охл}} = \frac{V_{\text{безСОЖ}}}{V_{\text{СОЖ}}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{безСОЖ}}$ – скорость охлаждения без СОЖ (на воздухе), °С/с; $V_{\text{СОЖ}}$ – скорость охлаждения, полученная с применением испытанной СОЖ, °С/с.

Чем меньше значение $K_{\text{охл}}$, тем эффективнее марка СОЖ.

Коэффициенты $K_{\text{см}}$ и $K_{\text{охл}}$ запатентованы как показатели технологической эффективности СОЖ.

Так как производители СОЖ не указывают теплофизических свойств своей продукции, для определения взаимосвязи показателей охлаждающего действия СОЖ и их физических свойств требуется проведение дополнительных исследований, что усложняет выбор СОЖ. Поэтому в данной работе необходимо ограничиться испытаниями на стенде для оценки охлаждающего действия.

В четвертой главе представлена разработанная методика, позволяющая установить целесообразность применения различных составов СОЖ для обеспечения допустимой деформации заготовки в зависимости от жесткости заготовки и технологической наладки. Для определения целесообразности применения СОЖ в работе предложен следующий алгоритм:

1. С помощью динамометрической аппаратуры необходимо приложить к детали в нужном сечении силу, равную силе резания без СОЖ (величины сил

приведены в приложении 1 диссертации), и экспериментально установить величину деформации детали в данном сечении;

2. Если подача или припуск, с которыми выполняются чистовые операции, отличаются от рациональных, то необходимо изготовить одну пробную деталь без применения СОЖ и измерить отклонение диаметральных размеров от заданных, что позволит судить о деформациях заготовки при обработке (деформация равна половине разности заданного и измеренного диаметров);

3. Сделать один из следующих выводов:

– если деформация детали не превышает допускаемую величину для соблюдения требуемого размера в данном сечении, то применение эффективной СОЖ нецелесообразно – при любой марке СОЖ деформация будет соответствовать требованиям;

– если деформация детали больше допускаемой величины для соблюдения требуемого размера в данном сечении, то применение эффективной СОЖ целесообразно – можно оценить величину деформации детали с применением наиболее эффективной СОЖ (при обработке стали 45 деформацию можно уменьшить до 2 раз, при Д16 – до 1,6 раза, при ВТЗ-1 и ХН77ТЮР – до 1,1 раза).

Однако, если с применением наиболее эффективной СОЖ деформация не будет соответствовать требованиям, то помимо выбора СОЖ следует также понижать режимы обработки (в первую очередь глубину резания, во вторую – подачу), при соблюдении рекомендуемой скорости резания, и использовать другие известные методы снижения сил резания или повышения жесткости технологической системы.

Выбирать эффективную марку СОЖ следует при условии, что соблюдаются рациональные режимы резания и что максимально возможное снижение силы резания приведет к приемлемой по требованиям величине упругой деформации детали в диаметральном направлении.

На основе проведенных исследований разработана методика, которая позволяет выбрать СОЖ без экспериментального определения сил резания и при экспериментально установленной жесткости критических участков детали. Эффективность действия СОЖ во многом определяется жесткостью конструкции детали. Исходные данные для определения зависимости коэффициента $K_{\text{СОЖ}}$ от коэффициентов $K_{\text{см}}$ и $K_{\text{охл}}$ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для построения поверхностей отклика функции $K_{\text{СОЖ}} = f(K_{\text{см}}, K_{\text{охл}})$

Марка СОЖ	Обрабатываемый материал								$K_{\text{охл}}$
	Сталь 45		Д16		ВТЗ-1		ХН77ТЮР		
	$K_{\text{СОЖ}}$	$K_{\text{см}}$	$K_{\text{СОЖ}}$	$K_{\text{см}}$	$K_{\text{СОЖ}}$	$K_{\text{см}}$	$K_{\text{СОЖ}}$	$K_{\text{см}}$	
1,5% в.р.к.с.	0,66	2,19	0,95	0,54	1,03	0,98	0,97	0,94	0,18
Blasocut 2000	0,80	0,44	0,86	0,13	0,97	1,25	1,08	0,88	0,20
Blasocut 4000	0,80	0,47	0,88	0,15	0,89	1,20	0,93	0,88	0,20
Isogrind-130EP	0,78	0,40	0,76	0,13	0,99	1,24	0,97	0,90	0,20
Смальта-3	0,64	0,44	0,81	0,18	0,92	1,27	1,04	0,90	0,21
Смальта-3*EP	0,71	0,41	0,70	0,14	0,97	1,27	1,05	0,89	0,19

