

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего и профессионального образования
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ГОЛОВКИН Валерий Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ И КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ В ЗАГОТОВКАХ
ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАЛОЖЕНИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание
ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант:
д.т.н., профессор В.Н. Трусов

Самара, 2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 Состояние вопроса. Цель и задачи исследования.....	13
1.1 Эффективность применения ультразвуковых колебаний при обработке лезвийным инструментом	13
1.2 Особенности процесса нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями	20
1.3 Влияние технологических факторов на качество поверхностного слоя резьбовых деталей	24
1.4 Основные физико-механические характеристики обрабатываемых материалов.....	29
1.5 Цель и задачи исследования	31
Глава 2 Теоретико-экспериментальные исследования влияния параметров ультразвукового воздействия на напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя при нарезании резьбы	34
2.1 Исследование напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя во впадинах резьбы	35
2.1.1 Методика расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями	35
2.2 Влияние ультразвуковых колебаний на остаточные напряжения при резьбонарезании.....	42
2.2.1 Методика определения остаточных напряжений при нарезании наружных резьб малого диаметра	43
2.2.2 Результаты исследования влияния ультразвука на формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбовых деталей	53
2.3 Результаты исследования влияния ультразвука на формирование остаточных напряжений и пластических деформаций во впадинах резьбы	68
2.4 Определение остаточных напряжений при свободном резании с учетом влияния ультразвуковых колебаний	96

2.4.1 Схема силового нагружения в зоне обработки от действия сил резания ...	97
2.4.2 Определение остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной детали	105
Выводы по главе	117
Глава 3 Результаты экспериментальных исследований влияния ультразвуковых колебаний на крутящий момент, стойкость метчиков, точность нарезаемых резьб, шероховатость обработанной поверхности и деформационное упрочнение	119
3.1 Анализ технологических особенностей процесса нарезания внутренних резьб в глухих отверстиях и специальные конструкции метчиков	119
3.2 Исследование влияния ультразвука на крутящий момент при нарезании внутренних резьб метчиками в глухих отверстиях	129
3.2.1 Силы, действующие на метчик при резбонарезании	129
3.2.2 Сравнительные исследования крутящего момента при обычном и ультразвуковом нарезании резьб в глухих отверстиях	134
3.3 Исследование влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на работоспособность метчиков при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах	145
3.4 Влияние ультразвуковых колебаний на точность резьбы	152
3.5 Влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость обработанной поверхности	159
3.6 Влияние ультразвуковых колебаний на деформационное упрочнение поверхностного слоя резьбового профиля	165
Выводы по главе	174
Глава 4 Сравнительная оценка влияния технологических параметров ультразвукового воздействия на сопротивление усталости резьбовых деталей..	175
4.1 Определение предельной амплитуды цикла резьбовых деталей в условиях переменных нагрузок	176

4.1.1 Методика определения предельной амплитуды цикла напряжений резьбовых деталей при асимметричном цикле со средними растягивающими напряжениями от усилия затяжки.....	176
4.1.2 Результаты исследования влияния технологических параметров ультразвукового воздействия на предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей	186
Выводы по главе	197
Глава 5 Практическое применение результатов теоретических и экспериментальных исследований и внедрение процесса ультразвукового резьбонарезания.....	199
5.1 Специальное оборудование и новые способы для нарезания внутренних и наружных резьб с ультразвуковыми колебаниями	199
Выводы по главе	213
Основные выводы по работе	214
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	217
Приложение А	240
Приложение Б	241
Приложение В.....	242
Приложение Г	243

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в промышленности для повышения надёжности изделий используются материалы с высокими физико-механическими характеристиками, механическая обработка которых традиционными методами вызывает серьёзные затруднения. При этом к деталям машин предъявляют всё более высокие требования по точности и качеству обработки. Так для повышения эффективности механической обработки всё более широкое применение находят методы обработки, основанные на комбинированном воздействии нескольких видов энергии. К одному из таких методов относится обработка с применением вынужденных ультразвуковых колебаний. В результате многочисленных исследований было установлено, что значительный эффект применения энергии ультразвука проявляется при резании многолезвийным инструментом, например при резьбонарезании. Наложение на инструмент вынужденных ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы позволяет повысить производительность труда, период стойкости резьбонарезного инструмента, точность получаемой резьбы, а также улучшить качество поверхностного слоя. Следует отметить, что одной из проблем при нарезании внутренних резьб в глухих отверстиях ответственных деталей из материалов с высокими физико-механическими характеристиками являются сколы режущих зубьев и даже поломка метчиков. При этом происходит снижение качества резьбы и уменьшение надёжности резьбового соединения, что иногда приводит к браку дорогостоящих изделий. К другой проблеме можно отнести разрушение ответственных резьбовых деталей по впадине наружной резьбы при эксплуатации с переменными нагрузками, что приводит к уменьшению ресурса работы изделия. Повысить качество резьбы возможно за счёт направленного воздействия различных видов ультразвуковых колебаний с целью формирования максимальных сжимающих остаточных напряжений, что позволит, в конечном итоге, повысить работоспособность резьбового соединения при переменных нагрузках.

Таким образом, актуальность проблемы в научном плане заключается в определении закономерностей формирования качества резьбы непосредственно в процессе обработки и разработке технологии управления процессом ультразвукового резбонарезания для обеспечения высоких эксплуатационных показателей изделий, в частности, авиационной и космической техники. В практическом плане актуальным является разработка способов и устройств для повышения качества резьбы при обработке с использованием различных по направлению и воздействию ультразвуковых колебаний.

Целью данной работы является повышение эффективности ультразвуковой обработки и качества резьбовой поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов путём управления параметрами ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы.

Для достижения поставленной цели было необходимо определить и решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели и методики для расчёта остаточных напряжений, формируемых в процессе нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями.

2. Провести теоретико-экспериментальные исследования по изучению влияния режимов ультразвуковой обработки на остаточные напряжения, деформационное упрочнение, шероховатость и точность резьбового профиля.

3. Выполнить экспериментальные исследования по изучению влияния ультразвуковых колебаний на крутящий момент и работоспособность различных конструкций метчиков, в том числе с износостойкими покрытиями.

4. Разработать способы и специальные ультразвуковые устройства для нарезания внутренних и наружных резьб.

5. Исследовать влияние направления вынужденных ультразвуковых колебаний на предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых образцов.

6. Разработать научно обоснованные рекомендации по эффективному использованию ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы в

труднообрабатываемых материалах.

Объектом исследования является технологический процесс нарезания резьбы с введением в зону обработки ультразвуковых колебаний.

Предметом исследования является обеспечение требуемого качества поверхностного слоя резьбы, а именно остаточных напряжений, деформационного упрочнения, шероховатости и повышение эффективности обработки путём направленного использования ультразвукового воздействия.

Реализация поставленной цели работы и задач исследования осуществлялась теоретическими и экспериментальными методами. Теоретико-экспериментальные исследования проведены на базе фундаментальных разработок в области технологии машиностроения, теории формирования поверхностного слоя при механической обработке с учётом влияния ультразвуковых колебаний, механики деформируемого твёрдого тела, а также моделирования напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием специально разработанных оригинальных ультразвуковых резьбонарезных устройств, позволяющих исследовать особенности процесса в широком диапазоне режимов резания и ультразвуковых параметров.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, использованием известных положений фундаментальных наук, адекватностью применяемых методик, сходимостью теоретических результатов с экспериментальными данными. Достоверность новизны технических решений подтверждается тремя авторскими свидетельствами и патентом.

К научной новизне полученных результатов исследования можно отнести следующее:

1. Раскрыт и математически описан механизм влияния ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы, являющихся концентраторами напряжений. Установлены условия

интенсификации процесса образования остаточных напряжений сжатия путём воздействия различными по направлению ультразвуковыми колебаниями и получены аналитические зависимости расчёта напряжённо-деформированного состояния во впадинах резьбы.

2. На основе анализа процесса нарезания резьбы разработана феноменологическая модель, позволяющая определить влияние крутящего момента резания при обработке с ультразвуковыми колебаниями на формирование остаточных напряжений в тангенциальном и осевом направлениях.

3. Проведены экспериментальные исследования влияния режимов и направления ультразвуковых колебаний при обработке резьбовой поверхности заготовок из труднообрабатываемых материалов и показана эффективность воздействия ультразвукового поля на остаточные напряжения, деформационное упрочнение, шероховатость обработанной поверхности и точность резьбового профиля.

4. На основании проведённых экспериментальных исследований установлены закономерности влияния ультразвуковых колебаний на основные физико-технологические показатели процесса нарезания внутренних резьб метчиками в труднообрабатываемых материалах, а также на работоспособность метчиков, в том числе с износостойкими покрытиями.

5. Установлена аналитическая взаимосвязь остаточных напряжений, сформированных во впадинах резьбы с амплитудными напряжениями, возникающими при эксплуатации резьбовых деталей, позволяющая выбрать оптимальный вариант обработки, при котором повышается предельная амплитуда цикла напряжений резьбовых деталей.

Практическая значимость работы:

1. Определены рациональные параметры процесса нарезания внутренних резьб метчиками, наружных резьб резцами и круглыми плашками в труднообрабатываемых материалах с применением ультразвука. Разработаны научно обоснованные рекомендации по эффективному использованию

ультразвуковых колебаний при нарезании наружных и внутренних резьб, а также спроектированы и изготовлены оригинальные ультразвуковые устройства и оснастка для реализации предложенных способов обработки.

2. Разработана методика, позволяющая определить напряжённно-деформированное состояние в поверхностном слое впадин резьбы.

3. На основании проведённых исследований разработан способ нарезания с ультразвуком внутренних резьб метчиками в глухих отверстиях, позволяющий повысить качество резьбы (А.с. №1784419) и способ нарезания наружных резьб с применением ультразвуковых колебаний, позволяющий повысить предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей за счёт формирования во впадинах резьбы сжимающих остаточных напряжений (патент РФ № 2404031).

Личный вклад соискателя:

1. Разработаны математические модели и на их основе методики расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций во впадинах резьбы.

2. Установлены закономерности влияния параметров ультразвукового воздействия на формирование остаточных напряжений, деформационное упрочнение, шероховатость обрабатываемой поверхности, точность резьбового профиля и предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей.

3. Определено напряжённно-деформированное состояние поверхностного слоя во впадинах резьбы, позволяющее получить значения остаточных напряжений для прогнозирования работоспособности резьбовых деталей по предельной амплитуде цикла напряжений.

4. Установлены закономерности влияния осевых ультразвуковых колебаний на крутящий момент и работоспособность метчиков при нарезании внутренних резьб.

5. Созданы новые (на уровне изобретений) способы и устройства для реализации процесса нарезания внутренних и наружных резьб с введением в зону резания ультразвуковых колебаний, позволяющие расширить технологические возможности машиностроительных производств.

6. Обоснована целесообразность и перспектива применения предложенных способов обработки для повышения эффективности процесса резьбонарезания и надёжности резьбовых соединений.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ООО ПК «Продмаш». Нарезание резьб М4 - М8 с осевыми ультразвуковыми колебаниями позволило механизировать процесс, повысить стойкость инструмента и качество резьбы.

Опытно-промышленная проверка предложенной технологии нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями на предприятии ОАО «Волгабурмаш» показала, что ресурс работы резьбовых соединений увеличивается в 1,5 раза. Разработанные ультразвуковые устройства используются при проведении лабораторных работ и в научных исследованиях аспирантов. Результаты работы также внедрены в учебный процесс и научную деятельность ФГБОУ ВПО СамГТУ.

На защиту выносятся:

1. Математические модели и разработанные на их основе методики расчёта напряжённно-деформированного состояния поверхностного слоя во впадинах резьбы.

2. Результаты теоретико-экспериментальных исследований остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностном слое впадин резьбы при ультразвуковом резьбонарезании.

3. Результаты исследования влияния параметров ультразвуковых колебаний на остаточные напряжения и предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния различных параметров ультразвукового воздействия на точность резьбы, шероховатость и деформационное упрочнение.

5. Результаты экспериментального исследования влияния осевых ультразвуковых колебаний на крутящий момент и работоспособность метчиков

при нарезании резьб в глухих отверстиях.

6. Способ нарезания внутренних резьб в глухих отверстиях с наложением на метчик вынужденных ультразвуковых колебаний, позволяющий повысить качество резьбы.

7. Способ нарезания наружных резьб с ультразвуковыми колебаниями, позволяющий повысить ресурс работы резьбовых деталей.

Результаты работы доложены на многих научно-технических конференциях (НТК) и семинарах, в том числе: на Российской НТК «Новые материалы и технологии машиностроения» (г. Москва, МГАТУ, 1993 г.); на Всероссийской НТК с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, СамГТУ, 2002, 2005 - 2014 гг.); на международной НТК «Актуальные проблемы трибологии» (г. Самара, СамГТУ, 2007 г.); на VIII Российской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г. Оренбург, ОГУ, 2007 г.); на региональной НТК «Автопром в России: стратегия развития сборочных заводов. Конкурентоспособность российских компонентов» (г. Тольятти, 2007 г.); на VI Международной НТК «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (г. Брянск, БГТУ, 2008 г.); на V и VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, СамГТУ, 2008, 2009 гг.); на Всероссийской НТК с международным участием «Машиностроительные технологии» (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2008 г.); на Международной НТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, СГАУ, 2009 г., 2011 г.); на Международной НТК «Прочность материалов и элементов конструкций» (г. Киев, Украина, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010 г.); Международном научно-техническом форуме, посвящённом 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ (г. Самара, СГАУ, 2012г.). Диссертационная работа докладывалась и была одобрена на расширенных заседаниях кафедр «Инструментальные системы и сервис автомобилей» (2012-2013 гг.), «Транспортные процессы и технологические системы» (2014 - 2015 гг.)

и научно-техническом семинаре Ульяновского государственного технического университета (2014 г.).

В основу работы положены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором в 1982 - 2013 годах в Самарском государственном техническом университете. В 2010 - 2011 гг. диссертационная работа выполнялась по целевой программе Минобрнауки России «Развитие научного потенциала высшей школы» (Рег. №2.1.1/3397 и №2.1.1/13944).

Автор выражает признательность и благодарность д.т.н., профессору В.Н. Трусову, д.т.н., профессору Н.В. Носову, д.ф.-м.н., профессору В.П. Радченко, д.т.н., профессору В.Ф. Павлову и д.т.н., профессору Д.Л. Скуратову за ценные советы и рекомендации, а также всестороннюю помощь при выполнении данной работы.

Глава 1 Состояние вопроса. Цель и задачи исследования

1.1 Эффективность применения ультразвуковых колебаний при обработке лезвийным инструментом

Физико-химические методы обработки в настоящее время получили широкое распространение, так как позволяют значительно повысить эффективность технологических процессов изготовления различных деталей. Одним из перспективных направлений физико-химических методов является обработка с использованием энергии ультразвука.

В развитие и исследование ультразвуковых методов обработки большой вклад внесли российские учёные О.В. Абрамов, С.И. Агапов, В.А. Агранат, В.К. Асташев, Н.В. Бекренёв, С.Я. Березин, А.Л. Берсудский, М.В. Вартанов, В.А. Вероман, В.А. Волосатов, Э.Г. Гудушаури, А.И. Исаев, В.Ф. Казанцев, Е.С. Киселёв, Ю.И. Китайгородский, В.В. Клубович, Е.Г. Коновалов, Б.А. Кравченко, А.В. Кулемин, А.В. Макаров, А.И. Марков, В.Д. Мартынов, Б.Х. Мечетнер, И.И. Муханов, М.С. Нерубай, Г.И. Погодин-Алексеев, В.Н. Подураев, И.Г. Полоцкий, Г.И. Прокопенко, Л.Д. Розенберг, М.Г. Сиротюк, В.П. Севереденко, А.В. Степаненко, И.И. Теумин, И.Г. Хорбенко, Б.Л. Штриков, В.Г. Шуваев, а также зарубежные исследователи Л. Баламуз, Л. Бергман, Ф. Блаха, Л. Колуэлл, Д. Кумабэ, И. Кранткремер, Б. Лангенекер, Д. МаккLEMENTс, У. Мезон, Т. Мейсон, И. Нишимура и др. Многолетний опыт использования данной технологии показал, что наибольший эффект имеет место при механической обработке материалов с особыми физико-механическими свойствами.

Одним из первых данный метод обработки с введением в зону резания энергии ультразвуковых колебаний предложил в 1956 году профессор А.И. Марков.

