

Малькова Людмила Дмитриевна



**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ
УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э.Баумана)

Научный руководитель: **Древаль Алексей Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Маслов Андрей Руффович**
доктор технических наук, профессор кафедры
высокоэффективных технологий обработки
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет «СТАНКИН»

Истоцкий Владислав Владимирович
кандидат технических наук,
директор по научно-техническому
развитию ООО НПП «РИТ-Инжиниринг»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техниче-
ском университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бау-
манская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7(499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью органи-
зации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по
указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Мос-
ковского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на
сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06,
доктор технических наук, доцент



В.П.Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Укрупненные статистические оценки потребляемой энергии показывают, что на осуществление силовых процессов, основой которых является механическая обработка, расходуется 11% от полезной энергии. Снижение энергозатрат на операциях обработки металлов резанием соответствует перечню мероприятий по повышению энергетической эффективности, определенных Федеральным законом Российской Федерации от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ.

Исследования в области энергосбережения представляют собой большой объем решений разрозненных задач с экономической, организационной, технологической и других позиций.

Контроль расходуемой энергии на предприятиях машиностроения осуществляется без детализации отдельных потребителей, что определяет необходимость научных исследований с последующим составлением и внедрением соответствующих методических рекомендаций в производство.

В существующей научно-технической документации и исследованиях ряда авторов силовые показатели процесса резания, определяющие его энергоемкость, рассматриваются укрупненно на основе эмпирических зависимостей. Энергоэффективность обработки резанием редко выделяется в качестве отдельного показателя, недостаточно учитывается совместное влияние параметров обработки на силовые характеристики, отсутствуют методы сравнения по энергетическим показателям различных способов обработки одинаковых поверхностей, не рассмотрено влияние разделения припуска между проходами на изменение суммарного энергопотребления и не учтен ряд других факторов.

Исследования указанных направлений как резерв для точного расчета, управления и сокращения энергозатрат при обработке резанием определяет актуальность работы.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение энергоэффективности механической обработки резанием на основе прогнозирования и управления энергоемкостью процесса лезвийной обработки.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- разработка методических рекомендаций, включающих математические модели, по определению зависимостей силовых параметров резания от параметров режима обработки с учетом их совместного влияния;
- проведение сравнительных исследований энергопотребления при различных способах обработки и выявление наиболее энергоэффективных;
- разработка методических рекомендаций по энергоэффективному распределению припуска при многопроходной обработке;
- разработка методических рекомендаций по прогнозированию энергопотребления при лезвийной обработке на основе единого показателя, применимого для разных операций лезвийной обработки;
- определение влияния рассеивания припуска и твердости заготовок на энергозатраты обработки резанием.

Научная новизна:

1. Обоснована и разработана система определения силовых характеристик

резания, позволяющая получать математические модели, учитывающие совместное влияние параметров обработки и обеспечивающие повышение точности расчетов энергопотребления.

2. Обоснован критерий удельного энергопотребления, учитывающий затраты энергии на образование единицы площади поверхности резания. Использование критерия позволяет прогнозировать затраты энергии при обработке заданной поверхности лезвийным инструментом для основных операций резания.

Практическая значимость:

1. Разработаны методические рекомендации по определению силовых характеристик процесса резания, которые позволяют прогнозировать энергопотребление с учетом совместного влияния параметров обработки. Система включает схему декодирования полиномов, что позволяет варьировать параметрами обработки для обеспечения энергосбережения при резании.

2. Разработаны методические рекомендации, основанные на использовании критерия удельного энергопотребления, приведенного к площади поверхности резания, позволяющие прогнозировать энергозатраты при обработке поверхности. Сформирован математический аппарат для расчета энергопотребления при использовании основных видов лезвийной обработки.

3. Разработаны методические рекомендации по разделению припуска при многопроходной токарной и сверлильной обработке, обеспечивающие сокращение энергопотребления.

4. Разработаны и обоснованы рекомендации по назначению допустимых диапазонов рассеивания припуска и твердости заготовок, обеспечивающие сокращение энергопотребления обработки резанием.

Результаты работы использованы в подразделениях компаний ООО ПО Инновационные Технологии Механообработки (ООО ПО «ИННОТЕХМЕТ»), ООО «Проинтех» и учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актами использования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методические рекомендации по определению силовых характеристик процессов лезвийной обработки с учетом совместного влияния параметров обработки с использованием полиномиальных моделей, полученных и декодированных на основе полных и дробных факторных экспериментов.

2. Методические рекомендации по получению и использованию критерия удельного энергопотребления, приведенного к площади поверхности резания, для прогнозирования затрат энергии при обработке поверхности лезвийным инструментом.

3. Результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов энергопотребления при разделении припуска при многопроходной обработке точением и сверлением.

4. Результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов энергопотребления при учете рассеивания твердости заготовок и припуска на обработку.

Методы исследования и достоверность. Для решения поставленных задач в

работе использовались теоретические и экспериментальные исследования. Используются основные положения теории резания, технологии машиностроения, методов планирования эксперимента, математического и статистического анализа.

Экспериментальные исследования проводились на основе разработанных и проверенных методик с использованием комплекса современного измерительного оборудования в лаборатории кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана. В процессе экспериментов использовались современные средства сбора и обработки данных. Измерение и регистрация данных по величине составляющих силы резания и крутящего момента проводились с использованием разработанных исследовательских стендов, оснащенных динамометрической установкой компании *Kistler* и динамометром УДМ600.

Апробация работы. Результаты работы были представлены и обсуждались на следующих мероприятиях:

- Международная конференция «Образование через науку», посвященная 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2005;

- XVIII научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. Королев (МО): РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2008;

- Всероссийская научно-технической конференция «Машиностроительные технологии», посвященная 140-летию Научно-Учебного Комплекса «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2008;

- Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2010;

- Производительность и надежность технологических систем в машиностроении: Международная научно-техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, д-ра техн. наук, профессора Л.И. Волчкевича. Москва, 2015.