Смальта-11	0,58	0,47	0,76	0,25	1,00	1,00	0,91	0,85	0,18
Addinol WN430	0,53	0,32	0,63	0,11	1,14	1,25	1,07	0,88	0,19
Росойл-500	0,56	0,30	0,63	0,10	1,18	1,25	0,98	0,90	0,21
Биосил С	0,62	0,43	1,12	0,55	1,00	1,10	0,98	0,94	0,18
Биосил М	0,76	0,49	0,68	0,13	1,13	1,11	0,99	0,96	0,19

С целью определения зависимости $K_{\text{сож}} = f(K_{\text{см}}; K_{\text{охл}})$ для всех испытанных материалов применялась программа STATISTICA v. 10.0, которая позволяет построить поверхность отклика в зависимости от двух переменных. Построенные в программе поверхности отклика представлены на рисунке 4.

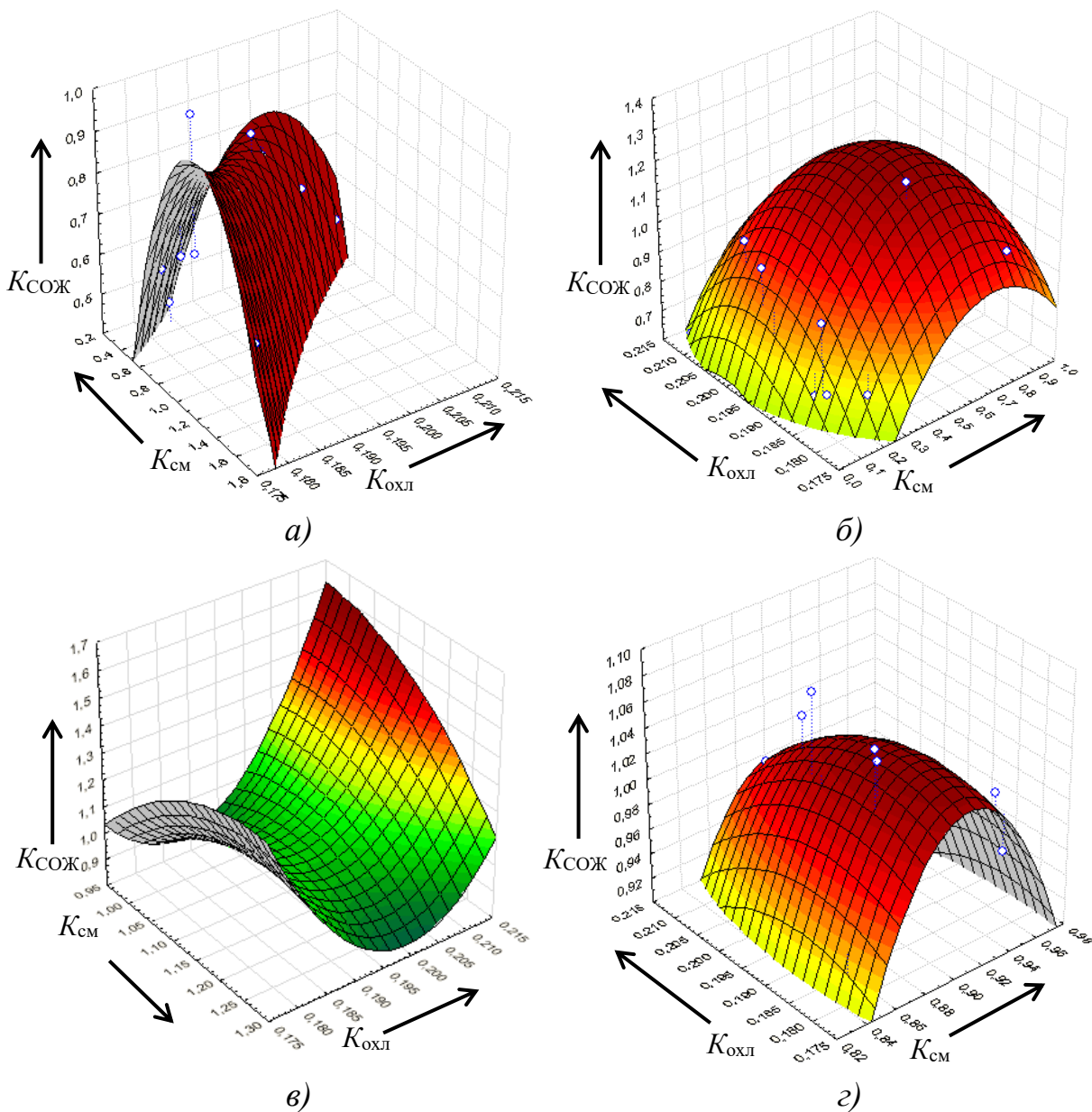


Рисунок 4 – Поверхности отклика функции $K_{\text{сож}} = f(K_{\text{см}}; K_{\text{охл}})$:
а – сталь 45; б – сплав Д16; в – сплав ВТЗ-1; з – сплав ХН77ТЮР