Отличительной особенностью ультразвукового метода лезвийной обработки является то, что в зону резания дополнительно вводятся ультразвуковые колебания путём их наложения на инструмент или обрабатываемую деталь. К ультразвуковым параметрам относятся:

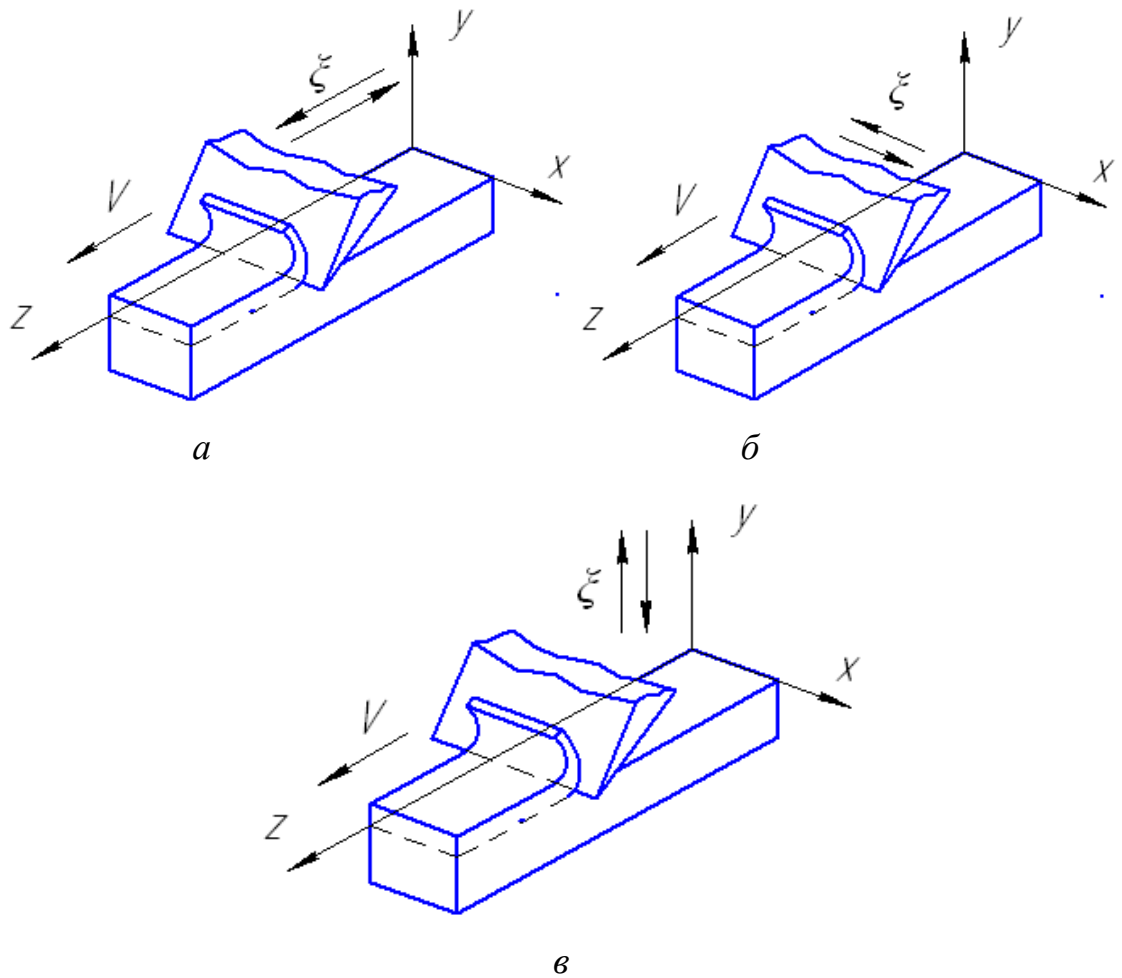
- частота вынужденных ультразвуковых колебаний (обычно 18-22 кГц);
- амплитуда ультразвуковых колебаний (в среднем до 10 мкм) ;
- направление ультразвуковых колебаний.

Направление ультразвуковых колебаний в значительной степени изменяет кинематику процесса резания (рисунок 1.1) и подробно рассмотрено в работах (85, 86, 87, 88).

Ультразвуковые колебания могут быть направлены в тангенциальном, осевом, радиальном, а также и в другом направлении. Соответственно, различают тангенциальные ультразвуковые колебания, радиальные ультразвуковые колебания, осевые ультразвуковые колебания и комплексные.

Профессором А.И. Марковым были выполнены обширные теоретико-экспериментальные исследования влияния различных параметров ультразвука (частоты ультразвуковых колебаний, направления, амплитуды) на процесс механической обработки [86-88]. А.И. Марковым впервые было показано, что ультразвук оказывает огромное влияние на многочисленные параметры процесса резания. При этом происходит изменение следующих факторов:

- действительной скорости резания;
- кинематических углов инструмента;
- толщины срезаемого слоя;
- процесса стружкообразования;
- условий формирования поверхностного слоя;
- воздействия технологической среды и других.



a – обработка с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; *б* - обработка с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; *в* – обработка с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 1.1 – Схемы резания лезвийным инструментом с ультразвуковыми колебаниями

Проведенный глубокий анализ применения ультразвуковых колебания в различном направлении показал, что при тангенциальных ультразвуковых колебаниях вектор скорости резания не меняется, а изменяется только действительная скорость (периодически уменьшается и увеличивается в соответствии с частотой ультразвуковых колебаний, т.е. резание становится импульсным). При обработке осевыми или радиальными колебаниями происходит изменение величины и направления истинной скорости резания, т.е.

характер резания кардинально изменяется. Рассматривая изменение кинематических углов при резании с различными по направлению ультразвуковыми колебаниями, также отмечено, что значения переднего и заднего кинематических углов изменяются при применении осевых и радиальных ультразвуковых колебаний, а при тангенциальных колебаниях значения кинематических углов не изменяются. Наложение на инструмент ультразвуковых колебаний в радиальном и осевом направлении при точении также изменяет толщину срезаемого слоя (до 50% в зависимости от режимов обработки).

При исследовании влияния ультразвукового воздействия на качество поверхностного слоя было установлено, что, например, при точении титанового сплава ВТ3-1 с радиальными ультразвуковыми колебаниями наблюдается увеличение микротвёрдости обработанной поверхности и сжимающих остаточных напряжений, причём увеличение происходит пропорционально увеличению амплитуды ультразвуковых колебаний. Также отмечено, что практическое применение высоких амплитуд колебаний (больше 5мкм) не рационально с энергетической точки зрения (мощность пропорциональна квадрату амплитуды), а также в связи с нагревом инструмента и проблемами, возникающими при закреплении инструмента в концентраторе ультразвуковых колебаний.

В результате сделаны выводы о том, что данный метод обработки позволяет значительно повысить стойкость инструмента (в 3 и более раз), производительность процесса, а также улучшить качественные характеристики поверхностного слоя.

Обширные исследования вибрационного резания, в том числе и ультразвукового, проведены профессором В.Н. Подураевым [115]. Особое внимание уделено периодическому изменению скорости резания, анализу силовой ситуации в зоне резания, уменьшению сил трения, а также повышению точности, в частности, за счет стабилизации вибраций при обработке с наложением вынужденных колебаний.

Значительный вклад в повышение эффективности механической обработки труднообрабатываемых материалов был внесен профессором М.С. Нерубаем. В работах [91-96] показано, что введение в зону обработки энергии ультразвуковых колебаний позволяет в значительной степени повысить эффективность различных технологических процессов. М.С. Нерубаем разработаны теоретические основы ультразвуковой механической обработки, позволившие при практической реализации повысить производительность и эксплуатационные характеристики деталей машин. В результате выполненных исследований установлено влияние ультразвука на кинематику механической обработки, сопротивление пластической деформации и механические свойства обрабатываемых материалов, трибологические и термодинамические особенности, на напряжённно-деформированное состояние зоны резания, точность обработки, эффективность технологической среды и другие факторы. Выявлена эффективность ультразвуковой механической обработки как метода направленного регулирования физико-химического состояния поверхностного слоя при различных процессах механической обработки, а также как метода технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин. Показано, что применением ультразвука возможно значительно повысить сопротивление усталости и другие эксплуатационные характеристики изделий.

В работах профессора Е.С. Киселёва показана эффективность использования энергии ультразвукового поля для различных процессов механической обработки [66]. Особое внимание уделено обработке глубоких отверстий малого диаметра [66, 67]. Отмечено, что применение энергии ультразвукового поля позволяет значительно повысить производительность обработки и стойкость инструмента.

Наиболее подробно эффективность ультразвукового воздействия была изучена при точении, и, соответственно, этому процессу посвящено наибольшее количество публикаций [1, 10, 11, 77, 81, 87, 88, 93, 94, 99, 115]. В этих работах представлены исследования влияния вынужденных ультразвуковых колебаний различного направления, частоты и амплитуды на процесс резания и формирование

поверхностного слоя. Также установлено влияние ультразвуковых колебаний на размерную точность и изменение свойств технологической среды. Всеми авторами отмечен положительный эффект ультразвукового воздействия при точении, проявляющийся в уменьшении усадки стружки и увеличении её элементности, снижении сил трения на контактных поверхностях инструмента и, соответственно, сил резания в среднем в 1,5-2 раза.

При анализе качества поверхностного слоя при точении различных материалов установлено снижение шероховатости обрабатываемой поверхности на 20-30%, уменьшение растягивающих остаточных напряжений или увеличение сжимающих остаточных напряжений почти в 2 раза. Одним из выявленных преимуществ резания с ультразвуком является повышение работоспособности используемого режущего инструмента в несколько раз (в среднем 2-4 раза).

Японский исследователь Д. Кумабэ также провел всеохватывающее исследование влияния вибрационного воздействия (применялись колебания в диапазоне 10-40кГц) на процесс точения алюминия, стали и чугуна [77]. Автором исследовался процесс свободного резания, при котором было установлено снижение сил резания, шероховатости обработанной поверхности, исчезновение явления нароста на режущей кромке резца и т.д. При этом был разработан и изготовлен комплекс специальных ультразвуковых устройств.

В работах [91-96] установлено, что при точении с высокими скоростями резания (свыше 100 м /мин) эффект от применения ультразвуковых колебаний в радиальном направлении несколько больше, чем при тангенциальных колебаниях. В случае уменьшения скорости резания до значений 20-30 м/мин более предпочтительными являются тангенциальные ультразвуковые колебания. Эти данные получены при точении титановых сплавов BT3-1, BT5, сталей 45, ШХ15 и других. Были определены оптимальные режимы резания и параметры ультразвука, позволяющие повысить стойкость резцов и точность обработки.

Повысить эффективность точения при обработке материалов с высокими прочностными характеристиками, таких как сплавы на основе вольфрама, ниобия,

хрома и других легирующих элементов также возможно за счёт применения энергии ультразвука [68, 73, 77, 87, 89, 93]. При точении данных сплавов исчезают в зоне резания наволакивания, наслоения, уменьшаются силы резания, что позволяет повысить производительность процесса и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Значительный эффект от применения ультразвука получен при резании многолезвийным инструментом. В первую очередь это относится к процессу резьбонарезания, а также фрезерования, развёртывания, зенкерования и сверления.

Например, при сверлении отверстий малого диаметра (до 20 мм) с ультразвуковыми колебаниями и амплитудой до 5 мкм имеет место уменьшение крутящего момента резания и осевой силы, в среднем в 1,5 раза. В результате повышается стойкость (в 2 раза), точность обработки и уменьшается шероховатость обработанной поверхности [17, 67, 93]. Наиболее значительные результаты получены при сверлении отверстий большой глубины. При обработке стали 10X18H9T удалось более чем в 2 раза повысить стойкость сверл и производительность процесса за счёт уменьшения сил трения и улучшения отвода стружки из отверстия. При дальнейшей обработке отверстий зенкерованием и развёртыванием применение ультразвука также позволяет значительно повысить стойкость инструмента, качество поверхностного слоя и размерную точность [4, 6, 8, 86].

В работах [68, 86, 93, 115] представлены результаты исследования применения ультразвука при фрезеровании. Значительное количество исследований посвящено фрезерованию высокопрочных материалов, обработка которых вызывает серьёзные затруднения. Введение в зону резания ультразвуковых колебаний амплитудой до 10 мкм позволяет значительно повысить эффективность данного процесса. При этом также происходит уменьшение сил резания, температуры в зоне резания, шероховатости поверхности и т.д. Отмечено, что различные по направлению ультразвуковые колебания влияют по разному на напряжённо-деформированное

состояние поверхностного слоя, например, при радиальных колебаниях сжимающие остаточные напряжения увеличиваются в 1,5-2 раза.

Аналогичные данные получены при протягивании отверстий с ультразвуковыми колебаниями в титановых сплавах [92, 93]. При этом значительно улучшается качество поверхностного слоя.

На основании ранее изложенного можно сделать следующие выводы. Применение вынужденных ультразвуковых колебаний при механической обработке лезвийным инструментом позволяет значительно повысить производительность, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности, особенно при обработке материалов с особыми физико-механическими характеристиками.

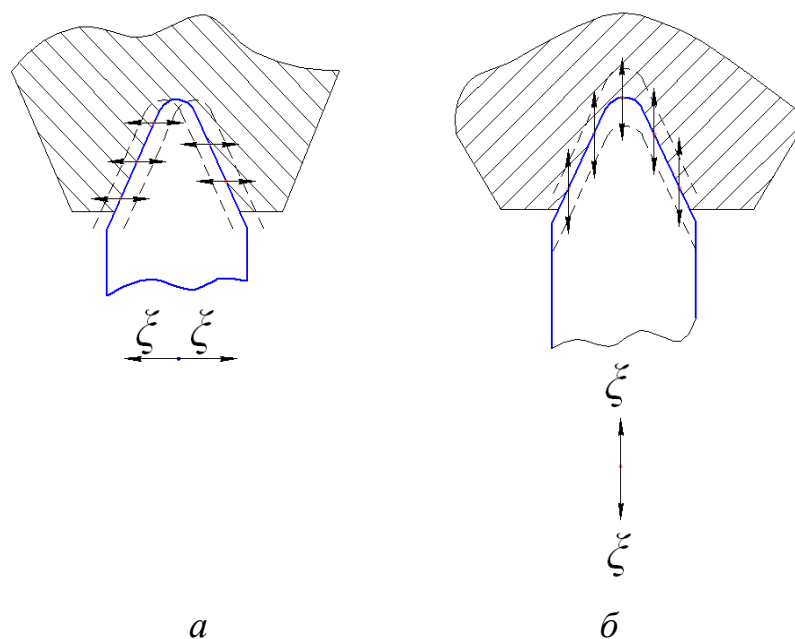
Далее приведён подробный анализ процесса нарезания резьбы с применением ультразвука.

1.2 Особенности процесса нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями

Особенностью процесса нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями является то, что при наложении на резьбообразующий инструмент осевых ультразвуковых колебаний происходит ударно-циклическое взаимодействие режущих кромок с боковой поверхностью профиля резьбовой детали (рисунок 1.2, а), а при наложении на инструмент ультразвуковых колебаний в радиальном направлении ударно-циклическому воздействию подвергаются дополнительно и впадины резьбы (рисунок 1.2, б). При этом на обрабатываемую поверхность оказывается дополнительное упрочняющее воздействие. Очевидно, что при обработке с тангенциальными колебаниями такого взаимодействия не происходит, так как направление колебаний совпадает с вектором скорости резания.

Исследованию процесса нарезания резьб с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний посвящены работы следующих авторов:

В.А. Волосатова, А.А. Горбунова, В.И. Захарова, Е.С. Киселёва, Д. Кумабэ, Б.А. Кравченко, А.И. Маркова, Э.А. Михайлова, М.С. Нерубая, В.Н. Подураева, О.В. Ромашкиной, В.М. Салтанова, Ю.Н. Сулье, А.Г. Туркова, Б.Л. Штрикова и других российских и зарубежных исследователей.



а - осевые колебания; *б* - радиальные колебания

Рисунок 1.2 - Схема нарезания резьбы с наложением ультразвука

Наиболее подробно данный процесс исследовался в работах А.И. Маркова [86 - 88]. В представленных результатах исследований показано, что при нарезании внутренних резьб метчиками с осевыми ультразвуковыми колебаниями изменяются такие параметры резания, как действительная скорость резания, сечение срезаемого слоя, а также действительные углы резания. Основным положительным фактором при нарезании резьб метчиками является то, что применение ультразвука позволяет уменьшить крутящий момент резания на 10-50%. Основные исследования проводились для резьб М6-М20 с амплитудой колебаний 5-10 мкм. Частота ультразвуковых устройств находилась в пределах 18-22 кГц, т.к. устройства работают только на резонансной частоте (для каждого устройства своя резонансная частота). При этом положительный эффект от

ультразвукового воздействия установлен для широкой гаммы исследуемых материалов, а именно для конструкционной стали 45, нержавеющей сталей 10X18H9T и X18H19, жаропрочных сплавов ЭИ654, ЭИ867, ЭИ835, а также титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9 и других. Кроме уменьшения значений крутящего момента резания удалось повысить производительность обработки (в 1,5-2 раза), уменьшить число применяемых метчиков в комплекте (как правило, на один метчик), повысить точность нарезаемых резьб и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. В связи с высокой эффективностью ультразвукового метода нарезания резьб, для условий серийного и массового производства были внедрены специальные резьбонарезные станки. В данных станках применены магнито-стрикционные преобразователи энергии ультразвуковых колебаний, которые обладают значительными габаритами и, соответственно, массой, а также требуют наличия принудительного водяного охлаждения. Для реализации технологического процесса нарезания резьб с ультразвуковыми колебаниями на серийных сверлильных и радиально-сверлильных станках были разработаны специальные навесные ультразвуковые головки. Широкое применение быстросъемные ультразвуковые головки получили в мелкосерийном и единичном производствах. Отмечено, что применение данного оборудования повысило производительность труда (в 4-5 раз) и получить значительный экономический эффект, особенно при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах. Например, при обработке титановых сплавов наблюдалось повышение стойкости метчиков более чем в 3 раза [29, 93].