Публикации. Материалы диссертации отражены в 17 научных трудах, из них 7 статей опубликовано в рекомендованных ВАК РФ рецензируемых журналах. Общий объем статей в журналах Перечня ВАК - 5,33 п.л.

Структура диссертации. Диссертация включает введение, основную часть из 6 глав, основные выводы, список литературы из 120 наименований. Диссертация изложена на 200 страницах, содержит 40 таблиц, 52 рисунка и 19 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность представленных результатов, приведены мероприятия, где они обсуждались.

В первой главе дан анализ состояния вопроса на текущий момент. Сила резания отражает и является обобщенным показателем процессов, происходящих в зоне резания, и определяет уровень мощности, необходимой для стружкообразования, и, как следствие, энергозатраты на резание. Это определяет большое количество исследований силовых зависимостей. Значительный вклад в исследование силовых закономерностей при резании металлов внесли отечественные ученые, осно-

ватели научных школ и направлений: И.М.Беспрозванный, Н.Н.Зорев, Г.И.Грановский, А.М.Розенберг, С.С.Силин, А.С.Проников, В.Э.Пуш и др. В настоящее время исследование силовых показателей резания с позиции их влияния на динамические характеристики оборудования, диагностирования процессов обработки, энергопотребления при резании и других показателей продолжают В.Ф.Безъязычный, В.К.Старков, О.А.Горленко, В.М.Малашенко, Н.А.Малашенко, А.В.Карпов, Л.Н.Касимов, В.М.Утенков и др.

В настоящей работе объектом деятельности по энергосбережению является технологический процесс механической обработки резанием. Понятие «энергоёмкость» трактуется как величина энергии, затраченной непосредственно на процесс резания при изготовлении продукции способами механической обработки.

Показано, что сокращение энергопотребления в механообработке без изменения параметров качества готового изделия – задача многоплановая, и наиболее эффективно может быть решена с помощью комплекса мер, включающих конструкторские, технологические, экономические и организационные мероприятия. Снижение энергоёмкости изделия при механической обработке резанием рассматривается в рамках технико-технологического подхода. Выделены обобщенно-рамочные исследования и оптимизирующие эксплуатацию металлорежущего оборудования и непосредственно резание.

Работы, направленные на оптимизацию эксплуатации металлорежущего оборудования с позиции энергопотребления, включают исследование и использование различных технико-эксплуатационных характеристик станков. Несмотря на получаемое сокращение энергопотребления (15...20%), все рассмотренные результаты ориентированы на конкретное эксплуатируемое оборудование, что исключает возможность распространения исследований.

При оптимизации механической обработки резанием широко используется показатель удельной энергоёмкости, определенной как отношение энергии, затраченной на снятие материала, к объему этого материала. Несмотря на внешнюю простоту удельной энергоёмкости, все авторы единодушно указывают, что ее величина непостоянна и зависит не только от сочетания инструментальный материал – обрабатываемый материал, но и от способа и параметров обработки. Изменение величины удельной энергоёмкости в зависимости от режимов обработки могут превышать десятки раз. Это является серьезным недостатком и значительно усложняет ее практическое использование в задачах формирования энергосберегающих технологий.

Сила резания отражает и является обобщенным показателем происходящих физических процессов в зоне резания, непосредственно действует на все элементы технологической системы и оказывает значительное влияние на результирующее энергопотребление. Анализ существующих моделей определения силы резания выявил теоретический и экспериментальный подходы. Исследования основоположников теории резания и их последователей отражены в фундаментальных работах и имеют большое значение для развития науки. При всех очевидных достоинствах теоретического подхода, его недостатком является необходимость использования величин, которые крайне сложно оценить на практике, такие как касательное

напряжение в плоскости сдвига, усадка стружки, величина относительного сдвига, угол действия и т.д. Кроме того, в теоретических зависимостях сила резания часто рассматривается как сила стружкообразования, что не позволяет учесть состояние инструмента, в частности, величину износа по задней поверхности.

По этим причинам широко распространено использование эмпирических зависимостей силы резания на основе экспериментальных исследований. В этом случае исходными данными для расчета составляющих силы резания являются величины удобные для оценки на практике, такие как параметры режима резания, геометрические параметры инструмента, характеристики материалов инструмента и заготовки и т.д. В основном такие формулы представляют собой совокупность частных степенных зависимостей и поправочных коэффициентов. Они обеспечивают достоверность результатов в узком диапазоне варьируемых параметров, т.к. предполагается независимость влияния одного фактора от уровня других. В работах Н.Н.Зорева установлено, что априорное положение о независимости влияния факторов обработки приводит к большим ошибкам, что подтверждено результатами целого ряда однофакторных экспериментов, проведенных при различных условиях. Например, совместное влияние подачи и скорости резания на горизонтальную проекцию P_{xy} силы резания при продольном точении стали 35Х3МН может привести к погрешности результата до 250%. Г.И.Грановский указывал, что для расширения диапазона достоверности результатов следует использовать показательно-степенные функции, ряды и полиномы. Проверочный расчет по различным источникам дал расхождение значений главной составляющей силы резания P_z до 44%, крутящего момента $M_{кр}$ – 69%, других составляющих – до 94%.

Наиболее качественно и с требуемой степенью точности описывает экспериментальные данные и позволяет учесть совместное влияние факторов обработки на результирующую функцию полиномиальная модель, однако «ручная» обработка экспериментальных данных на основе полиномиальных моделей приводит к значительным погрешностям и трудностям в анализе результатов. Вследствие этого использование указанных моделей для описания технологических процессов применялось ограничено. В настоящее время применение полиномиальных моделей с учетом современного математического аппарата и программных продуктов с целью прогнозирования энергопотребления при обработке резанием является доступным и рациональным. Это определяет разработку методических подходов по проведению экспериментальных исследований, позволяющих одновременно оценивать влияние большого количества факторов и их взаимодействия. Выявлено, что эффективно использовать полный и дробный факторные планы, а результирующая модель должна быть декодирована, что практически отсутствует в научной литературе.