В результате расчетов установлены следующие зависимости $K_{\text{СОЖ}} = f(K_{\text{см}}, K_{\text{охл}})$:

1. Для стали 45:

$$K_{\text{СОЖ}} = -65,0929 + 20,7155 \cdot K_{\text{см}} + 630,9244 \cdot K_{\text{охл}} - 0,8755 \cdot K_{\text{см}}^2 - 102,5885 \cdot K_{\text{см}} \cdot K_{\text{охл}} - 1506,3499 \cdot K_{\text{охл}}^2; \quad (10)$$

2. Для алюминиевого сплава Д16:

$$K_{\text{СОЖ}} = -31,8491 + 5,2524 \cdot K_{\text{см}} + 323,3855 \cdot K_{\text{охл}} - 2,0387 \cdot K_{\text{см}}^2 - 14,3848 \cdot K_{\text{см}} \cdot K_{\text{охл}} - 806,3798 \cdot K_{\text{охл}}^2; \quad (11)$$

3. Для титанового сплава ВТ3-1:

$$K_{\text{СОЖ}} = 20,1119 + 21,4728 \cdot K_{\text{см}} - 322,1028 \cdot K_{\text{охл}} - 3,88 \cdot K_{\text{см}}^2 - 66,0574 \cdot K_{\text{см}} \cdot K_{\text{охл}} + 1024,3729 \cdot K_{\text{охл}}^2; \quad (12)$$

4. Для жаропрочного сплава ХН77ТЮР:

$$K_{\text{СОЖ}} = -21,558 + 50,9373 \cdot K_{\text{см}} - 7,2656 \cdot K_{\text{охл}} - 33,418 \cdot K_{\text{см}}^2 + 52,903 \cdot K_{\text{см}} \cdot K_{\text{охл}} - 106,2068 \cdot K_{\text{охл}}^2. \quad (13)$$

Результаты экспериментов соотносятся с результатами расчетов в пределах ошибки 10 %. Установленные зависимости обеспечивают прогнозирование величины снижения силы резания при применении СОЖ и выбор марки, максимально снижающей силы резания при токарной обработке с соблюдением рациональных режимов резания.

Разработанная методика выбора СОЖ состоит в расчете коэффициентов $K_{\text{см}}$ и $K_{\text{охл}}$, по которым рассчитывается $K_{\text{СОЖ}}$ для каждого состава СОЖ. Выбирать следует тот состав, который обеспечивает наименьшее значение $K_{\text{СОЖ}}$ в том случае, если применение СОЖ для данной детали целесообразно.

С целью облегчения процесса выбора СОЖ и сокращения затрат времени на расчеты на основе выведенных математических зависимостей была составлена и зарегистрирована компьютерная программа «Подбор СОЖ».

Представлены экспериментальные исследования по оценке влияния СОЖ на крутящий момент на шпинделе токарного обрабатывающего центра Mazak INTEGREX 300-IV на АО «Высокие технологии» (г. Омск) при обработке деталей из 4-х сплавов, применявшихся ранее в исследованиях. При испытаниях применялась СОЖ марки Castrol Hysol X. Обработка производилась при рациональных режимах. Сравнив результаты станочных испытаний и результаты расчетов по разработанной программе, установлено, что они расходились максимум от 9% для жаропрочного сплава до 24 % для Д16. Это связано с тем, что на показания, полученные с помощью датчика силы тока, влияет наличие холостого хода у шпинделя и мощность, затраченная на резание. Поэтому, чем меньше силы резания, тем больше вносимая погрешность. Тем не менее, общая тенденция изменения нагрузки на шпинделе соответствовала изменению силы резания.