Отдельные исследования были проведены для изучения эффективности применения комплексных ультразвуковых колебаний [88]. При этом получены аналогичные результаты. Так, например, при нарезании резьбы М10-М20 в высокопрочной стали ШХ15 и чугунах удалось добиться снижения крутящего момента резания на 20-45% и повысить стойкость метчиков почти в 2 раза. При этом отмечено повышение точности обработки и шероховатости обработанной поверхности.

Значительное снижение сил резания имеет место при обработке с ультразвуковыми колебаниями, направленными под углом равным углу подъёма витков нарезаемой резьбы [148]. Исследования проводились, в основном, для легких сплавов на основе алюминия, латуни, а также для конструкционных сталей.

В работе [111] предложен новый способ, при котором ультразвуковые колебания направлены под углом, перпендикулярным к режущей кромке резбонарезного инструмента.

Значительно повысить эффективность процесса резбонарезания в отверстиях малого диаметра удалось путём применения ультразвуковых колебаний при обработке заготовок с высокими физико-механическими свойствами, так как при обработке без ультразвука наблюдалась низкая стойкость метчиков и частые их поломки [148, 149, 157]. Исследования проводились для резьб М1-М8. В результате проведенных исследований установлено, что при нарезании резьбы в труднообрабатываемых сталях и сплавах крутящий момент резания уменьшался на 25-35%, осевая сила на 10-25%, стойкость метчиков повышалась до 3 раз, а также увеличивалась производительность (в 3-4 раза) при обработке глухих отверстий. Для реализации предложенного способа обработки были разработаны, изготовлены и внедрены в производство специальные станки (типа СРС-3) для нарезания резьб малого диаметра с использованием ультразвуковых колебаний.

В работе [148] подробно изучено влияние ультразвуковых колебаний на процесс нарезания внутренних резьб метчиками в жаропрочных и титановых сплавах. Установлено изменение крутящего момента отдельно на режущей и калибрующей частях метчика. При этом крутящий момент на режущей части уменьшался в 5 раз, а на калибрующей в 2 раза. Отмечено, что для нарезания резьбы в титановых сплавах в качестве технологической среды следует использовать сульфифрезол, для сплавов на никелевой основе суспензию

молибдена. Автором также были разработаны специальные ультразвуковые станки различных моделей (УЗРС-1 и другие).

Также комплексное исследование процесса нарезания резьб с ультразвуком в жаропрочных и титановых сплавах представлено в работах [93, 157]. Также установлено преимущество осевых колебаний по сравнению с комплексными в условиях обработки данных материалов. Например, при нарезании резьбы в титановом сплаве BT14 при осевых колебаниях крутящий момент резания уменьшался на 40%, а при обработке с комплексными в 2 раза меньше (всего на 20%). Уменьшение крутящего момента при нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах с применением ультразвуковых колебаний авторы объясняют снижением трения на режущей и калибрующей частях метчика, изменением процесса стружкообразования, исключением нароста (при обработке вязких материалов), активацией технологической среды и другими факторами.

Широкий спектр специальных ультразвуковых резьбонарезных устройств представлен в работах [6, 93, 95, 149]. Обоснована высокая эффективность разработанного ультразвукового оборудования, позволяющая повысить стойкость инструмента и производительность обработки, особенно для материалов с особыми физико-механическими характеристиками.

1.3 Влияние технологических факторов на качество поверхностного слоя резьбовых деталей

Изготовление резьбы может осуществляться различными способами, например, шлифованием, нарезанием лезвийным инструментом, а также накатыванием. При этом прочность резьбовых деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, в значительной степени зависит от качества поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки. К качественным характеристикам, в первую очередь, следует отнести шероховатость поверхности

бокового профиля и впадин резьбы, микроструктуру, глубину и степень деформационного упрочнения, а также распределение остаточных напряжений в поверхностном слое. Необходимо отметить, что технология изготовления оказывает огромное влияние на качественные характеристики поверхностного слоя, позволяя при этом изменять их в широком диапазоне [141 - 143].

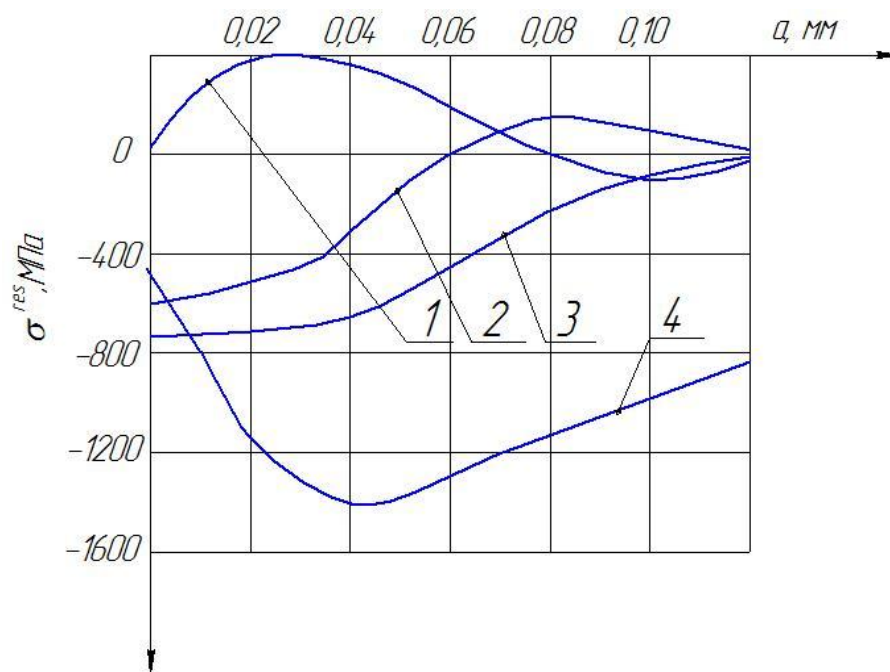
Исследование шероховатости профиля резьбы были проведены в работах [103, 139, 140, 154]. При этом минимальная шероховатость получается при накатывании полированными роликами и шлифовании. При нарезании резьбы лезвийным инструментом шероховатость была больше, и в значительной степени зависела от режимов резания. В работах также отмечено, что резьбовые детали с меньшей шероховатостью повышают сопротивление усталости.

В работах [105, 138, 140] проведена оценка формирования микро- и макроструктуры поверхностного слоя при изготовлении резьбы. Отмечено, что при накатывании волокна изогнуты в направлении течения металла, а при обработке со снятием стружки волокна по виткам прерываются. Значительного изменения микроструктуры не наблюдалось и деформации подвергались зёрна, расположенные около впадин резьбы на глубине до 0,1 мм при дополнительной обкатке по впадинам. Прямой связи влияния микро- и макроструктуры на работоспособность резьбовых деталей не установлено.

Противоречивые данные также получены при исследовании влияния деформационного упрочнения на прочностные характеристики резьбовых деталей. В работах [103, 105, 138, 150, 154] отмечено, что микротвёрдость накатанной резьбы выше, чем при шлифовании, причём с увеличением усилия микротвёрдость поверхностного слоя тоже увеличивается. Однако увеличение микротвёрдости для различных материалов наблюдалось в широком диапазоне (10-250%), что, по-видимому, связано с различными условиями обработки.

Наиболее важным параметром качества поверхностного слоя являются остаточные напряжения. В работах [103, 104, 116, 118] показано, что, например, при формировании резьбы в титановом сплаве ВТ16 после шлифования в

поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения достигающие значений около 400 МПа, после нарезания резцом формируются сжимающие остаточные напряжения 500 МПа, плашкой - 700 МПа, а при накатывании - 1300 МПа (рисунок 1.3).



1- шлифование; 2 - нарезание резцом; 3 - нарезание плашкой;
4 – накатывание; 5 - фрезерование

Рисунок 1.3 - Распределение остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 на образцах из титанового сплава ВТ16 после различных видов обработки

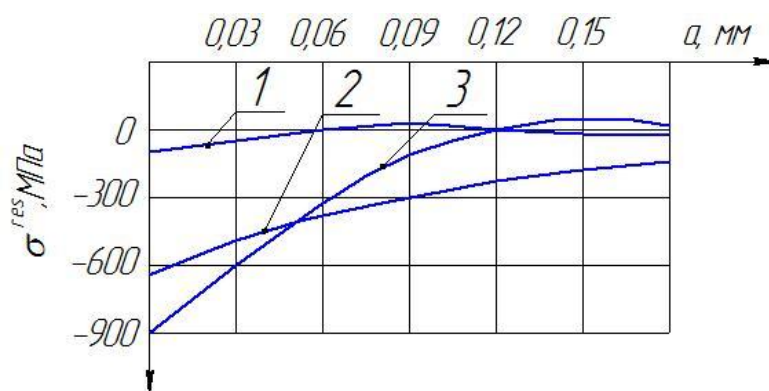
Одним из способов повышения работоспособности ответственных деталей является использование упрочняющих технологических операций, которые позволяют повысить качество поверхностного слоя. При работе в условиях переменных нагрузок разрушение происходит в местах концентрации напряжений и имеют усталостный характер. Повысить предел выносливости позволяют упрочняющие операции за счёт одного из основных (в данном случае) параметров качества поверхностного слоя — остаточных напряжений.

Исследованию сопротивления усталости с учетом остаточных напряжений посвящены работы Биргера И.А., Давиденкова Н.Н., Иванова С.И.,

Кравченко Б.А., Кудрявцева И.В., Павлова В.Ф., Папшева Д.Д. и других российских и зарубежных учёных. В результате проведённых обширных исследований установлено, что применение различных методов поверхностного пластического деформирования позволяет повысить пределы выносливости деталей машин на 30-50%, а при наличии концентратора напряжений в 2-3 раза. Это объясняется концентрацией благоприятных сжимающих напряжений около галтелей, впадин резьбы и других конструктивных элементов, являющихся концентраторами напряжений.

Существуют различные методы упрочнения поверхностного слоя. Наибольшее распространение получили следующие: пневмодробеструйное или гидродробеструйное упрочнение микрошариками, обкатка роликом, ультразвуковая обработка и другие.

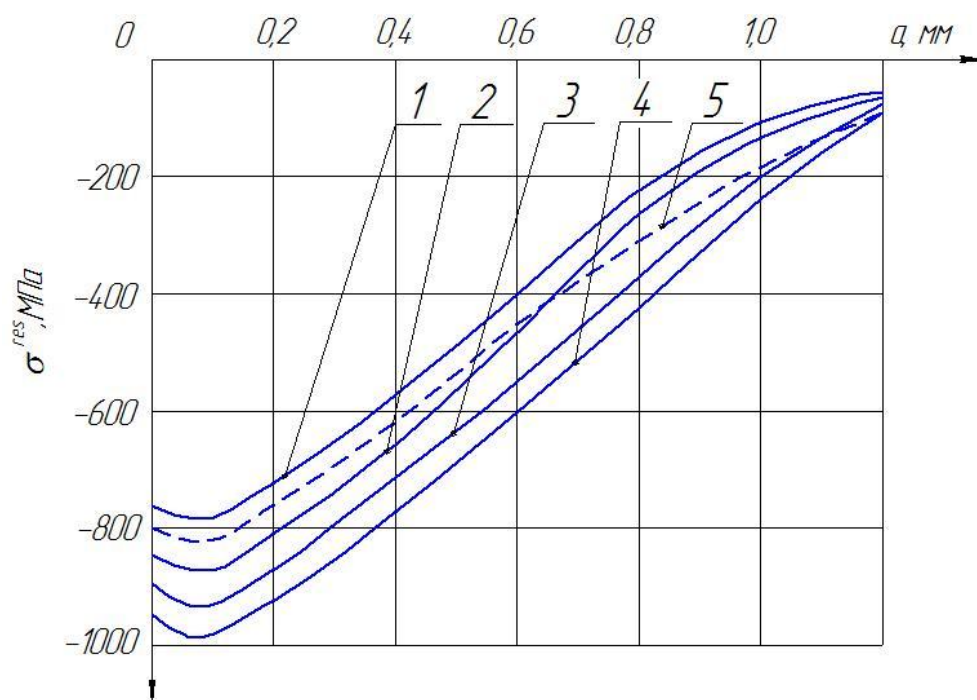
Также установлено, что методами поверхностного пластического деформирования можно значительно увеличить значение сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое в 3-8 раз и более (рисунок 1.4). Так, например, после обработки резьбы М10 (материал 12Х18Н9Т) сжимающие остаточные напряжения увеличились со 100 МПа до 900 МПа. Кроме того, с увеличением



1 – нарезание резцом; 2 – пневмодробеструйная обработка; 3 – обработка микрошариками

Рисунок 1.4 - Распределение остаточных напряжений во впадинах резьбы М10 (материал сталь 12Х18Н9Т) после различных видов обработки

силового воздействия на поверхностный слой, например, при обкатке гладких образцов из сталей 30ХГСА и 40Х сжимающие остаточные напряжения так же увеличиваются (рисунок 1.5). Таким образом, различные технологические факторы оказывают значительное влияние на качество поверхностного слоя.



1 – обкатка с усилием 4,3 кН; 2 - обкатка с усилием 6,45 кН; 3 - обкатка с усилием 8,64 кН; 4, 5 - обкатка с усилием 10,75 кН

Рисунок 1.5 – Остаточные напряжения в поверхностном слое после обкатки сталей 30ХГСА (сплошная линия) и 40Х (пунктирная линия)

Из проведённого анализа видно, что доминирующее влияние на сопротивление усталости резьбовых деталей оказывают технологические остаточные напряжения, являющиеся, в данном случае, наиболее важной характеристикой качества поверхностного слоя резьбы.

1.4 Основные физико-механические характеристики обрабатываемых материалов

В настоящее время в промышленности для повышения надежности применяют материалы с высокими физико-механическими характеристиками, что приводит к разработке новых технологических процессов при изготовлении ответственных деталей. Например, в таких отраслях промышленности как машиностроение, авиастроение, судостроение и других широко применяют титановые сплавы, жаропрочные стали и сплавы, а также нержавеющие и высокопрочные конструкционные стали. Для выявления закономерностей влияния ультразвукового воздействия на процесс нарезания резьбы и формирования поверхностного слоя были выбраны материалы, обладающие особыми физико-механическими характеристиками. Широкое распространение получили сплавы на основе титана, так как обладают высокой удельной прочностью в широком температурном диапазоне от -250°C до 300°C - 600°C . По своей классификации титановые сплавы разделяются на три основные группы: сплавы с α -структурой, $(\alpha+\beta)$ -структурой, β -структурой. Фазовый состав имеет важное значение и определяет прочностные характеристики. Считается, что α -фаза сравнительно мягкая, пластичная и вязкая, а β -фаза более твердая и прочная. при проведении исследования были выбраны сплавы ВТЗ-1, ВТ9, ВТ16 с $(\alpha+\beta)$ -структурой, которые получили наиболее широкое распространение при изготовлении ответственных деталей и занимают среднее положение между α - и β -сплавами, поэтому полученные результаты исследования являются наиболее типичными. Кроме того, титановые сплавы имеют высокую степень упрочнения и подвержены изменению свойств поверхностного слоя при их механической обработке. Данные сплавы имеют высокие прочностные характеристики, при этом сплав повышенной прочности ВТ16 используется в основном для резьбовых деталей (болтов, винтов, шпилек и так далее), а сплавы ВТЗ-1 и ВТ9 обладают повышенной жаропрочностью. При этом нарезание резьбы в заготовках из

титановых сплавов вызывает значительные затруднения. Например, при нарезании внутренних резьб метчиками имеет место защемление метчика в отверстии в результате трения по периферийным поверхностям перьев, его деформация и другие факторы.

При проведении исследования были выбраны также высокопрочные жаропрочные и коррозионностойкие сложнолегированные стали и сплавы, приведённые в таблице 1.1. Большинство данных материалов относится к аустенитному классу, содержит большое количество хрома, никеля и других легирующих элементов. Механическая обработка данных материалов порой вызывает серьёзные затруднения. Неудовлетворительное обрабатывание резанием связано с содержанием легирующих элементов — титана, кремния, вольфрама, молибдена, никеля и других.

При этом процесс резания характеризуется малой теплопроводностью, высокой степенью упрочнения обрабатываемого материала, адгезией и диффузией контактных поверхностей и др., что приводит к интенсивному износу режущих кромок и снижению стойкости режущего инструмента. При этом также значительно изменяются качественные характеристики поверхностного слоя. Например, при обработке жаропрочных сплавов силы резания в 1,5 – 2,5 раза больше, чем при обработке стали 45.