Также анализ нормативно-технической документации, справочной и научной литературы позволил:

- выявить параметры обработки, оказывающие влияние на силовые характеристики процессов резания для формирования факторных планов;
- установить, что являются ориентировочными или отсутствуют рекомендации по разделению припуска при многопроходной обработке, что не позволяет

прогнозировать суммарное энергопотребление на технологической операции;

- выявить, что в зависимости от технологических условий некоторые из параметров обработки имеют рассеивание, влияние которого на энергопотребление в количественных характеристиках не отражено и требует оценки необходимости их учета при проектировании энергосберегающих технологических операций.

В результате выполненного анализа научных исследований и в соответствии с целью диссертации сформулированы задачи работы.

Во второй главе изложены общие и частные методики проведения исследований, основные методы и средства проведения экспериментальных исследований, обработки и анализа экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для получения ряда исходных данных использованы результаты анализа технологических производственных процессов АМО ЗИЛ.

В соответствии с видами исследований разработаны исследовательские динамометрические стенды, состоящие из металлорежущего оборудования и блоков контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенные для регистрации составляющих P_x , P_y , P_z силы резания и крутящего момента $M_{кр}$. Эксперименты проводились на токарно-винторезных станках моделей 1К62 и 16К20, вертикально-сверлильном станке модели 2Н135, вертикально-фрезерном станке модели 6Р12, поперечно-строгальном станке модели 7Б35. Проверка станков на соответствие нормам точности и жесткости показала соответствие техническим требованиям. В исследовательских стендах использовались: динамометры УДМ 600 и *Kistler 9257В*; усилители тензометрические четырехканальный УТ4-1 и восьмиканальный 8АНЧ-21; плата АЦП модели LA70М4 и блок АЦП 5697 *Kistler*; усилитель преобразователь 5070А *Kistler*. Для определения мощности, потребляемой электродвигателем станка, использовался комплект измерительный К505.

Тарирование динамометрической системы с платой АЦП модели LA70М4 в зависимости от величины нагрузки выполнялась с помощью образцового динамометра типа ДС. Контрольно-измерительный блок для регистрации показаний на базе динамометра *Kistler 9257В* сертифицирован производителем и использовались паспортные тарировочные зависимости измеряемых величин.

Представлены методы обработки экспериментальных данных для статистических оценок и получения математических моделей.

Лабораторные экспериментальные исследования проведены с использованием стали 45 ГОСТ 1050-2013 твердостью 200 НВ. Использовались стандартизованные токарные проходные резцы, метчики машинные, сверла спиральные, фрезы шпоночные. Проведен контроль на их соответствие техническим требованиям ГОСТ. Образцы изношенных на разные величины резцов по задней поверхности получены моделированием изнашивания резца о поверхность экспериментальной заготовки. Образцы сверл, изношенных на разные величины, получены в результате производственного использования АМО ЗИЛ. Измерения твердости заготовок проводились по методу Бринелля ГОСТ 9012-59 приборами ТШП2, ТБ и Польди.

Параметры режимов резания во всех экспериментальных исследованиях

назначались в соответствии с рекомендациями справочной литературы.

Представлены методики полного факторного планирования и обработки результатов для трех, четырех и пяти факторов, а также дробного факторного планирования для шести факторов.

В третьей главе предлагается и реализуется принципиальная модульная система определения силовых характеристик механической обработки на примере точения, сверления и нарезания резьбы метчиками на основе факторных экспериментов. Результирующие зависимости представляют собой декодированные полиномы, что обеспечивает учет совместного влияния факторов, высокую степень точности и возможность прогнозирования энергопотребления.

Для составления плана факторных экспериментов на двух уровнях варьирования при точении выявлены диапазоны параметров обработки: глубины резания t , подачи на оборот S_0 , скорости резания v , износа по задней поверхности h_3 , переднего угла γ и твердости НВ - в которых зависимость главной составляющей P_z силы резания линейризуется с коэффициентом корреляции не менее 0,9.

Для минимизации в смешанных оценках совмещения линейных эффектов и эффектов взаимодействия при составлении плана дробного факторного эксперимента для определения главной составляющей P_z силы резания при точении ($1/4$ -реплики 2^{6-2}), предварительно проведены десять серий полных факторных экспериментов с тремя факторами и проанализированы их результаты для выявления незначимых эффектов взаимодействия. Установлено, что парные взаимодействия $S_0 \cdot h_3$, $S_0 \cdot \gamma$ и $v \cdot \gamma$ незначимы и могут быть включены в смешанные оценки введенных линейных эффектов.

В соответствии с планом и исходными данными (Таблица 1) проведен дробный факторный эксперимент $1/4$ -реплики 2^{6-2} , на основании которого определены коэффициенты регрессии в уравнении зависимости P_z , Н (обозначено у):

$$y = 536,7 + 271,7 x_1 - 3,2 x_2 + 318,6 x_3 + 25,9 x_4 - 43,8 x_5 - 22,4 x_6 - 25,3 x_1 x_2 + 170,8 x_1 x_3 + 18,3 x_1 x_4 - 11,7 x_2 x_3 - 0,9 x_2 x_4 + 29,6 x_3 x_4 - 15,2 x_1 x_2 x_3 - 16,9 x_1 x_2 x_4 + 16,1 x_1 x_3 x_4 \quad (1)$$

Таблица 1.

Исходные данные для шестифакторного эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (-1)	верхний (+1)	основной	
S_0 , мм/об	x_1	0,097	0,39	0,2435	0,1465
v , м/мин	x_2	50	155	102,5	52,5
t , мм	x_3	0,5	2	1,25	0,75
НВ	x_4	200	250	225	25
γ , град	x_5	0	15	7,5	7,5
h_3 , мм	x_6	0,16	0,8	0,48	0,32

Значимые эффекты двойного и тройного взаимодействия подтверждают наличие совместного влияния факторов обработки на значение главной составляющей силы резания и необходимость его учета при прогнозировании результатов.

На основании того, что все коэффициенты представляют собой смешанные оценки, а совместное влияние большего количества факторов в общем случае ме-

нее значимо, чем совместное влияние меньшего количества факторов, рассмотрены различные варианты декодирования полученного полинома.