Выполнен расчет экономической эффективности при применении исследованных составов СОЖ. Согласно расчетам, наибольшего снижения затрат (до 32%) на производство деталей из испытанных сплавов можно достигнуть при повышении скорости резания с сохранением силы резания при применении эффективной СОЖ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что область рациональных для эффективного применения СОЖ режимов резания, при которых существенно снижаются силы резания и деформации заготовки, находится в диапазоне действующих на производстве режимов обработки нежестких авиационных деталей.

2. Введен параметр для оценки действия СОЖ на силу резания – коэффициент $K_{\text{СОЖ}}$. Установлено, что наименьшее значение $K_{\text{СОЖ}}$, позволяет максимально возможно снизить деформации заготовки при обработке. Согласно выполненным расчетам, за счет применения эффективной марки СОЖ возможно снизить деформации заготовки при токарной обработке стали 45 в 2 раза, при обработке сплава Д16 – в 1,6 раза, при обработке сплава ВТЗ-1 – в 1,1 раза и при обработке сплава ХН77ТЮР – в 1,1 раза.

3. Выполнена экспериментальная количественная оценка смазочного и охлаждающего действий СОЖ в условиях, моделирующих условия в зоне резания при токарной обработке нежестких заготовок, что позволяет рассчитать снижение силы резания от применения СОЖ. В качестве параметра смазочного действия принят коэффициент трения f , в качестве параметра охлаждающего действия – максимальная скорость охлаждения $V_{\text{охл max}}$.

4. В качестве параметра оценки смазочного действия предложен коэффициент $K_{\text{см}}$, величина которого для испытанных СОЖ и обрабатываемых материалов рассчитана по результатам испытаний на машине трения. В качестве параметра оценки охлаждающего действия СОЖ предложен коэффициент $K_{\text{охл}}$, величина которого для испытанных марок СОЖ рассчитана по результатам испытаний на разработанной установке. Выбор данных параметров оценки СОЖ обоснован тем, что они отражают эффективность СОЖ по смазочному и охлаждающему действиям и влиянию на силы резания.

5. Установлено, что охлаждающее действие каждой марки СОЖ целесообразно определять экспериментально в условиях, моделирующих тепловые процессы в зоне резания. Разработана установка для экспериментальной оценки охлаждающего действия СОЖ по коэффициенту $K_{\text{охл}}$, численно равному отношению максимальной скорости охлаждения датчика температуры без применения СОЖ (на воздухе), к максимальной скорости охлаждения, полученной при охлаждении в испытываемой СОЖ.

6. Разработаны методика и программа расчета снижения сил резания при токарной обработке нежестких заготовок в реальных условиях закрепления детали за счет снижения величины силы резания. Программа была испытана в АО «Высокие Технологии» (г. Омск).

7. Результаты работы использованы при получении новых концентратов для создания СОЖ и для обоснования их выбора в ЗАО НПО «Промэкология». Выполнены расчеты затрат на производство деталей, изготовленных из испытанных материалов. Результаты расчетов показывают, что существенного снижения затрат на производство деталей, по сравнению с обработкой без СОЖ

(до 32 %), можно достигнуть за счет снижения времени обработки при сохранении силы резания с подачей эффективной СОЖ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на силы резания при токарной обработке титанового сплава ВТ3 / А. А. Ражковский, А. Г. Кисель, Д. С. Реченко, А. А. Федоров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – Омск. – 2013. – № 1 (117). – С. 101–104.
2. Влияние синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей на коэффициент трения / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, Д. С. Реченко, А. Ю. Попов // СТИН. – 2013. – № 9. – С. 29–30.
3. Повышение точности токарной обработки за счет применения смазочно-охлаждающих жидкостей / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, Д. С. Реченко, А. Ю. Попов // Технология машиностроения. – 2014. – № 2 (140). – С. 18–20.
4. Кисель, А. Г. Исследование коэффициентов теплоотдачи водных и масляных смазочно-охлаждающих жидкостей / А. Г. Кисель, Д. С. Реченко // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4. – С. 76–78.
5. Оценка охлаждающих свойств смазочно-охлаждающих жидкостей / А. Г. Кисель, Е. Д. Пуртов, А. В. Дейлова, Н. Н. Кочура // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – Омск. – 2017. – № 1 (151). – С. 27–29.