В связи с изложенным исследования проводились на образцах из труднообрабатываемых материалов приведенных в таблице 1.1.

Таким образом, представленные материалы охватывают практически все группы труднообрабатываемых сталей и сплавов, повышение эффективности обработки которых является актуальной задачей.

Также актуальным является повышение качества обработанной поверхности, позволяющее повысить работоспособность ответственных деталей из представленных материалов.

Таблица 1.1 – Основные физико-механические свойства исследуемых материалов

Материалы	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	σ_{-1} , МПа	S_k , МПа
BT3-1	1050	900	25	51	470	1800
BT9	1200	1030	9	28	480	1650
BT16	1180	920	19	67	480	1900
12X18H9T	650	420	53	71	230	1250
30XГСА	1040	920	11	46	460	1700
X12H22T3MP	1000	700	10	12	-	-
XH68BMTЮК	1150	760	38	50	-	-
26X2ГСНВМБР	1600	1300	8	45	-	-
03X11HI0M2T-ВД	1420	1325	8	40	-	-

В разделах 1.1 и 1.2 было показано, что повысить эффективность лезвийной обработки и, в частности, процесса резьбонарезания возможно путём применения ультразвука.

1.5 Цель и задачи исследования

Проведенный анализ показал, что значительный эффект применения энергии ультразвука проявляется при резании многолезвийным инструментом, например при резьбонарезании. Было установлено, что нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями позволяет повысить производительность, стойкость резьбонарезного инструмента, точность получаемой резьбы, а также улучшить качество поверхностного слоя.

Из приведенных данных видно, что в случае применения ультразвуковых колебаний в радиальном или осевом направлении поверхностный слой подвергается упрочнению и с увеличением амплитуды колебаний увеличиваются (по модулю) остаточные напряжения и деформация поверхностного слоя. Следовательно, повысить качество резьбы возможно за счёт направленного воздействия различных видов ультразвуковых колебаний с целью формирования максимальных сжимающих напряжений, что позволит, в конечном итоге, повысить работоспособность резьбового соединения при переменных нагрузках.

Вместе с тем, недостаточно изучены процессы нарезания резьб в глухих отверстиях при обработке материалов с высокими физико-механическими характеристиками, когда стойкость инструмента и качество резьбы резко снижаются, а также вопросы, касающиеся влияния одного из основных параметров ультразвуковой обработки, а именно направления ультразвуковых колебаний на формирование поверхностного слоя резьбы, в том числе остаточных напряжений, от которых зависит работоспособность резьбовых деталей при эксплуатации в условиях переменных нагрузок

Таким образом, тема диссертационной работы, посвященной повышению эффективности обработки и качества поверхностного слоя при нарезании резьбы в заготовках из труднообрабатываемых материалов с наложением ультразвуковых колебаний, является актуальной.

Цель работы: повышение эффективности ультразвуковой обработки и качества резьбовой поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов путём управления параметрами ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы.

Для реализации цели работы были поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать математические модели и методики для расчёта остаточных напряжений, формируемых в процессе нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями.

2. Провести теоретико-экспериментальные исследования по изучению

влияния режимов ультразвуковой обработки на остаточные напряжения, деформационное упрочнение, шероховатость и точность резьбового профиля.

3. Выполнить экспериментальные исследования по изучению влияния ультразвуковых колебаний на крутящий момент и работоспособность различных конструкций метчиков, в том числе с износостойкими покрытиями.

4. Разработать способы и специальные ультразвуковые устройства для нарезания внутренних и наружных резьб.

5. Исследовать влияние направления вынужденных ультразвуковых колебаний на предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых образцов.

6. Разработать научно обоснованные рекомендации по эффективному использованию ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах.

Глава 2 Теоретико-экспериментальные исследования влияния параметров ультразвукового воздействия на напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя при нарезании резьбы

Работоспособность и эксплуатационные характеристики деталей машин в значительной степени определяются состоянием обработанной поверхности в результате выполнения технологических операций. Для получения необходимых параметров поверхностного слоя возможно осуществлять управление технологическим процессом путем воздействия на механизм формирования поверхностного слоя за счёт изменения параметров обработки и других технологических факторов.

При механической обработке деталей в поверхностном слое образуется деформационное упрочнение и формируются остаточные напряжения. Кроме того, при этом изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя – увеличиваются прочность и твёрдость.

Как уже отмечалось ранее, формирование поверхностного слоя зависит от режимов резания, применяемого инструмента и других технологических параметров, в частности, ультразвуковых колебаний. Поэтому, для обеспечения требуемых свойств поверхностного слоя путём управления процессом ультразвукового резбонарезания необходимо провести исследования по влиянию параметров ультразвука на механизм формирования поверхностного слоя. В данном разделе представлены исследования по формированию остаточных напряжений при ультразвуковом резбонарезании.

Известно, что остаточные напряжения бывают:

- первого рода – макроскопические, уравнивающиеся в макрообъёмах деталей;
- второго рода – микроскопические, уравнивающиеся в объёмах, соответствующих размерам зёрен материала;
- третьего рода – субмикроскопические, уравнивающиеся в объёмах,

соизмеримых с межатомными расстояниями.

В данной работе исследовались только остаточные напряжения первого рода, которые можно определить путем измерения деформации исследуемого образца при частичном удалении напряжённого слоя. При этом принимается, что остаточные напряжения в поверхностном и нижележащем слоях уравниваются друг друга.

2.1 Исследование напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя во впадинах резьбы

2.1.1 Методика расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями

При определении остаточных напряжений экспериментальными методами получить полное трёхмерное распределение остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое крайне затруднительно. Поэтому, в данной работе предлагается феноменологический подход, позволяющий расчётным путём определить трёхмерное распределение остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностном слое впадин резьбы по одной экспериментально определённой компоненте остаточных напряжений. В основе расчёта была использована методика для определения полей остаточных напряжений и пластических деформаций в упрочнённом слое гладкой цилиндрической детали [121]. При этом для определения напряжённо-деформированного состояния во впадине резьбы было обращено внимание на следующие факторы. Из приведённой схемы (рисунок 2.1) видно, что гипотеза плоских сечений выполняется лишь во впадине резьбы – в наименьшем сечении.

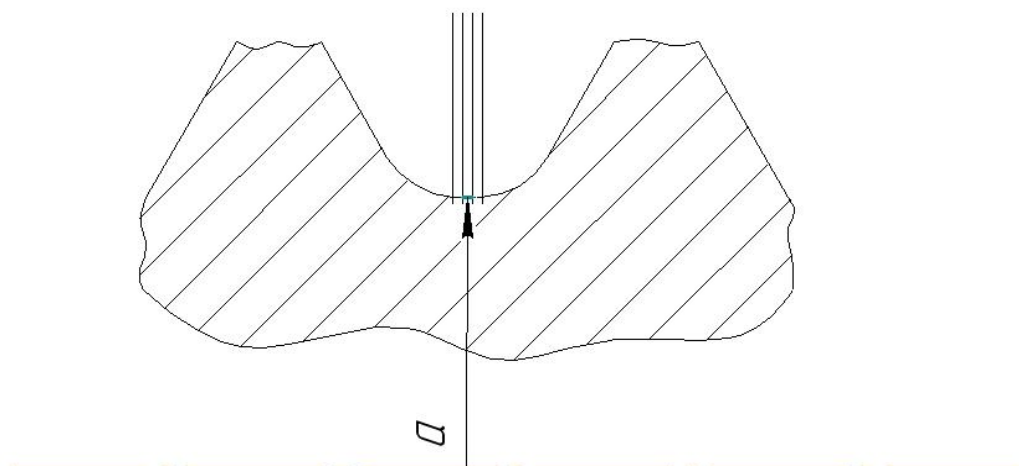


Рисунок 2.1 - Схема определения напряжённо-деформированного состояния во впадине резьбы

При этом, в силу симметрии данной задачи упрочнение будет происходить также, как в гладком образце с радиусом равным a . Кроме того, в методике [121] расчёт выполнен по известной величине окружных остаточных напряжений σ_{θ}^{res} , а в данном случае экспериментально определены значения осевых остаточных напряжений σ_z^{res} .

Для реализации предложенной математической модели были введены следующие допущения, обоснованные в [122, 123]:

- распределение пластических деформаций в поверхностном слое впадин резьбы происходит как в полуплоскости, т.е. $q_z = q_{\theta}$;
- так как по сравнению с нормальными напряжениями касательные напряжения малы (или отсутствуют), то можно принять их равными нулю.

Методика определения остаточных напряжений (σ_z^{res} - осевых, σ_{θ}^{res} - окружных, σ_r^{res} - радиальных) и остаточных пластических деформаций (q_z - осевых, q_{θ} - окружных, q_r - радиальных) реализуется следующим образом.

Остаточные напряжения $\sigma_r^{res}(r)$ и $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ можно выразить через уравнение равновесия

$$r \frac{d\sigma_r^{res}}{dr} + \sigma_r^{res} = \sigma_{\theta}^{res}. \quad (2.1)$$

Если умножить обе части равенства на dr , а затем проинтегрировать по r от середины образца до поверхности впадины (a – радиус образца до впадины резьбы (рисунок 2.1)), то с учётом условия, что образец не нагружен

$$\sigma_r^{res} \Big|_{r=a} = 0, \quad (2.2)$$

получаем, что эпюра напряжений $\sigma_{\theta(r)}^{res}$ самоуравновешена:

$$\int_0^a \sigma_{\theta}^{res}(r) dr = 0. \quad (2.3)$$

Теперь можно выразить $\sigma_r^{res}(r)$ следующим образом:

$$\sigma_r^{res}(r) = -\frac{1}{r} \int_r^a \sigma_{\theta}^{res}(z) dz. \quad (2.4)$$

С учетом условия (2.3) $\sigma_r^{res}(r)$ можно представить в следующем виде:

$$\sigma_r^{res}(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_{\theta}^{res}(z) dz. \quad (2.5)$$

Таким образом, по данной формуле можно вычислить значения радиальных остаточных напряжений $\sigma_r^{res}(r)$ по значениям остаточных напряжений $\sigma_{\theta}^{res}(r)$.

Определить значения осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(r)$ возможно лишь после определения остаточных пластических деформаций. Полную деформацию образца ε_i^0 после обработки можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_i^0 = e_i^0 + q_i, \quad i = \overline{r, \theta, z}, \quad (2.6)$$

где e_i^0 – тензор упругих деформаций,

q_i – тензор остаточных пластических деформаций.

Учитывая, что радиус впадины резьбы ($\rho = 0,15-0,20\text{мм}$) значительно меньше радиуса исследуемого образца, то в соответствии с принятой гипотезой, что пластические деформации образуются как в полуплоскости ($q_z = q_{\theta}$) и с учётом условия не сжимаемости при деформировании ($q_z + q_{\theta} + q_r = 0$), следует что

$$q_\theta = q_z = -\frac{q_r}{2}. \quad (2.7)$$

Теперь, с учётом (2.6) и уравнения совместности деформаций после преобразований можно получить для окружной компоненты следующее выражение:

$$r \frac{dq_\theta}{dr} + 3q_\theta = e_r^0 - r \frac{de_\theta^0}{dr} - e_\theta^0. \quad (2.8)$$

Из закона Гука можно выразить упругие деформации через остаточные напряжения

$$\begin{aligned} Ee_r^0 &= \sigma_r^{res} - \mu(\sigma_\theta^{res} + \sigma_z^{res}), \\ Ee_\theta^0 &= \sigma_\theta^{res} - \mu(\sigma_r^{res} + \sigma_z^{res}), \end{aligned} \quad (2.9)$$

где E – модуль продольной упругости;

μ – коэффициент Пуассона.

С учётом гипотезы плоских сечений резьбового образца получаем

$$e_z^0(r) + q_z(r) = \varepsilon_z^0 \quad (\varepsilon_z^0 = \text{const}, r \in [0; a]). \quad (2.10)$$

Если выразить e_z^0 через остаточные напряжения, то можно получить

$$\frac{\sigma_z^{res} - \mu(\sigma_r^{res} + \sigma_\theta^{res})}{E} + q_z = \varepsilon_z^0,$$

и, соответственно, выражая $\sigma_z^{res}(r)$ получаем

$$\sigma_z^{res}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \mu(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)). \quad (2.11)$$

Подставляя (2.11) в (2.9) получаем

$$\begin{aligned} Ee_r^0 &= (1 + \mu)[(1 - \mu)\sigma_r^{res} - \mu\sigma_\theta^{res}] - E\mu(\varepsilon_z^0 - q_z), \\ Ee_\theta^0 &= (1 + \mu)[(1 - \mu)\sigma_\theta^{res} - \mu\sigma_r^{res}] - E\mu(\varepsilon_z^0 - q_z). \end{aligned} \quad (2.12)$$

С учётом уравнений (2.7) и (2.12) и обозначив через $f = e_r^0 - r \frac{de_\theta^0}{dr} - e_\theta^0$

получим

$$f = e_r^0 - e_\theta^0 - r \frac{de_\theta^0}{dr} = \frac{1 + \mu}{E}(\sigma_r^{res} - \sigma_\theta^{res}) - r \frac{1 + \mu}{E} \left[(1 - \mu) \frac{d\sigma_\theta^{res}}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{res}}{dr} \right] - \mu \cdot r \frac{dq_z}{dr}. \quad (2.13)$$

Далее уравнение (2.8) можно представить в виде

$$r \frac{dq_0}{dr} + \frac{3}{1+\mu} q_0 = g(r), \quad (2.14)$$

При этом

$$g(r) = \frac{\sigma_r^{res}(r) - \sigma_\theta^{res}(r)}{E} - \frac{r}{E} \left[(1-\mu) \frac{d\sigma_\theta^{res}(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{res}(r)}{dr} \right]. \quad (2.15)$$

Общее решение дифференциального уравнения (2.14) можно представить следующим образом:

$$q_0(r) = \frac{1}{r^{\frac{3}{1+\mu}}} \left[\int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(z) dz + C \right]. \quad (2.16)$$

Так как при нарезании резьбы упрочняется поверхностный слой на небольшую глубину (около 0,2мм), то на поверхности можно ввести следующую гипотезу:

$$\lim_{r \rightarrow 0} q_0(r) = 0. \quad (2.17)$$

После преобразований, используя правило Лопиталя, получаем

$$q_0(r) = \frac{1}{r^{\frac{3}{1+\mu}}} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(z) dz. \quad (2.18)$$

Откуда с учетом (2.15) получаем

$$\begin{aligned} q_0(r) &= \frac{1}{Er^{\frac{3}{1+\mu}}} \int_0^r \left\{ z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} [\sigma_r^{res}(z) - \sigma_\theta^{res}(z)] - z^{\frac{3}{1+\mu}} \left[(1-\mu) \frac{d\sigma_\theta^{res}(z)}{dz} - \mu \frac{d\sigma_r^{res}(z)}{dz} \right] \right\} dz = \\ &= \frac{1}{Er^{\frac{3}{1+\mu}}} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} \left[\sigma_r^{res}(z) - \sigma_\theta^{res}(z) + 3 \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)} \sigma_\theta^{res}(z) - \frac{3\mu}{1+\mu} \sigma_r^{res}(z) \right] dz - \\ &\quad - \frac{1-\mu}{E} \sigma_\theta^{res}(z) + \frac{\mu}{E} \sigma_r^{res}(z), \end{aligned}$$

или

$$q_0(r) = \frac{1-2\mu}{E(1+\mu r^{\frac{3}{1+\mu}})} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} [\sigma_r^{res}(z) + 2\sigma_\theta^{res}(z)] dz - \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_\theta^{res}(r) - \mu\sigma_r^{res}(r)]. \quad (2.19)$$

Таким образом, пластические деформации определены полностью.

Далее необходимо найти ε_z^0 . Так как суммарное осевое усилие, действующее на образец, равно нулю, то

$$\int_0^a r \sigma_z^{res}(r) dr = 0. \quad (2.20)$$

Умножая (2.11) на r и интегрируя в пределах от 0 до a при условии (2.20) имеем:

$$E \left[\varepsilon_z^0 \frac{a^2}{2} - \int_0^a r q_z(r) dr \right] + \mu \int_0^a r [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] dr = 0.$$

Теперь можно выразить ε_z^0

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] \right\} dr. \quad (2.21)$$

Имея значения ε_z^0 по формуле (2.11) можно определить значения остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(r)$. В результате получаем следующую схему реализации данного метода:

$$\sigma_\theta^{res}(r) \xrightarrow{(2.5)} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{(2.19)} q_\theta(r) \xrightarrow{(2.7)} q_z, q_r \xrightarrow{(2.21)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(2.11)} \sigma_z^{res}(r)$$

В заключение следует отметить следующее. Так как имеется экспериментальное значение осевой компоненты остаточных напряжений, то расчёт проводился следующим образом. Последовательно задавали значения окружных остаточных напряжений $\sigma_\theta^{res}(r)$ и осуществляли расчёт до тех пор, пока отклонение экспериментальных и теоретических (расчётных) значений осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(r)$ не будут минимальными.