Выполнена качественная оценка декодированных полиномов на основании экспериментальных измерений составляющих силы резания в точках факторного пространства, но не входящих в план. Установлено, что расчетные значения, полученные по декодированным полиномам, в точках факторного плана совпадают, а в случайных точках факторного пространства имеют различное отклонение от экспериментальных значений, которое колеблется в диапазоне от 16% до 45%. Это указывает на необходимость дополнительного анализа полиномов, полученных на основе дробного факторного эксперимента.

Математическая обработка полиномов показала, что они не имеют точек экстремума в области технологически допустимых значений факторов. Вариант декодированной полиномиальной зависимости главной составляющей P_z силы резания при тчении имеет следующий вид:

$$P_z = -234,42 + 429,83 \cdot S_0 - 0,47 \cdot v + 354,09 \cdot t + 1,60 \cdot \text{HB} - 250,67 \cdot h_3 - 2,08 \cdot \gamma + \\ + 508,50 \cdot S_0 \cdot t - 2,30 \cdot S_0 \cdot \text{HB} + 0,34 \cdot v \cdot t - 1,42 \cdot t \cdot \text{HB} + 1,76 \cdot v \cdot h_3 - 3,01 \cdot t \cdot \gamma - \\ - 2,63 \cdot S_0 \cdot v \cdot t + 5,85 \cdot S_0 \cdot t \cdot \text{HB} \quad (2)$$

Для повышения точности результатов проведен анализ и исключение факторов обработки, которые могут быть приняты неварьируемыми в пределах технологической операции. В результате спланирован и проведен полный факторный эксперимент с четырьмя факторами на двух уровнях (Таблица 2) и замеры в промежуточных точках факторного пространства (Таблица 3).

Таблица 2.

Исходные данные для четырехфакторного эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (-1)	верхний (+1)	основной	
t , мм	x_1	1	5	3	2
S_0 , мм/об	x_2	0,1	0,5	0,3	0,2
v , м/мин	x_3	86	138	112	26
h_3 , мм	x_4	0	0,17	0,085	0,085

Таблица 3.

Результаты замеров в случайных точках факторного пространства

№	t , мм	S_0 , мм/об	v , м/мин	h_3 , мм	$P_{z \text{ сред}}$, Н	$P_{z \text{ расч}}$, Н	Погрешность, %
1	3	0,2	108	0	664,7	679,7	2,26
2	2	0,3	108	0	607,7	619,6	1,96

После математической обработки декодированная полиномиальная зависимость главной составляющей P_z силы резания при тчении в указанных ранее условиях выглядит следующим образом:

$$P_z = 133,76 + 55,32 \cdot t - 16,49 \cdot S_0 - 1,02 \cdot v - 1066,53 \cdot h_3 + 797,38 \cdot t \cdot S_0 + \\ + 389,64 \cdot t \cdot h_3 + 812,98 \cdot S_0 \cdot h_3 + 6,53 \cdot v \cdot h_3 - 905,14 \cdot t \cdot S_0 \cdot h_3 \quad (3)$$

Результаты расчета главной составляющей P_z силы резания по формуле (3) и экспериментальные замеры (Таблица 3) отличаются примерно на 2%. Это показывает, что полиномиальные модели силы резания, полученные на основании полно-

го факторного эксперимента на двух уровнях в области технологически допустимых или рекомендованных значений параметров обработки (факторов) учитывают совместное влияние факторов и обеспечивают точность расчетов в области факторного пространства.

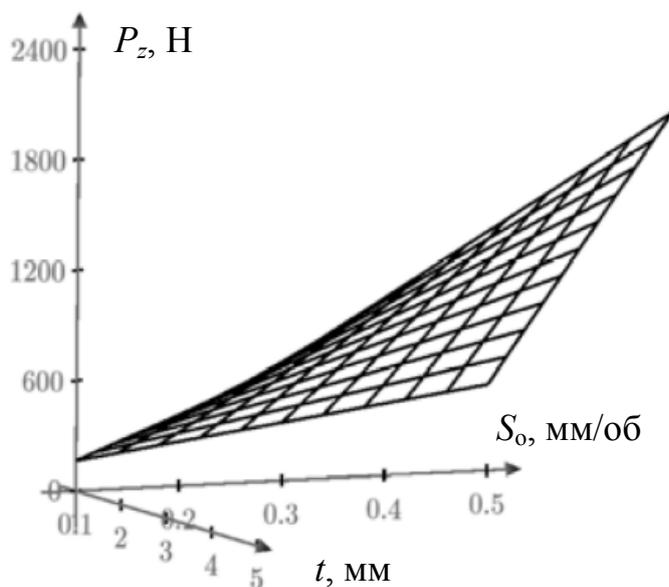


Рисунок 1. Зависимость главной составляющей силы резания P_z от подачи S_0 и глубины резания t ($v = 138$ м/мин, $h_3 = 0,17$ мм)

Наличие совместного влияния факторов представлено на Рисунке 1 в виде частной зависимости P_z от факторов S_0 и t и показывает изменение характера влияния одного из факторов на результирующее значение функции при изменении уровня другого. При изменении глубины резания t в диапазоне от 1 до 5 мм главная составляющая силы резания P_z возрастает в 5,56 раза при подаче 0,1 мм/об и в 4,78 раза при подаче 0,5 мм/об (по экспериментальным данным в 5,54 и 4,99 раз соответственно).

Аналогичные исследования проведены для определения силовых характеристик при сверлении (4) и нарезании резьбы М18 и М18×1 метчиком (5).

$$M_{кр} = -27,03 + 1,55 \cdot d + 46,05 \cdot S_0 + 0,52 \cdot v + 0,04 \cdot HB + 84,86 \cdot h_3 + 1,30 \cdot d \cdot S_0 - 0,03 \cdot d \cdot v - 3,13 \cdot d \cdot h_3 - 2,49 \cdot S_0 \cdot v - 549,81 \cdot S_0 \cdot h_3 - 0,18 \cdot HB \cdot h_3 + 46,92 \cdot d \cdot S_0 \cdot h_3 \quad (4)$$

$$M_{кр} = -93,25 + 3,15 \cdot v + 980,6 \cdot a_z + 64,69 \cdot P - 38,13 \cdot v \cdot a_z - 2,00 \cdot v \cdot P - 560,34 \cdot a_z \cdot P + 21,79 \cdot v \cdot a_z \cdot P, \quad (5)$$

где d - диаметр сверла, мм; P - шаг резьбы, мм; a_z - толщина срезаемого слоя, мм.