Публикации в других изданиях

6. Кисель, А. Г. Влияние СОЖ на силы резания при токарной обработке жаропрочной стали ХН77ТЮР / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, Д. С. Реченко // Наука и молодежь в XXI веке : материалы Регион. студенческой науч. конф. / ОмГТУ. – Омск, 2012. – С. 112–115.
7. Ражковский, А. А. Влияние СОЖ на силы резания при токарной обработке стали 45 / А. А. Ражковский, Д. С. Реченко, А. Г. Кисель // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» : в 2 т. / КемГУ. – Кемерово, 2012. – Т. 1. – С. 48–50.
8. Изменение коэффициента трения пары «сталь 45 – твердый сплав Т15К6» с применением различных смазочно-охлаждающих жидкостей / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, А. А. Федоров, Д. С. Реченко, А. Ю. Попов // Теоретические и методологические проблемы современных наук : материалы VI Междунар. науч.-практ. заоч. конф. / агентство «Сибпринт». – Новосибирск, 2012. – С. 86–88.
9. Кисель, А. Г. Влияние водоземulsionных и синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей на изменение коэффициента трения пары «Сталь 45 - твердый сплав Т15К6» / А. Г. Кисель // Альманах современной науки и образования. – 2013. – № 3 (70). – С. 72–73.
10. Кисель, А. Г. Влияние водоземulsionных и синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей на изменение коэффициента трения пары «жаропрочная сталь ХН77ТЮР – твердый сплав Т15К6» / А. Г. Кисель, Д. С. Реченко // Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 29–30 марта 2013 г. / РИЦ БашГУ. – Уфа, 2013. – Ч. 1. – С. 153–157.
11. Исследование охлаждающей способности водоземulsionных смазочно-охлаждающих жидкостей и их влияния на коэффициент трения при токарной обработке стали 45 / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, Ю. В. Шнуров // Перспективы развития научных исследований в 21 веке : сб. матер. 1-й Междунар. науч.-практ. конф., 31 января, 2013 г. / Издательство Перо. – М., 2013. – С. 75–79.
12. Исследование охлаждающей способности синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей и их влияния на коэффициент трения при токарной обработке стали 45 / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, Ю. В. Шнуров // Новый университет. – 2013. – № 1 (11). – С. 45–48.

13. Кисель, А. Г. Подбор водоземulsionных смазочно-охлаждающих жидкостей для токарной обработки титанового сплава ВТЗ на основе исследований смазочного и охлаждающего действия / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, Д. С. Реченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 4 (11). – Ч. 1. – С. 97–99.

14. Кисель, А. Г. Оценка технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при лезвийной обработке / А. Г. Кисель, Д. С. Реченко // Механики XXI века : сб. докл. XII Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / БрГУ. – Братск, 2013. – С. 160–161.

15. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на силы резания при токарной обработке алюминиевого сплава Д16 / А. Г. Кисель, Ю. В. Титов, Д. С. Реченко, В. Г. Гребень // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 3 кн. – Омск: ОмГТУ, 2013. – Кн. 1. – С. 46–48.

16. Кисель, А. Г. Подбор эффективной СОЖ для металлообработки / А. Г. Кисель // Механики XXI века : сб. докл. XIV Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием / БрГУ. – Братск, 2015. – С. 171–174.

17. Кисель А. Г. Исследование влияния СОЖ на точность токарной обработки / А. Г. Кисель, А. А. Ражковский, Р. У. Каменов // Инновационные методы исследований в технике и технологиях : сб. статей по итогам междунар. науч.-практ. конф. / АМИ. – Стерлитамак, 2017. – С. 29–35.

Патенты РФ и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

18. Пат. на полез. модель 130081 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Устройство для определения охлаждающей способности жидкой среды / Шнуров Ю. В., Кузнецов И. Г., Кисель А. Г., Реченко Д. С., Ражковский А. А., Попов А. Ю. – № 2013106103/28 ; заявл. 12.02.2013 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 5 с.

19. Пат. 2528294 Российская Федерация, МПК В 23 Q 11/10. Способ оценки эффективности смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), используемой при резании материала. / Кисель А. Г., Реченко Д. С., Ражковский А. А. – № 2012152579/02 ; заявл. 06.12.2012 ; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. – 6 с.

20. Пат. 2548938 Российская Федерация, МПК G 01 N 11/00. Способ оценки технологической эффективности смазочно-охлаждающей жидкости / Кисель А. Г., Реченко Д. С., Попов А. Ю., Ражковский А. А., Шнуров Ю. В. – № 2013143825/28 ; заявл. 27.09.2013 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 6 с.

21. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22349 ФГБНУ ИУО РАО, ОФЭРНиО. Подбор СОЖ / Кисель А. Г., Реченко Д. С. – № 50201650523 заявл. 15.12.2016 ; опубл. 07.12.2016.