Данная методика была реализована в следующем виде. Экспериментальным путем были получены значения остаточных напряжений в осевом направлении. В качестве примера возьмем распределение осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке титанового слоя ВТ9 с радиальными ультразвуковыми колебаниями (рисунок 2.2).

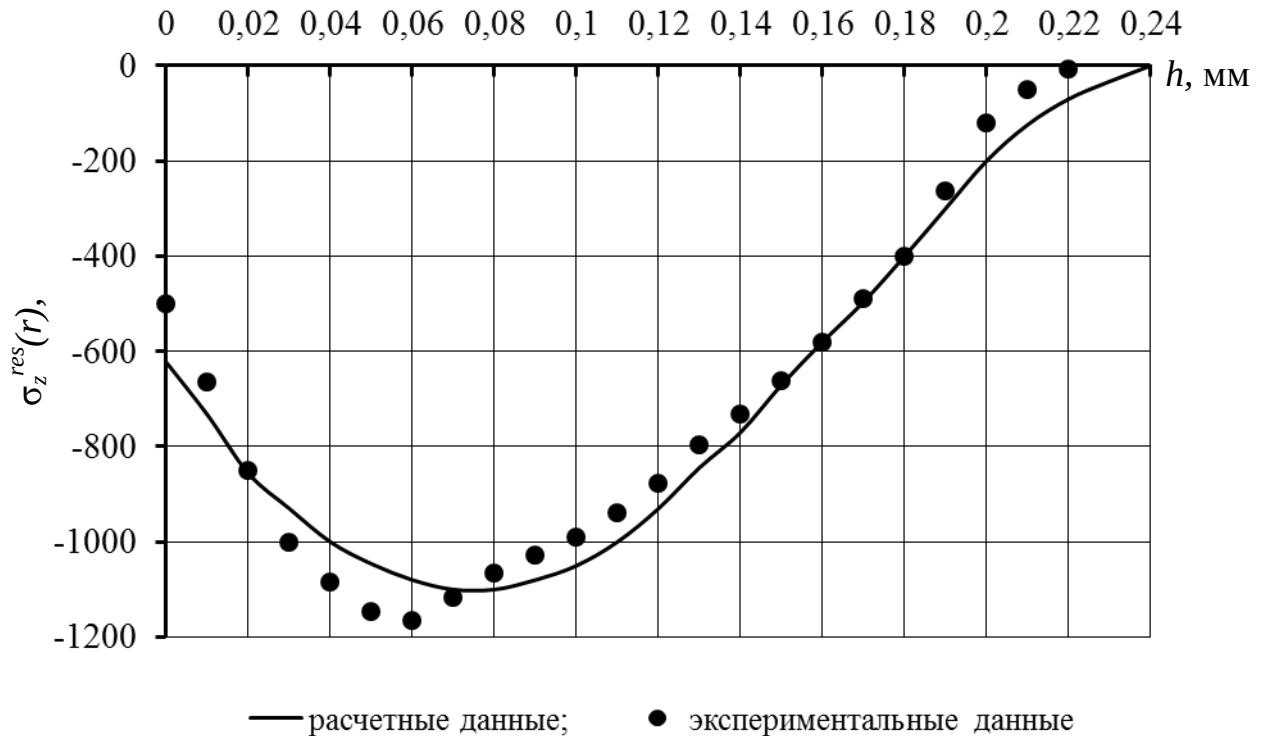


Рисунок 2.2 - Эпюра остаточных напряжений $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ при обработке титанового сплава ВТ9 с радиальными колебаниями

Так как экспериментальным путём было получено распределение остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое, то необходимо экстраполировать значения остаточных напряжений в область растяжения, а также на самую поверхность. При экспериментальном определении остаточных напряжений при помощи травления поверхностного слоя стабилизация процесса начинается не сразу, а через определенный промежуток времени, обычно с глубины 0,01мм. Поэтому, значения остаточных напряжений на самой поверхности также получены путём экстраполяции. Для удобства расчёта опытные данные аппроксимировались при помощи аналитической функции

$$\sigma_{\theta}^{\text{res}}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R - h^* - r)^2}{b^2}\right). \quad (2.22)$$

Описать кривую остаточных напряжений можно при помощи констант σ_0 ,

σ_1, b . Таким образом, при аппроксимации экспериментальных данных базовыми являются три точки:

- значение остаточных напряжений на поверхности (получены методом экстраполяции опытных данных);
- значение экстремума функции (минимальные значения остаточных напряжений σ^* на некоторой глубине);
- значение глубины, при которой остаточные напряжения равны нулю и далее меняют свой знак на противоположный (в нашем случае сжимающие напряжения переходят в растягивающие и в данной точке они равны нулю).

Следовательно, $\sigma_\theta^{res}(r^*) = \sigma^*$, $\sigma_\theta^{res}(r_0) = 0$ и $\int_0^R \sigma_\theta^{res}(r) dr = 0$. Далее численно определяем параметры σ_0, σ_1, b .

В нашем случае известна величина $\sigma_z^{res}(r)$, поэтому варьируются параметры r_0, r^*, σ^* до тех пор, пока не будет достигнут минимум функционала нормированного среднеквадратического отклонения расчётных значений от экспериментальных

$$\Delta = \left[\frac{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^{res}(r_k) - \sigma_z^{res*}(r_k)]^2}{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^{res*}(r_k)]^2} \right]^{1/2}, \quad (2.23)$$

где N – число экспериментальных точек.

Полученные расчётным путем значения остаточных напряжений и пластических деформаций представлены далее. \

2.2 Влияние ультразвуковых колебаний на остаточные напряжения при резбонарезании

При нарезании резьбы лезвийным инструментом в поверхностном слое резьбового профиля обрабатываемой детали возникает определённое напряжённо-деформированное состояние, характеризуемое деформационным упрочнением

поверхности и образованием остаточных напряжений. При резании металла возникает пластическая деформация срезаемого поверхностного слоя, а дополнительные ультразвуковые колебания, сообщаемые резбообразующему инструменту, оказывают значительное влияние, как на пластическую деформацию материала, так и остаточные напряжения.

2.2.1 Методика определения остаточных напряжений при нарезании наружных резьб малого диаметра

Наиболее распространенным методом определения остаточных напряжений в поверхностном слое изделий является метод колец и полосок, так как он позволяет получить достаточно точное распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Этот метод широко используется для гладких цилиндрических деталей, а также применим для резьб М16 и более. Однако, при измерении остаточных напряжений малого диаметра М3-М12 возникают проблемы, связанные с снижением точности измерений из-за уменьшения значений измеряемых перемещений в следствии маленьких диаметров вырезанных колец. Поэтому, для определения остаточных напряжений в резьбовых образцах малого диаметра была применена специальная методика [103]. В соответствии с этой методикой удаляются химическим травлением слои материала с половины криволинейной поверхности нескольких впадин резьбы (не менее 6 впадин) и измеряются возникающие при этом перемещения резьбового образца за счет деформаций, вызванных в результате удаления напряжённого поверхностного слоя определённой толщины. Так как, разрушение резьбовых деталей происходит во впадинах резьбы (в наименьшем сечении образца), которые являются концентраторами напряжений, то имеет смысл определить остаточные напряжения, действующие в этом сечении. При этом можно сделать следующее допущение, что касательные напряжения равны нулю, так как они очень незначительны. Возникающие деформации и перемещения образца

приведены на схеме, приведенной на рисунке 2.3. При этом впадина резьбы схематично заменена кольцевой выточкой, так как угол подъема витков резьбы имеет малые значения.

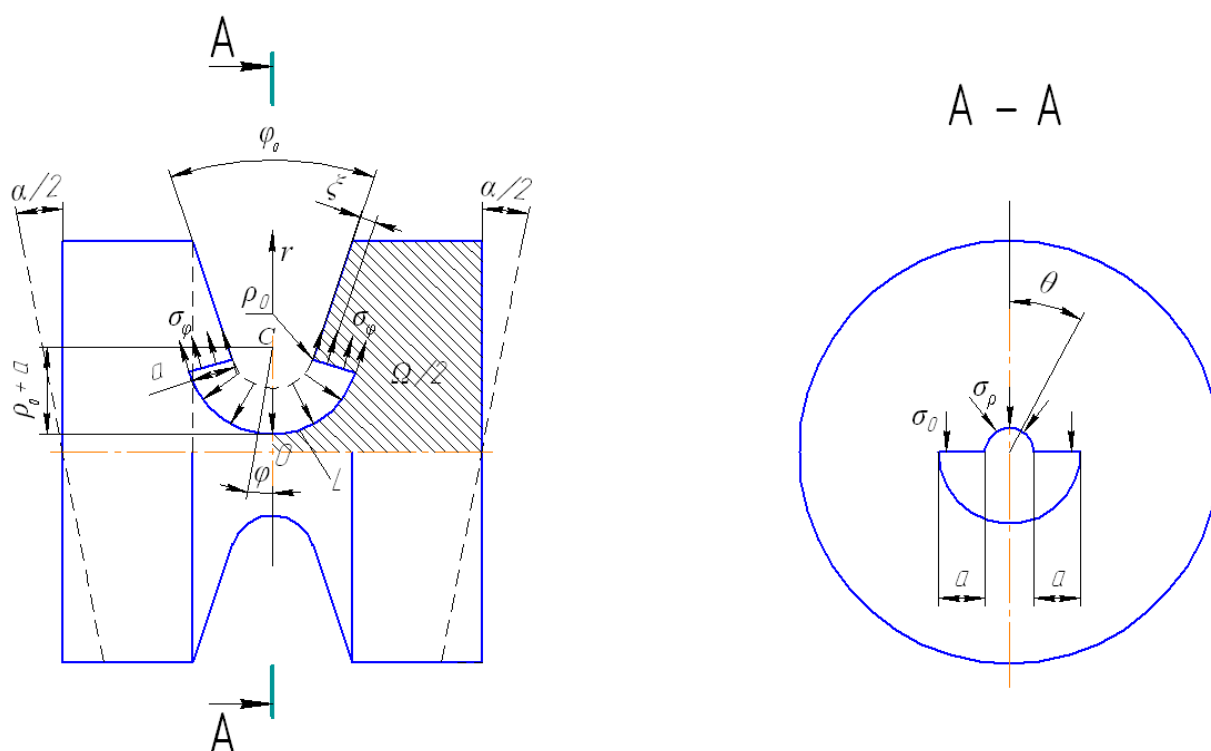


Рисунок 2.3 - Схема определения остаточных напряжений

Резьбовые образцы подготавливались следующим образом. Производилось нарезание наружных резьб М5, М6, М8, так как они являются наиболее распространенными и обладают меньшими прочностными характеристиками по сравнению с резьбами большего диаметра, с помощью специальных резьбонарезных устройств, разработанных в СамГТУ, на калиброванных или специально обработанных прутках длиной 100мм из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9 и ВТ16, высокопрочной стали 30ХГСА и нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Для достоверности полученных результатов осуществлялось нарезание резьбы на пяти образцах с одинаковыми режимами, при этом резьба нарезалась с двух сторон, что позволило получить десять значений для каждого проведенного опыта. Затем проводилась статистическая обработка результатов исследования и

строились зависимости, приведенные далее. Статистическая обработка результатов осуществлялась по ГОСТ 8.207-76. На рисунке 2.4 показано нарезание резьбы круглыми плашками из быстрорежущей стали Р6М5 с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении. Режимы обработки: скорость резания – $V = 0,8-1,2$ м/мин.; резонансная частота – $f_r = 19890$ Гц, подача совпадала с шагом нарезаемой резьбы, так как в ультразвуковом устройстве имеется возможность телескопического выдвижения рабочей части; амплитуда колебаний изменялась в пределах $\xi = 0-5$ мкм.

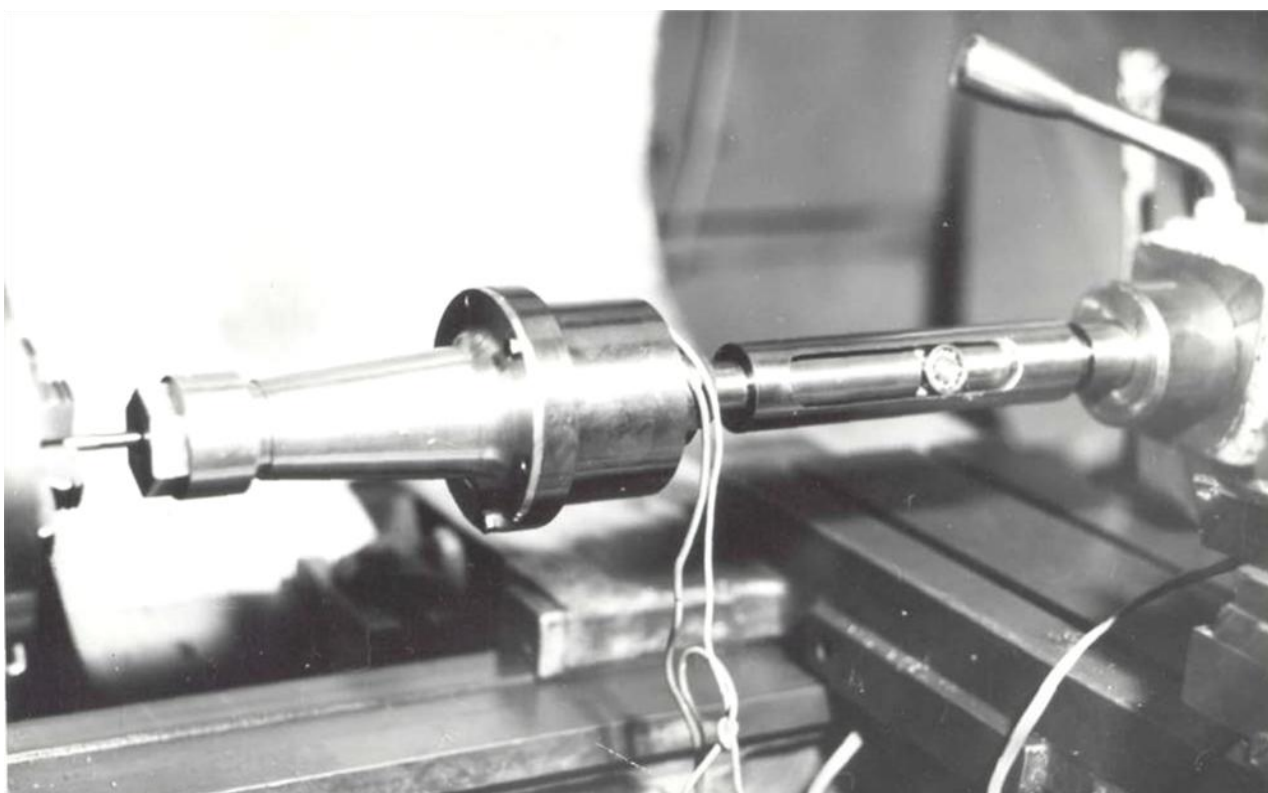


Рисунок 2.4 -Нарезание наружной резьбы круглой плашкой с осевыми ультразвуковыми колебаниями при помощи специального ультразвукового устройства

Нарезание резьб с тангенциальными или радиальными ультразвуковыми колебаниями проводилось резьбовым резцом с пластиной из твердого сплава ВК8 при помощи другого ультразвукового устройства (рисунок 2.5). Режимы

обработки: скорость резания – $V = 0,8-1,2$ м/мин.; резонансная частота – $f_r = 19860$ Гц, продольная подача в соответствии с шагом нарезаемой резьбы; глубина резания $t = 0,05-0,35$ мм; амплитуда колебаний изменялась в пределах $\zeta = 0-5$ мкм.