Значащие эффекты двойного и тройного взаимодействия аналогично точению подтверждают наличие совместного влияния факторов обработки на силовые характеристики резания и необходимость его учета при анализе операций сверления и нарезания резьбы метчиками.

В четвертой главе решены задачи сравнительной оценки энергопотребления при многопроходном точении и обработке отверстий, а также при обработке плоскостей различными способами на основе экспериментальных исследований и аналитических расчетов с использованием методик, представленных в главе 3 и справочной литературе.

Для оценки изменений суммарного энергопотребления при наружном продольном точении при варьировании глубинами резания в два прохода подготовлены и проведены экспериментальные исследования. На динамометрическом стенде проведены замеры составляющих силы резания при наружном продольном точении прутка диаметром $D = 85,8$ мм из стали 45 твердостью 200 НВ сборным резцом с СМП квадратной формы с отверстием ГОСТ 19051-80 (SNMM 15 04 12) из твердого сплава Т15К6. Износ инструмента по задней поверхности h_3 составлял 0,09 мм. Об-

щий припуск на обработку назначен 4 мм и разделен в различных соотношениях на черновой и чистовой проходы. Проведены эксперименты с разными сочетаниями подач на черновой и чистовой обработках. Выявлены тенденции изменения суммарного энергопотребления при изменении припуска на чистовой проход.

Сравнительная оценка суммарных энергозатрат $E_{\text{сум}}$ в широком диапазоне варьирования факторов обработки поверхности выполнена для длины $L = 100$ мм по формуле (3) эксперимента (Таблица 2):

$$\begin{aligned}
 E_{\text{сум}} &= E_{\text{чер}} + E_{\text{чист}} = (P_{z \text{ чер}} \cdot v_{\text{чер}} \cdot t_{o \text{ чер}} + P_{z \text{ чист}} \cdot v_{\text{чист}} \cdot t_{o \text{ чист}}) = \\
 &= (133,76 + 55,32 \cdot t_{\text{чер}} - 16,49 \cdot S_{o \text{ чер}} - 1,02 \cdot v_{\text{чер}} - 1066,53 \cdot h_3 + 797,38 \cdot t_{\text{чер}} \cdot S_{o \text{ чер}} + \\
 &\quad + 389,64 \cdot t_{\text{чер}} \cdot h_3 + 812,98 \cdot S_{o \text{ чер}} \cdot h_3 + 6,53 \cdot v_{\text{чер}} \cdot h_3 - 905,14 \cdot t_{\text{чер}} \cdot S_{o \text{ чер}} \cdot h_3) \times \\
 &\quad \times (L \cdot D \cdot \pi / S_{o \text{ чер}} / 1000) + (133,76 + 55,32 \cdot t_{\text{чист}} - 16,49 \cdot S_{o \text{ чист}} - 1,02 \cdot v_{\text{чист}} - \\
 &\quad - 1066,53 \cdot h_3 + 797,38 \cdot t_{\text{чист}} \cdot S_{o \text{ чист}} + 389,64 \cdot t_{\text{чист}} \cdot h_3 + 812,98 \cdot S_{o \text{ чист}} \cdot h_3 + \\
 &\quad + 6,53 \cdot v_{\text{чист}} \cdot h_3 - 905,14 \cdot t_{\text{чист}} \cdot S_{o \text{ чист}} \cdot h_3) \cdot (L \cdot (D - 2 \cdot t_{\text{чер}}) \cdot \pi / S_{o \text{ чист}} / 1000)
 \end{aligned} \tag{6}$$

Индексы «чер» и «чист» указывают на черновой и чистовой проходы.

Установлено, что при $S_{o \text{ чер}} > S_{o \text{ чист}}$ суммарное энергопотребление уменьшается с увеличением припуска на черновую обработку, а при $S_{o \text{ чер}} \leq S_{o \text{ чист}}$ увеличивает. Изменения происходят при $S_{o \text{ чист}} \approx 0,95 \cdot S_{o \text{ чер}}$, что свидетельствует об изменении вкладов чистового и чернового проходов в суммарное энергопотребление.

Математический анализ функции (6) показал отсутствие экстремумов в области проведения эксперимента. Минимальное и максимальное значения функции (6) определены в узловых точках указанной области. Максимальная относительная разница потребляемой энергии при точении в два прохода в рассмотренной технологической области составляет 94,9 %.

Аналогичные исследования проведены для оценки изменений суммарного энергопотребления при обработке отверстий в два прохода - сверлении и рассверливании. Проведены полные факторные эксперименты для получения декодированных моделей силовых характеристик. Обрабатываемый материал - сталь 45 твердостью 201 НВ, инструмент - сверла по ГОСТ 10903-77 с режущей частью из быстрорежущей стали Р6М5 $\varnothing 12$, $\varnothing 24$ (сверление) и $\varnothing 29,8$ (рассверливание). Максимальная относительная разница потребляемой энергии при выполнении отверстия сверлением и рассверливанием в рассмотренной технологической области составляет 123,7%. Математическая модель позволяет определить сочетания диаметров сверл и подач, обеспечивающих минимальное энергопотребление.

Для прогнозирования энергопотребления при различных способах обработки плоской поверхности проведены экспериментальные исследования торцового и цилиндрического фрезерования в одинаковых условиях и строгания в близких условиях и аналитический расчет энергопотребления при протягивании.

При реализации указанных способов фрезерования двузубой фрезой обеспечено срезание одинакового объема материала за один рез инструмента. Опыты проведены с использованием динамометрического стенда двузубой фрезой $\varnothing 32$ мм по ГОСТ 9140-2015 ($\alpha = 9^\circ$, $\gamma = 4^\circ$, $\omega = 10^\circ$) на специально выполненной заготовке из стали 45 твердостью 200 НВ по ГОСТ 1050-2013 со следующими параметрами режимов резания: частота вращения шпинделя $n = 250$ об/мин, скорость реза-

ния $v = 25$ м/мин, подача на зуб $S_z = 0,05; 0,062; 0,08; 0,1$ мм/зуб, глубина резания $t = 1$ мм, ширина фрезерования $B = 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24; 27$ мм. Среднее значение энергопотребления при одном резе для всех параметров обработки определялось примерно по 170 текущим значениям.

Установлено, что для снятия одного и того же объема материала при торцовом фрезеровании требуется значительно меньше энергии, чем при цилиндрическом (увеличение составляет от 57% до 239%).

Анализ моделей срезаемого слоя показал, что процент тонких стружек и площадь их поверхности при цилиндрическом фрезеровании выше, чем при торцовом. Выдвинута гипотеза о связи между энергопотреблением и площадью поверхности, образуемой режущей кромкой в результирующем движении резания (поверхности резания) и использования последней в качестве показателя при прогнозировании энергозатрат, что подтверждено результатами сравнительных испытаний двух способов фрезерования.

Для выявления возможности распространения полученных результатов на другие способы обработки и их обобщение выполнены экспериментальные исследования энергопотребления при строгании и аналитический расчет энергопотребления для операции наружного протягивания в условиях, сопоставимых с фрезерованием. Опыты по строганию проведены с использованием динамометрического стенда строгальными резцами из быстрорежущей стали по ГОСТ 18887-73 ($\alpha = 9^\circ$, $\gamma = 4^\circ$) с главными углами в плане $\varphi = 15^\circ$ и 45° и вспомогательными углами в плане $\varphi' = 32^\circ$ и 15° соответственно на специально выполненной заготовке из стали 45 твердостью 200 НВ по ГОСТ 1050-2013 со следующими параметрами режимов резания: скорость резания $v = 24,8$ м/мин, подача на двойной ход $S_{дв.х} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ мм/дв.х, глубина резания $t = 1$ мм. Аналитический расчет энергопотребления на операции наружного протягивания выполнен для протяжки из быстрорежущей стали Р6М5 и заготовки из стали 45 твердостью 200 НВ.

Проведенный регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований и аналитических расчетов зависимости энергопотребления E при торцовом и цилиндрическом фрезеровании, строгании и протягивании поверхности длиной $L = 100$ мм и шириной B от 6 до 27 мм при различных подачах на зуб S_z (на дв.х $S_{дв.х}$) от площади поверхности резания $S_{пов}$ подтвердил взаимосвязь между энергопотреблением с площадью поверхности резания с коэффициентом корреляции более 0,9. Получено уравнение регрессии:

$$E = 39,45 \cdot S_{пов}^{0,493} \quad (7)$$

Наличие устойчивой зависимости позволило перейти к понятию удельного энергопотребления e [Дж/мм²]:

$$e = E/S_{пов} \quad (8)$$

равного отношению требуемого энергопотребления E [Дж] к площади поверхности резания $S_{пов}$ [мм²], и исследовать тенденции ее изменения. Использование указанного удельного энергопотребления позволяет исключить из расчетов геометрические размеры обрабатываемой поверхности и добавить в анализ другие способы обработки.

Проведен анализ структуры поверхности резания при всех рассмотренных способах обработки, проиллюстрированный на примере строгания (Рисунок 2). Выявлено, что поверхность резания, сформированная вспомогательной режущей кромкой, полностью сохраняется на обработанной поверхности изделия, а сформированная главной режущей кромкой частично сохраняется, образуя рельеф обработанной поверхности, а частично удаляется «следующим» резом. Таким образом, поверхность резания условно можно разделить на две составляющие: удаляемую и формообразующую. Проведенные расчеты показали, что процентное соотношение указанных составляющих зависит от способа обработки и параметров режимов резания. В частности выявлено, что для параметров обработки, представленных в экспериментах и расчетах, при цилиндрическом фрезеровании доля удаляемой части поверхности резания составляет 98...99%, при торцовом фрезеровании 93...96%, при строгании 50...95%, при протягивании 80...95%. Приведенные результаты и удельное энергопотребление e не зависят от размеров обрабатываемой поверхности и способа обработки.

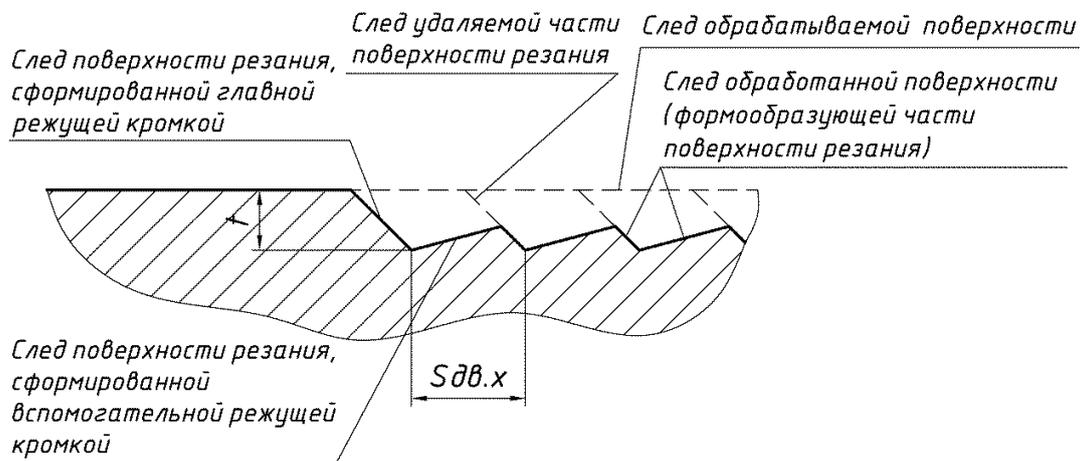


Рисунок 2. Структура поверхности резания на примере строгания

Результаты расчета удельного энергопотребления e , Дж/мм², и доли удаляемой площади поверхности резания η , %, для различных способов обработки заготовок из стали 45 инструментами из быстрорежущей стали Р6М5 приведены на Рисунок 3.