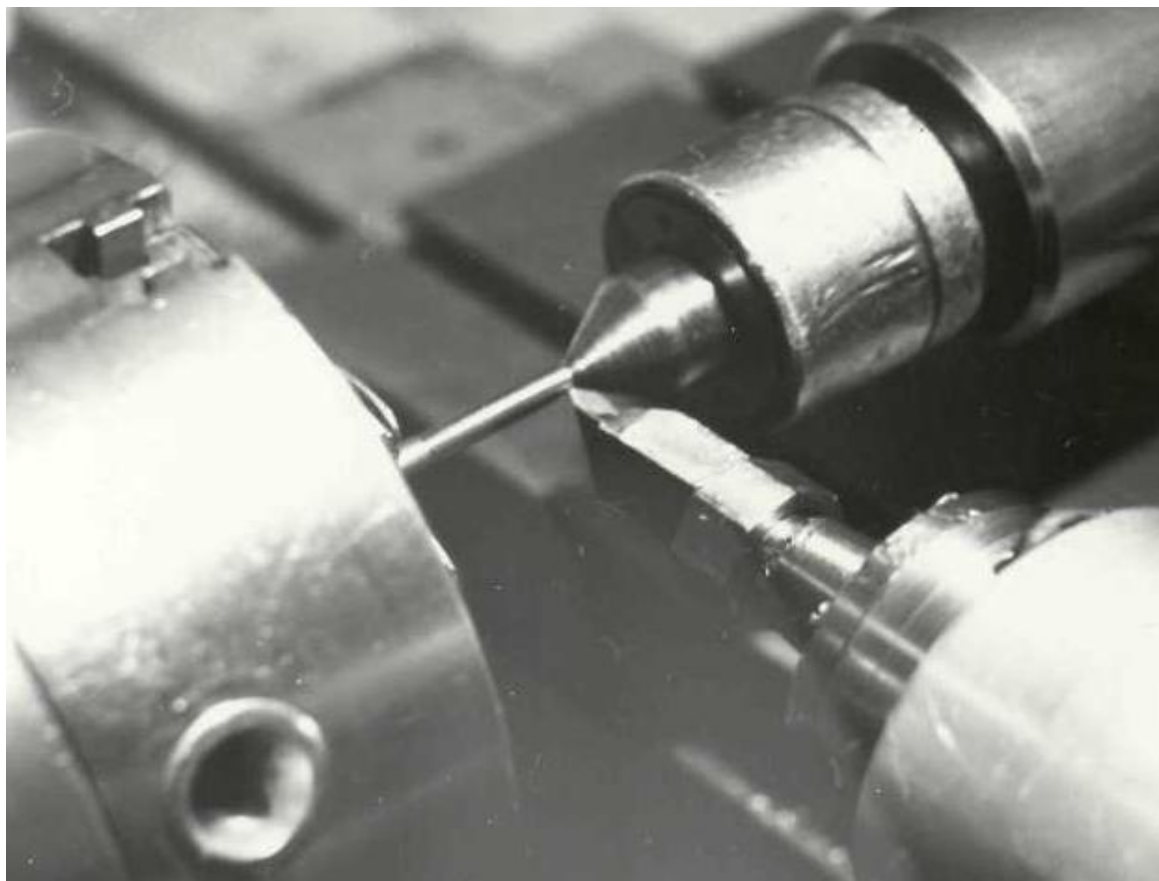
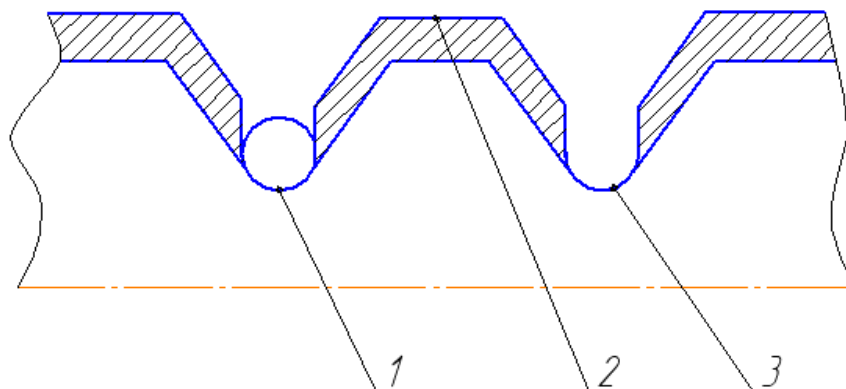


Рисунок 2.5 – Нарезание резьбы резцом с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Таким образом, производилось нарезание резьб на образцах из исследуемых материалов с введением в зону резания тангенциальных, осевых или радиальных ультразвуковых колебаний. Для сравнительной оценки проводилось нарезание резьб без применения ультразвука. При этом остальные технологические параметры обработки не изменялись. Далее полученные шпильки с резьбой покрывались защитным лаком. После высыхания лака при помощи лески

(рисунок 2.6) соответствующего диаметра (по впадине резьбы) удалялся лак с половины криволинейной поверхности впадин резьбового образца (не менее чем с шести впадин).



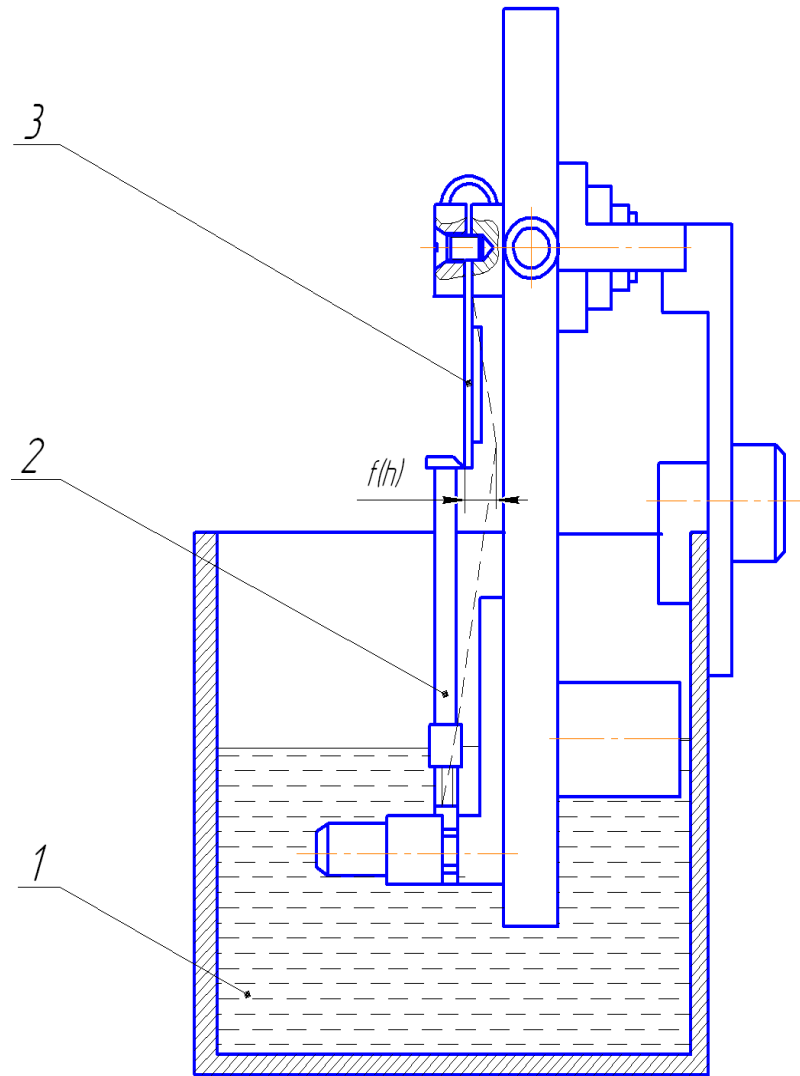
1 – леска; 2 – лак; 3 – впадина с удалённым лаком

Рисунок 2.6 - Схема подготовки образцов для травления

Для различных материалов применялись различные химические составы электролита.

Для титановых сплавов использовался следующий химический состав: H_3PO_4 – 12%, HF – 10%, CrO_3 – 2%, H_2O – 76%. Для высокопрочной стали 30ХГСА использовался следующий химический состав: HNO_3 – 30%, H_2O – 70%. Для нержавеющей стали 12Х18Н9Т использовался следующий химический состав: H_3PO_4 – 60%, H_2SO_4 – 29%, CrO_3 – 1%, H_2O – 10%.

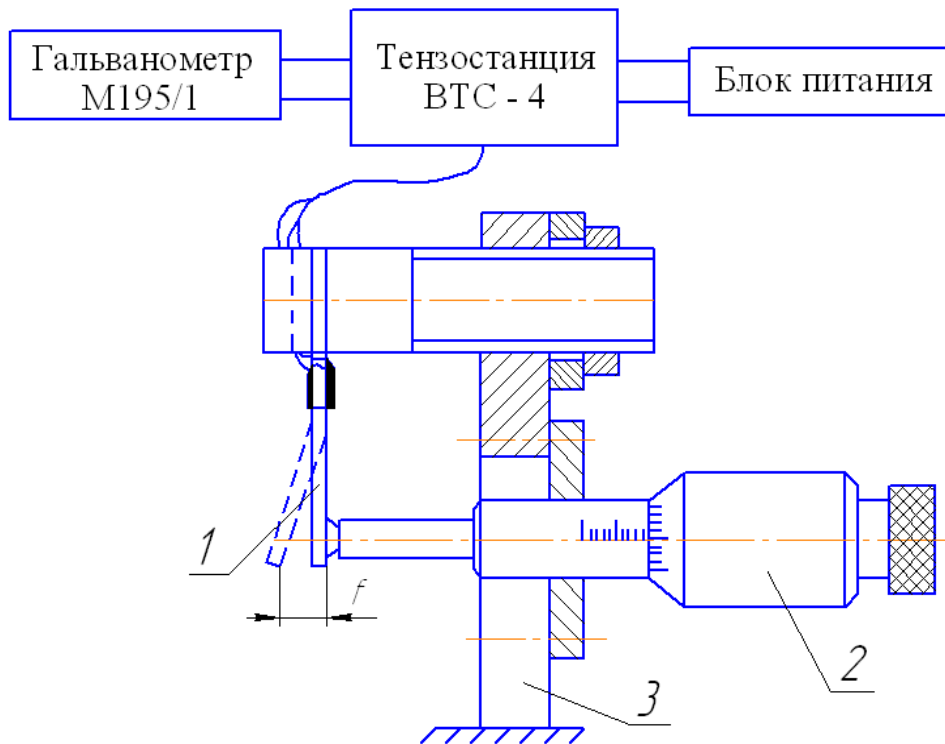
Подготовленное приспособление с образцом (рисунок 2.7) опускалось в ванную с электролитом 1, при этом уровень электролита должен быть выше зоны травления. Установка образца с удлинителем производилась таким образом, чтобы измерительная тензобалочка 3 подводилась к удлинителю 2, закрепленному на образце, с небольшим натягом.



1 - электролит; 2 - резьбовой образец с удлинителем; 3 - тензобалочка

Рисунок 2.7 - Приспособление для травления образцов и измерения перемещений

При травлении образцов происходит перемещение измерительной балочки, что приводит к деформации наклеенной на ней тензорезисторов и изменению сопротивления. Регистрация данных осуществлялась при помощи тензостанции ВСТ-4 и гальванометра М195/1. В протокол испытаний заносились показания гальванометра через каждые три минуты. Процесс травления осуществлялся до остановки показаний гальванометра. После травления образцов производилась тарировка установки при помощи микрометра. Схема тарировки показана на рисунке 2.8



1 – тензобалочка; 2 – микрометр; 3 - основание

Рисунок 2.8 – Схема тарировки установки для травления резьбовых образцов

При этом микрометр устанавливался в зону контакта удлинителя с тензобалочкой. Затем микрометром задавали перемещение f_i и регистрировали соответствующие показания гальванометра A_i . По полученным данным строился тарировочный график.

После травления образца измерялся внутренний диаметр $d_{вн}^T$ и вычислялась толщина удаленного слоя $h = d_{вн} - d_{вн}^T$ (рисунок 2.9).

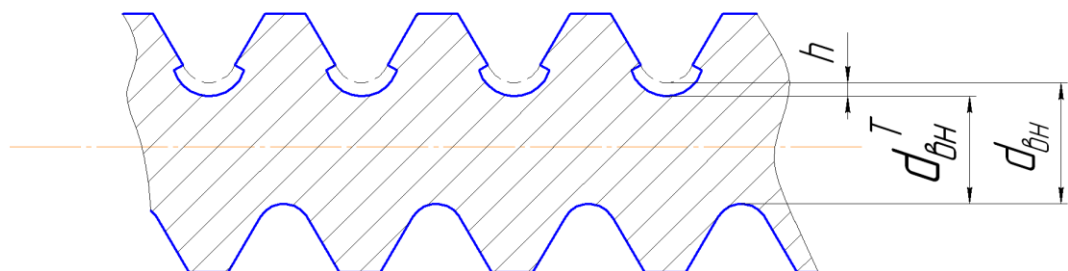


Рисунок 2.9 - Измерение толщины слоя, удаленного травлением

Далее определялась скорость травления по формуле:

$$V = h/\tau, \quad (2.24)$$

где τ – полное время травления образца, мин.

После вычислялись перемещения образца $f(h)_i = T_k \cdot A_i$ по глубине удаленного слоя $h_i = V\tau_i$ (Рисунок 2.10);

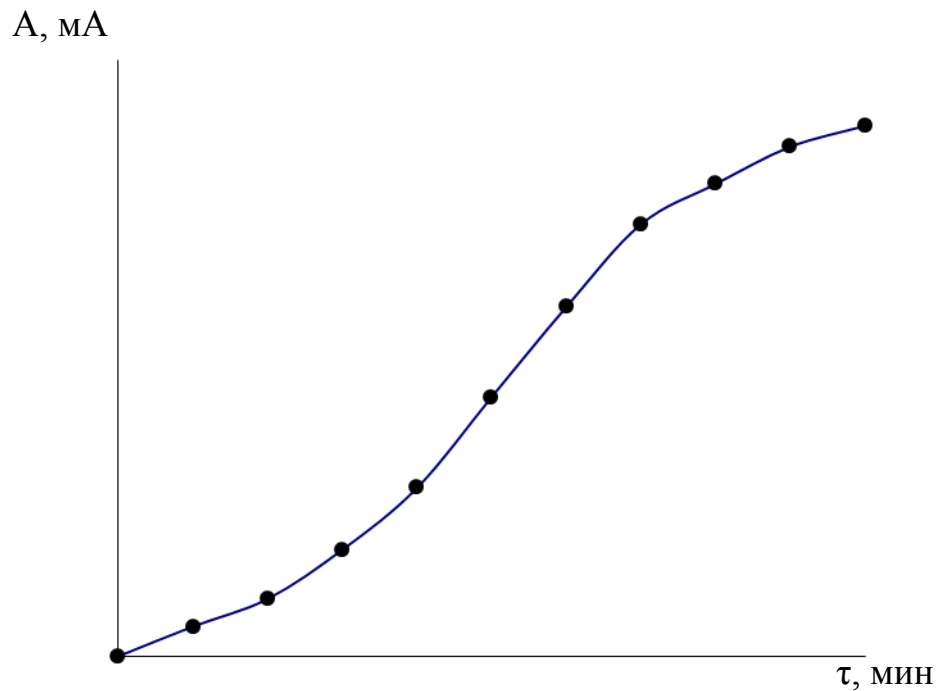


Рисунок 2.10 – Показания гальванометра в зависимости от времени травления

Затем строилась деформационная кривая $f(h)$ по глубине удаленного слоя h . В точках h_j проводились касательные к деформационной кривой и вычислялись производные во всех точках $\left[\frac{df(h)}{d(h)} \right]_j = \operatorname{tg} \alpha_j$ (рисунок 2.11).

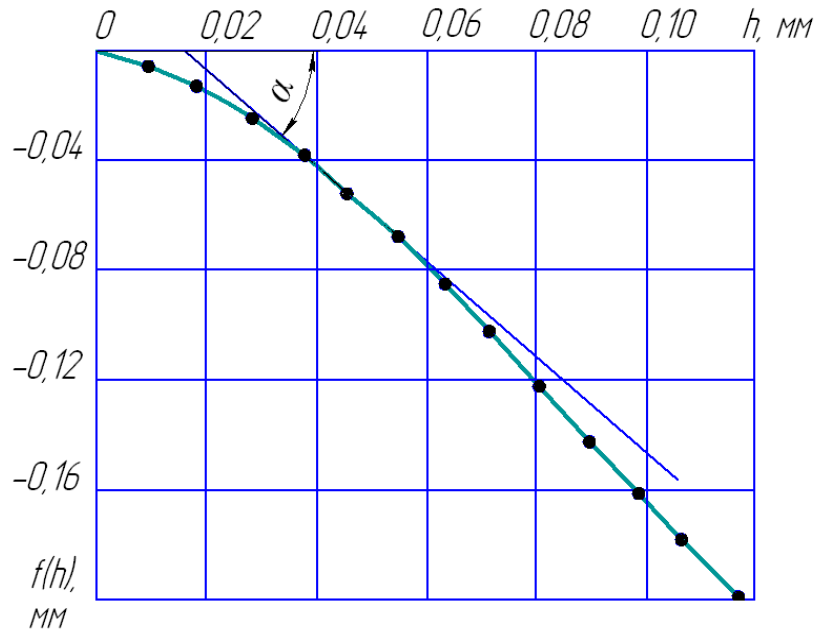


Рисунок 2.11 - Определение производной $\left[\frac{df(h)}{d(h)} \right]_j = \operatorname{tg} \alpha_j$

Осевые (σ_z^{res}) остаточные напряжения определялись по формуле:

$$\sigma_z^{res}(h_j) = \frac{C}{X_P(h_j)} \left[\frac{df(h)}{d(h)} \right]_j, \quad (2.25)$$

где $X_P(h_j)$ – коэффициент, учитывающий масштабный фактор;

$f(h)$ – перемещение образца;

h – толщина поверхностного слоя;

C – коэффициент, зависящий от материала и длины образца, который определяется по зависимости:

$$C = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu) \left[(L - l) \frac{l}{P} + \frac{l^2}{2P} \right]}, \quad (2.26)$$

где E – модуль продольной упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

L – длина образца с удлинителем;

l – длина образца;

P – шаг резьбы.