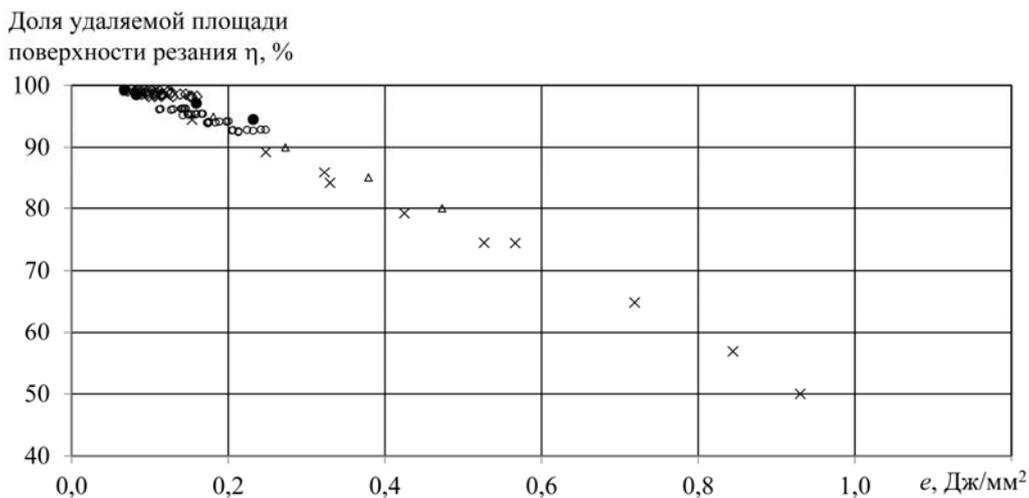


Рисунок 3. Зависимость доли удаляемой площади поверхности резания η , % от удельного энергопотребления e , Дж/мм²: ○ – торцовое фрезерование; ◇ – цилиндрическое фрезерование; × – строгание; △ – протягивание; ● – сверление

Результатом аппроксимации стало уравнение зависимости (коэффициент корреляции превысил 0,99):

$$\eta = 104,62 - 56,08 \cdot e \quad (9)$$

На основании анализа полученных результатов установлено, что величина площади поверхности резания, определяемая геометрически, может служить устойчивым критерием оценки энергопотребления вне зависимости от способа обработки посредством определения удельного энергопотребления для заданного сочетания инструментального и обрабатываемого материалов.

В пятой главе представлены результаты оценки влияния на энергопотребление рассеивания припуска и твердости обрабатываемых заготовок. Исследовано в условиях массового производства рассеивание припуска на поковках детали «винт рулевого управления», изготавливаемой из стали 60ПП на АМО ЗИЛ. Выявлено, что при обработке поковок глубина резания t имеет рассеивание, подчиняющееся нормальному закону распределения. Измерения проводились на 20 поковках (число замеров $n = 600$). Установлено, что 77% контролируемых точек лежат в пределах расчетного диапазона величины припуска, остальные превышают его.

Расчет энергопотребления для сравнительного анализа при переменной глубине резания проведен на основе заводских режимов по трем условиям: обработка полного объема замеренных поковок; обработка поковок, чьи припуски входят в рекомендуемый расчетный диапазон; обработка поковок с минимально допустимым значением припуска. Установлено, что исключение значений припусков, превышающих рекомендуемый расчетный диапазон, позволяет уменьшить энергопотребление на 6%, а при минимально допустимой величине припуска затраты энергии могут быть сокращены до 80%.

Экспериментальные исследования рассеивания значений твердости выполнены на основании измерений трех видов деталей, изготавливаемых на АМО ЗИЛ из стали 45 с требуемыми по чертежу диапазонами твердости: ступица шкива вентилятора (167...190 НВ), вилка скользящая кардана (200...245 НВ) и фланец вторичного вала коробки передач (200...245 НВ). Величина выборки по каждой детали составляла $n = 100$ штук. Установлено, что распределения твердости подчиняются нормальному закону.

Установлено, что у фланца вторичного вала коробки передач в требуемый диапазон вошло 93% всех деталей, у ступицы шкива вентилятора – 82%, а у вилки скользящей кардана 46%. Статистический анализ проведен как для полной выборки, так и для выборки, в которую вошли поковки, чья твердость входит в допустимый диапазон значений, указанных на чертеже.

Для сравнительной оценки энергозатрат произведены расчеты для обработки наружных цилиндрических поверхностей рассматриваемых деталей. В условиях расчета приняты параметры режима обработки предприятия. Установлено, что в рамках рекомендуемого диапазона твердости разница в потребляемой энергии достигает 16%. А изменение энергозатрат при обработке деталей с минимальным и максимальным реально замеренными значениями твердости достигает 47%.

Полученные результаты по оценке диапазона изменения энергопотребления при наличии рассеивания припуска и твердости заготовок указывают на необходи-

мость учета этого технологического факта при проектировании энергосберегающих технологических процессов.

В шестой главе на основании проведенных исследований сформирован ряд методических рекомендаций, направленных на прогнозирование и управление энергоемкостью лезвийной обработки при обеспечении остальных технологических требований на основе методологического подхода к проектированию операций. Представленные методики ориентированы на исследовательские и заводские лаборатории, оснащенные требуемым оборудованием и укомплектованные специалистами. В частности, разработаны и внедрены методические рекомендации для определения силовых характеристик на примере оценки главной составляющей силы резания при точении, для прогнозирования энергопотребления по критерию удельного энергопотребления, равного отношению потребляемой энергии к площади поверхности резания, и для разделения припуска на два прохода по критерию энергоемкости технологической операции (на примере точения).

Приложение включает материалы, дополняющие основной текст диссертации, на которые имеются ссылки по тексту.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе представлено решение актуальной научно-технической задачи по снижению и прогнозированию энергопотребления при механической обработке резанием, что соответствует перечню мероприятий по повышению энергетической эффективности, определенных Федеральным законом Российской Федерации № 261-ФЗ.

2. Разработаны и апробированы методические рекомендации, являющиеся научно-методической базой прогнозирования и управления энергопотреблением при механической обработке резанием, направленные на рациональное использование энергетических ресурсов при лезвийной обработке.

3. Разработана и экспериментально проверена модульная система определения силовых характеристик процесса резания, учитывающая совместное влияние параметров обработки, что позволяет сократить погрешности при учете энергопотребления на операциях лезвийной обработки не менее чем на 10%.

4. Установлено, что полиномиальные модели силы резания, полученные на основании дробного факторного эксперимента, позволяют учесть влияние всех значимых параметров обработки, однако они могут использоваться только как оценочные; в то время как модели, полученные на основании полного факторного эксперимента, позволяют прогнозировать энергопотребление во всех точках факторного пространства с высокой точностью.

5. Установлено, что при формообразовании поверхностей деталей фактором, в наибольшей степени отражающем энергоемкость операции является общая обрабатываемая поверхность резания. Обоснован критерий удельного энергопотребления, равного отношению потребляемой энергии к площади поверхности резания, позволяющий адекватно оценивать затраты энергии на срезание заданного припуска.

6. Доказано, что изменение соотношений припусков и подач на технологических переходах оказывает существенное влияние на суммарное энергопотреб-

ление при многопроходной обработке поверхностей заготовок, являясь резервом для сокращения энергопотребления до двух раз.

7. Установлено, что уменьшение диапазонов рассеивания припусков и твердости заготовок со смещением их в сторону минимально допустимых значений позволит сократить энергоемкость токарной обработки до 80%.

8. Разработанные методические рекомендации определения силовых характеристик резания и рационального назначения технологических параметров обработки позволяют снизить энергоемкость лезвийной обработки, что доказано практическим использованием результатов работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в рекомендованных ВАК РФ рецензируемых журналах:

1. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-61.

2. Малькова Л.Д. Энергосбережение при проектировании технологической операции токарной обработки // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2012. Спецвыпуск. С. 43 - 49.

3. Малькова Л.Д., Чихарева М.А. Исследование характеристик токарной обработки на основе получения и анализа многомерных полиномиальных зависимостей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. Эл № ФС 77 – 48211. 2013. №8. С. 49 - 66 DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0813.0589299>.

4. Малькова Л.Д. Влияние величины припуска поковок на энергоемкость механической обработки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. Эл № ФС 77 – 48211. 2015. № 10. С. 65-73. DOI: [10.7463/1015.0815492](http://dx.doi.org/10.7463/1015.0815492).

5. Малькова Л.Д. Влияние рассеивания твердости поковок на энергоемкость механической обработки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. Эл № ФС 77 – 48211. 2015. № 11. С. 101-110. DOI: [10.7463/1115.0823350](http://dx.doi.org/10.7463/1115.0823350).

6. Малькова Л.Д. Анализ применения дробных факторных планов в технологических исследованиях на примере механической обработки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. Эл № ФС 77 – 48211. 2016. №10. DOI: [10.7463/1016.0847711](http://dx.doi.org/10.7463/1016.0847711). С. 56-68.

7. Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. Эл № ФС 77 – 53688. 2016. №12(60). DOI: [10.18698/2308-6033-2016-12-1559](http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1559).

Другие научные труды:

8. Разработка теоретических основ создания современных высокоэффективных технологий заготовительных производств: отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. А.Г. Колесников; исполн.: Л.Д. Малькова [и др.]. М., 2000. 10 с. ГР №01.2.00101500.

9. Разработка теоретических основ создания современных высокоэффективных процессов и оборудования для заготовительных производств: отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. А.Г. Колесников; исполн.: Л.Д. Малькова [и др.]. М., 2001. 10 с. ГР №01.2.00101508.

10. Разработка методов оценки показателей надежности и диагностики состояния режущих инструментов: отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. А.Е. Древаль; исполн.: Л.Д. Малькова [и др.]. М., 2004. 78 с. ГР № 01040002430.

11. Разработка теоретических основ сокращения энергозатрат в технологии механической обработки: отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. А.Е. Древаль; исполн.: Л.Д. Малькова [и др.]. М., 2004. 73 с. ГР № 01040002429.

12. Разработка теоретических основ сокращения энергозатрат в технологии механической обработки: Отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана; рук. А.Е. Древаль; исполн.: Л.Д. Малькова [и др.]. М., 2005. 88 с. ГР № 01200603237.

13. Малькова Л.Д. Энергосбережение при обработке металлов резанием // Международная конференция «Образование через науку», посвященная 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 17 - 19 мая 2005 г.): тезисы докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. С. 186 - 187.

14. Малькова Л.Д., Древаль А.Е. Энергосбережение при обработке металлов резанием // Международный симпозиум «Образование через науку», посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 17 - 19 мая 2005 г.): сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. С. 193 – 203.

15. Малькова Л.Д. Энергосберегающие технологии в резании металлов // Всероссийская научно-технической конференция «Машиностроительные технологии», посвященная 140-летию Научно - Учебного Комплекса «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 16 - 17 декабря 2008 г.): тезисы докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. С. 70 - 71.

16. Малькова Л.Д., Щелокова П.Ю. Исследование совместного влияния факторов режима обработки при определении силы резания // Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 22 - 25 сентября 2010 г.): электр. сборник трудов. Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ФГУП НТЦ «Информрегистр». Государственная регистрация №0321001780, 5 с.

17. Малькова Л.Д. Влияние твердости заготовки на энергоемкость механической обработки // Производительность и надежность технологических систем в машиностроении: сб. науч. трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, д-ра техн. наук, проф. Волчкевича Л.И., 20-23 мая 2015 года, г. Москва / Под науч. ред. В.В.Прайса и И.Л.Волчкевича. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 375 с. С. 363-368.