Следует отметить, что значение меридиональных остаточных напряжений

при малых углах φ близки к осевым остаточным напряжениям, поэтому в дальнейшем были приняты осевые остаточные напряжения. Для определения осевых остаточных напряжений использовались следующие данные: d – наружный диаметр резьбового образца; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр резьбы исследуемого образца; P – шаг нарезаемой резьбы; ρ_0 – радиус впадин резьбы; E – модуль продольной упругости; μ – коэффициент Пуассона; L – общая длина образца с удлинителем, измеренная от середины первой травлёной впадины до упора тензобалочки; $l = nP$ – длина участка на котором производилось травление; n – число впадин резьбы, в которых производилось травление; τ – время травления резьбового образца; T_k – тарировочный коэффициент.

По вышеприведённой методике строились зависимости полученных остаточных напряжений в поверхностном слое резьбовых образцов. На рисунке 2.12 приведен пример построения зависимости, с учётом статистической обработки результатов исследования.

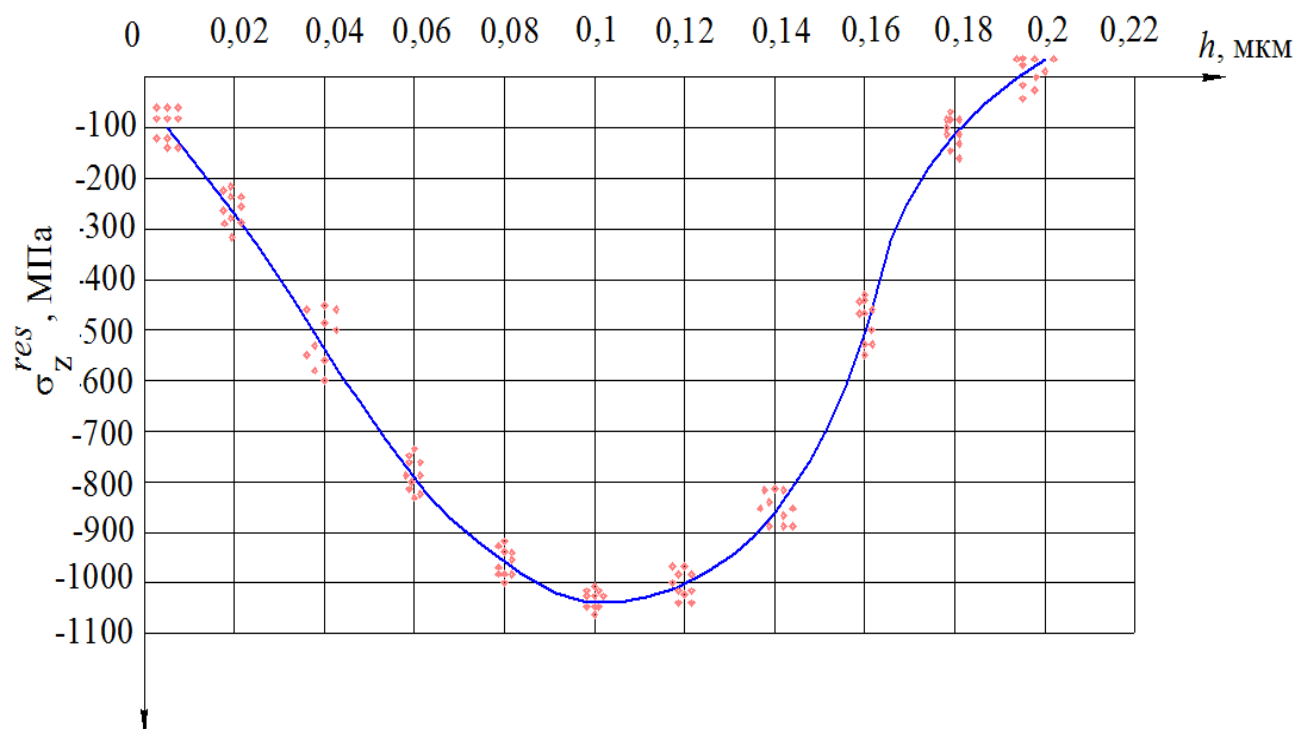


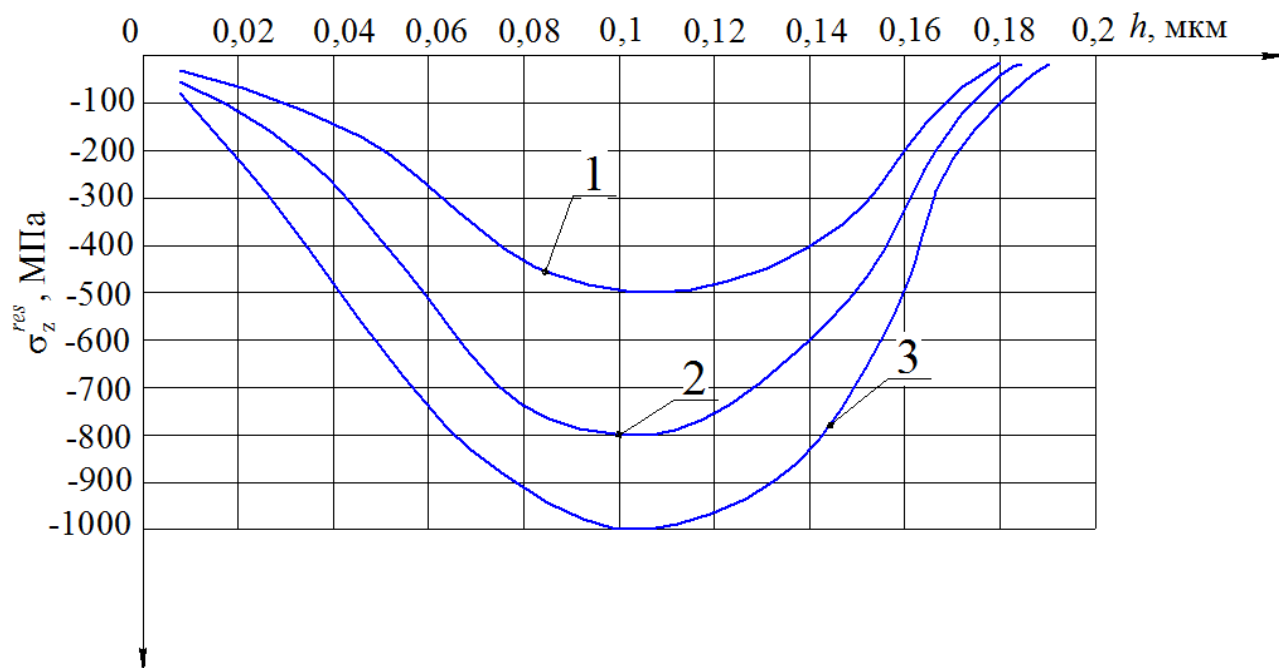
Рисунок 2.12 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое при нарезании резьбы М6 в титановом сплаве ВТ16 с осевыми ультразвуковыми колебаниями

Далее представлены средние значения остаточных напряжений для каждой партии резбовых образцов. В каждой партии исследовалось десять резб, нарезанных с двух сторон на пяти образцах.

Результаты исследования влияния ультразвука на формирование осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы представлены в следующем разделе.

2.2.2 Результаты исследования влияния ультразвука на формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резбовых деталей

В результате выполненных экспериментальных исследований были получены зависимости распределения осевых остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя h . Остаточные напряжения определялись в наименьшем сечении образца, а именно во впадине резьбы. При проведении исследований изменялись следующие параметры ультразвукового воздействия – амплитуда ξ и направление колебаний, так как они оказывают значительное влияние на значения и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых изделий. На рисунке 2.13 приведено распределение осевых остаточных напряжений при нарезании резьбы М6 на образцах из титанового сплава ВТ16 с осевыми ультразвуковыми колебаниями. Нарезание резьбы осуществлялось круглой плашкой со скоростью резания $V = 1$ м/мин, продольная подача осуществлялась по методу «самозатягивания», резонансная частота ультразвуковых колебаний $f_r = 18950$ Гц. В процессе обработки изменялась амплитуда колебаний в пределах $\xi = 0-5$ мкм.



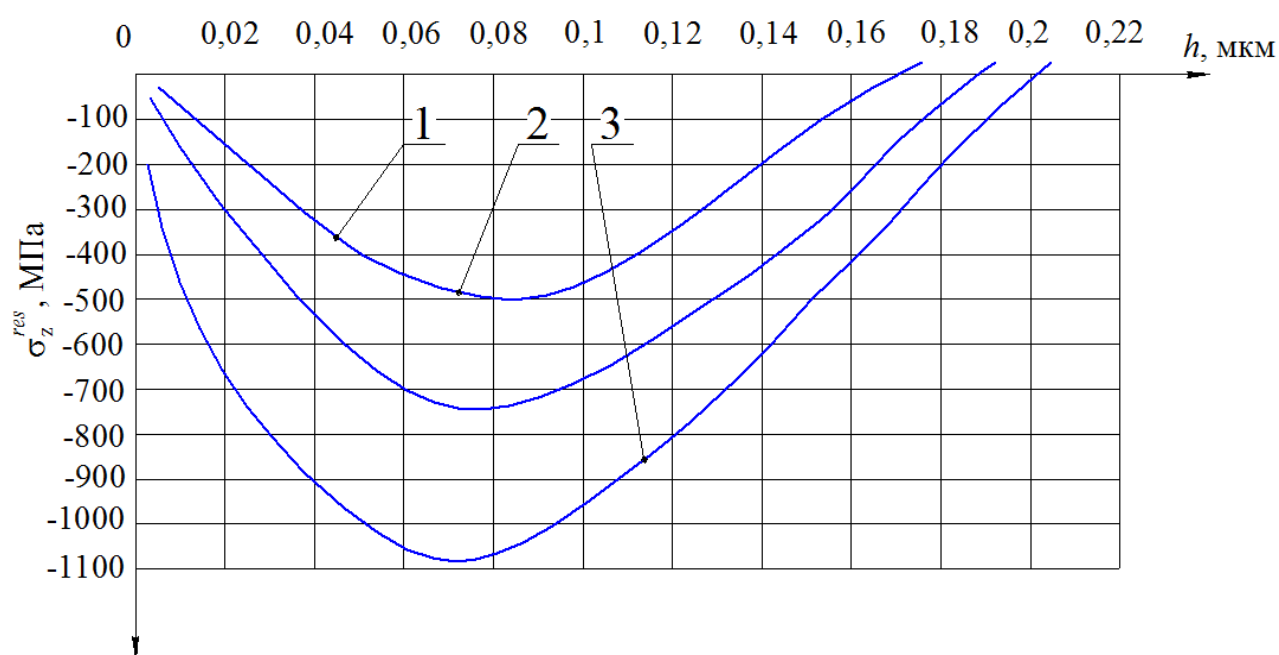
1 – $\xi = 0$ мкм; 2 – $\xi = 3$ мкм; 3 – $\xi = 5$ мкм

Рисунок 2.13 - Распределение остаточных напряжений при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении

Из приведённых зависимостей следует, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний в осевом направлении приводит к формированию в поверхностном слое глубиной до 0,2 мм остаточных напряжений сжатия. наиболее значимым является то, что по сравнению с обработкой без ультразвука сжимающие остаточные напряжения значительно увеличиваются – почти в 2 раза. Так при нарезании резьбы без ультразвука они равны 500 МПа, а при наложении колебаний в осевом направлении с амплитудой раной 3 мкм увеличиваются до 800 МПа, а дальнейшее увеличение амплитуды колебаний до 5 мкм позволяет достичь значений сжимающих остаточных напряжений равных 1000 МПа. Таким образом, увеличение амплитуды колебаний до значений порядка 5 мкм при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями приводят к увеличению сжимающих остаточных напряжений почти в два раза по сравнению с обработкой без ультразвука.

На рисунке 2.14 показано распределение осевых остаточных напряжений при нарезании резьбы М6 на образцах из титанового сплава ВТ16 с радиальными

ультразвуковыми колебаниями. Нарезание осуществлялось резбовым резцом, оснащенным твердосплавной пластиной ВК8 (режимы обработки: скорость резания $V = 1$ м/мин; продольная подача $S = 1$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфофрезол; резонансная частота $f_r = 18830$ Гц). В процессе обработки также изменялась амплитуда ультразвуковых колебаний.



1 – $\xi = 0$ мм; 2 – $\xi = 3$ мм; 3 – $\xi = 5$ мм

Рисунок 2.14 - Распределение остаточных напряжений при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Из представленных данных видно, что при нарезании резьбы без ультразвука максимальные сжимающие остаточные напряжения формируются на глубине 0,09 мм и достигают значений (по модулю) 500 МПа. При увеличении амплитуды колебаний до 3 мм сжимающие остаточные напряжения также растут и достигают величины (по модулю) 720 МПа на глубине залегания 0,07 мм. При обработке с амплитудой колебаний равной 5 мм возможно получить значения сжимающих остаточных напряжений 1100 МПа уже на глубине залегания 0,06 мм. На основании выше изложенного можно сделать вывод о том, что в

данном случае (при применении радиальных колебаний) увеличение амплитуды колебаний до 5 мкм приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений и максимум располагается ближе к обработанной поверхности.

На рисунке 2.15 показано распределение осевых остаточных напряжений при нарезании резьбы М6 на образцах из титанового сплава ВТ16 с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями (режимы обработки: скорость резания $V = 1$ м/мин; продольная подача $S = 1$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфохрезол; резонансная частота $f_r = 18830$ Гц). В процессе обработки также изменялась амплитуда ультразвуковых колебаний.

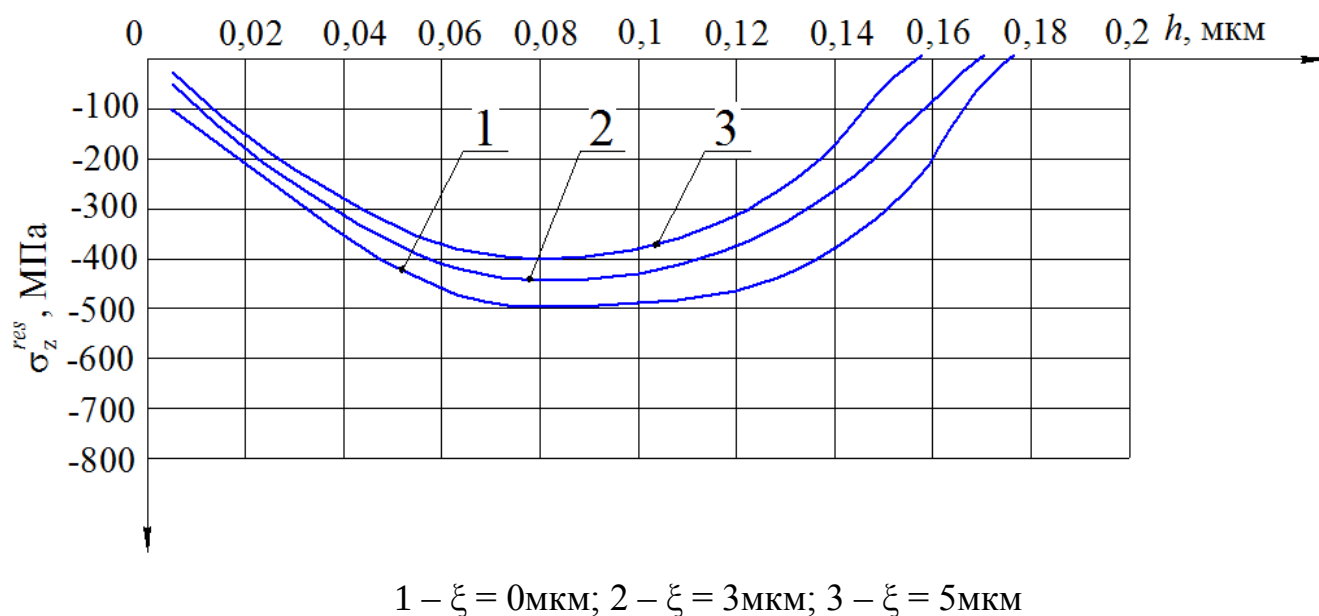


Рисунок 2.15 - Распределение остаточных напряжений при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении

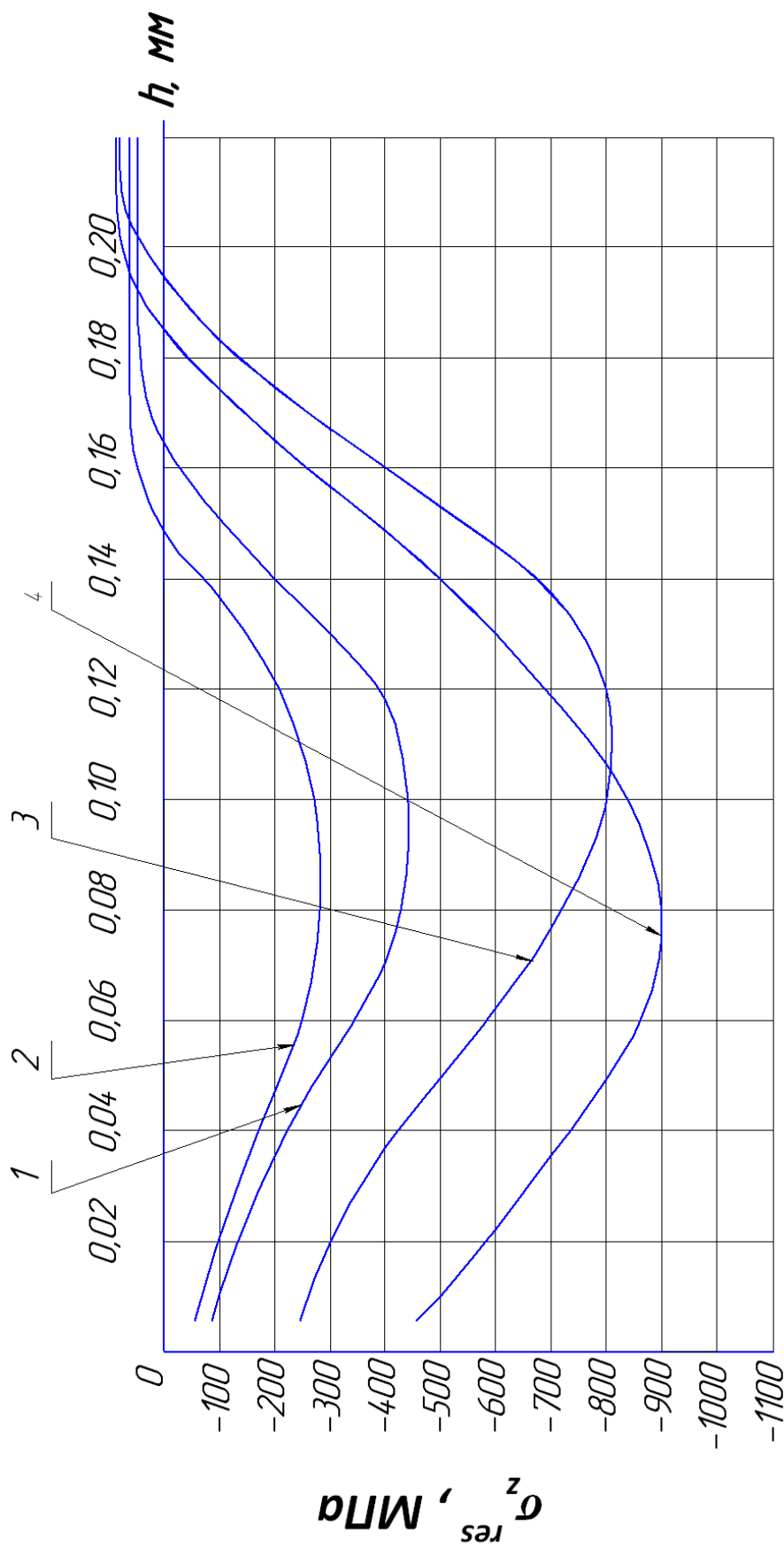
Из полученных данных видно, что при обработке с амплитудой 3 мкм максимальные сжимающие остаточные напряжения уменьшились до значений 450 МПа (при обработке без ультразвуковых колебаний максимальные сжимающие остаточные напряжения равны 500 МПа), а при обработке с амплитудой колебаний 5 мкм получили максимальные значения сжимающих остаточных напряжений равные 400 МПа на глубине залегания 0,08 мм. Таким

образом, было установлено, что с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний эффективность ультразвукового воздействия увеличивается.

В дальнейшем нарезание резьбы при проведении исследований производилось с амплитудой ультразвуковых колебаний равной 5 мкм.

На рисунке 2.16 представлено распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М5 при нарезании резьбы на образцах из титанового сплава ВТ3-1 (режимы резания: скорость резания $V = 0,8$ м/мин; продольная подача $S = 0,8$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфофрезол; резонансная частота $f_r = 19760$ Гц при обработке с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями и $f_r = 19900$ Гц при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм).

Из представленных зависимостей видно, что во всех случаях обработки формируются сжимающие остаточные напряжения. При нарезании резьбы без ультразвука около поверхности остаточные напряжения равны $\sigma_z^{res} = -70$ МПа, на глубине залегания 0,08-0,11 мм достигают значений $\sigma_z^{res} = -440$ МПа, на глубине 0,16-0,17 мм $\sigma_z^{res} = 0$ МПа и переходят в растягивающие до величины $\sigma_z^{res} = 40$ МПа. Введение в зону резания тангенциальных ультразвуковых колебаний приводит к уменьшению (по модулю) значений сжимающих остаточных напряжений. При этом получили следующие данные: около поверхности $\sigma_z^{res} = -40$ МПа, максимальные на глубине 0,08-0,09 мм равны $\sigma_z^{res} = -280$ МПа, при глубине 0,15 они равны $\sigma_z^{res} = 0$ МПа, а далее они становятся растягивающими и равны $\sigma_z^{res} = 50$ МПа. Совершенно иное распределение наблюдается при наложении на инструмент радиальных или осевых ультразвуковых колебаний. При обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями остаточные напряжения около поверхности равны $\sigma_z^{res} = -220$ МПа, затем происходит резкий рост (по модулю) сжимающих остаточных напряжений



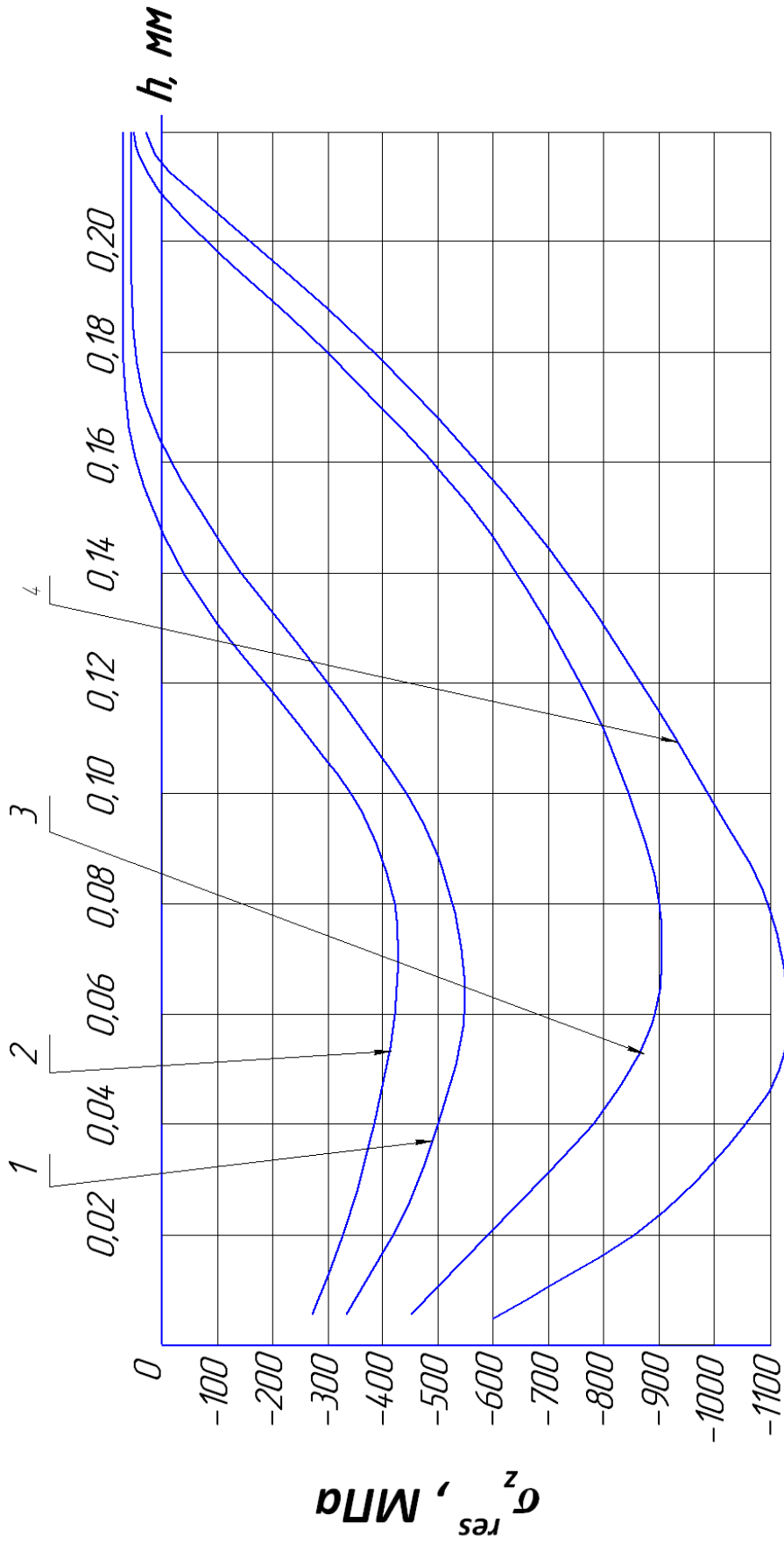
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.16 – Распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М5 (обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ3-1)

и на глубине залегания 0,11 мм они достигают значений $\sigma_z^{res} = -810$ МПа, затем остаточные напряжения на глубине 0,19-0,20 мм равны $\sigma_z^{res} = 0$ МПа и становятся растягивающими $\sigma_z^{res} = 70$ МПа. Дальнейшее увеличение сжимающих остаточных напряжений имеет место при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями. В этом случае около поверхности остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -440$ МПа, а уже на глубине залегания 0,07-0,08 мм имеют максимальное (по модулю) значение $\sigma_z^{res} = -900$ МПа, далее происходит уменьшение до нуля на глубине 0,18-0,19 мм и переход в зону растягивающих остаточных напряжений равных $\sigma_z^{res} = 80$ МПа. Таким образом, при обработке с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями удалось сформировать в поверхностном слое впадин резьбы значительные сжимающие остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -900$ МПа и $\sigma_z^{res} = -800$ МПа, близкие по значению к пределу текучести титанового сплава ВТ3-1.

На рисунке 2.17 представлено распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 при нарезании резьбы на образцах из титанового сплава ВТ9 (режимы резания: скорость резания $V = 0,8$ м/мин; продольная подача $S = 0,8$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфифрезол; резонансная частота $f_r = 19760$ Гц при обработке с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями и $f_r = 19900$ Гц при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм).

При нарезании резьбы на образцах из титанового сплава ВТ9 в поверхностном слое сформировались сжимающие остаточные напряжения несколько большие, чем при нарезании резьбы на образцах из сплава ВТ3-1. При нарезании резьбы без применения ультразвука около поверхности сжимающие остаточные напряжения равны 300 МПа, на глубине залегания 0,06-0,07 мм они достигают максимума (по модулю) и имеют значение $\sigma_z^{res} = -550$ МПа, затем наблюдается спад и на глубине 0,16 мм равны нулю, а затем переходят в



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении;

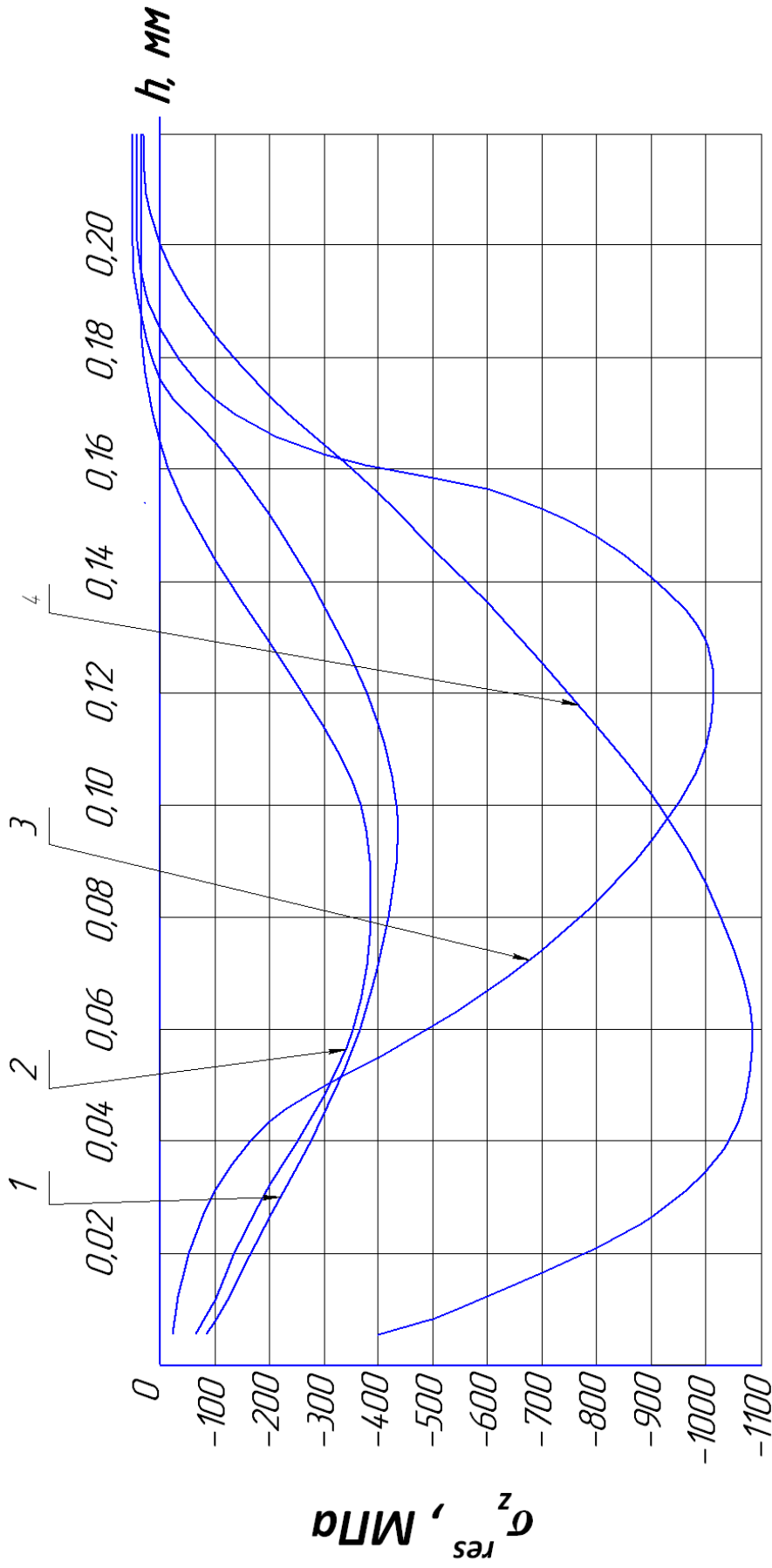
4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.17 - Распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 (обрабатываемый материал - титановый сплав ВТ9)

растягивающие и равны $\sigma_z^{res} = 40$ МПа. При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями получили следующее распределение остаточных напряжений: около поверхности $\sigma_z^{res} = -250$ МПа, на глубине залегания 0,07 мм равны $\sigma_z^{res} = -420$ МПа, на глубине залегания 0,15 мм равны $\sigma_z^{res} = 0$ МПа, а далее после 0,18 мм сохраняют значение равное $\sigma_z^{res} = 50$ МПа. Наложение на резбонарезной инструмент ультразвуковых колебаний в осевом направлении приводит к увеличению максимума (по модулю) до $\sigma_z^{res} = -900$ МПа на глубине залегания 0,06-0,07 мм. При этом около поверхности $\sigma_z^{res} = -420$ МПа, а на глубине 0,21 мм равны нулю. Далее растягивающие напряжения достигают значений около 40 МПа. Введение в зону резания радиальных ультразвуковых колебаний приводит к дальнейшему увеличению остаточных напряжений. В этом случае получили следующие значения: около поверхности $\sigma_z^{res} = -500$ МПа; на глубине 0,06 мм остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -1120$ МПа; на глубине залегания 0,21 мм $\sigma_z^{res} = 0$ МПа, а далее формируются растягивающие остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = 50$ МПа.

Из изложенного следует, что при обработке титанового сплава ВТ9 получили максимальные сжимающие остаточные напряжения при резании с осевыми и радиальными ультразвуковыми колебаниями, а при резании с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями происходит уменьшение сжимающих остаточных напряжений по сравнению с обработкой без ультразвука.

Подобным образом распределяются остаточные напряжения и при нарезании резьбы М8 на образцах из титанового сплава ВТ16 (рисунок 2.18) (режимы резания: скорость резания $V = 0,8$ м/мин; продольная подача $S = 0,8$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфифрезол; резонансная частота $f_r = 19760$ Гц при обработке с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями и $f_r = 19900$ Гц при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями; амплитуда



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.18- Распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М8 (обрабатываемый материал - титановый сплав ВТ16)

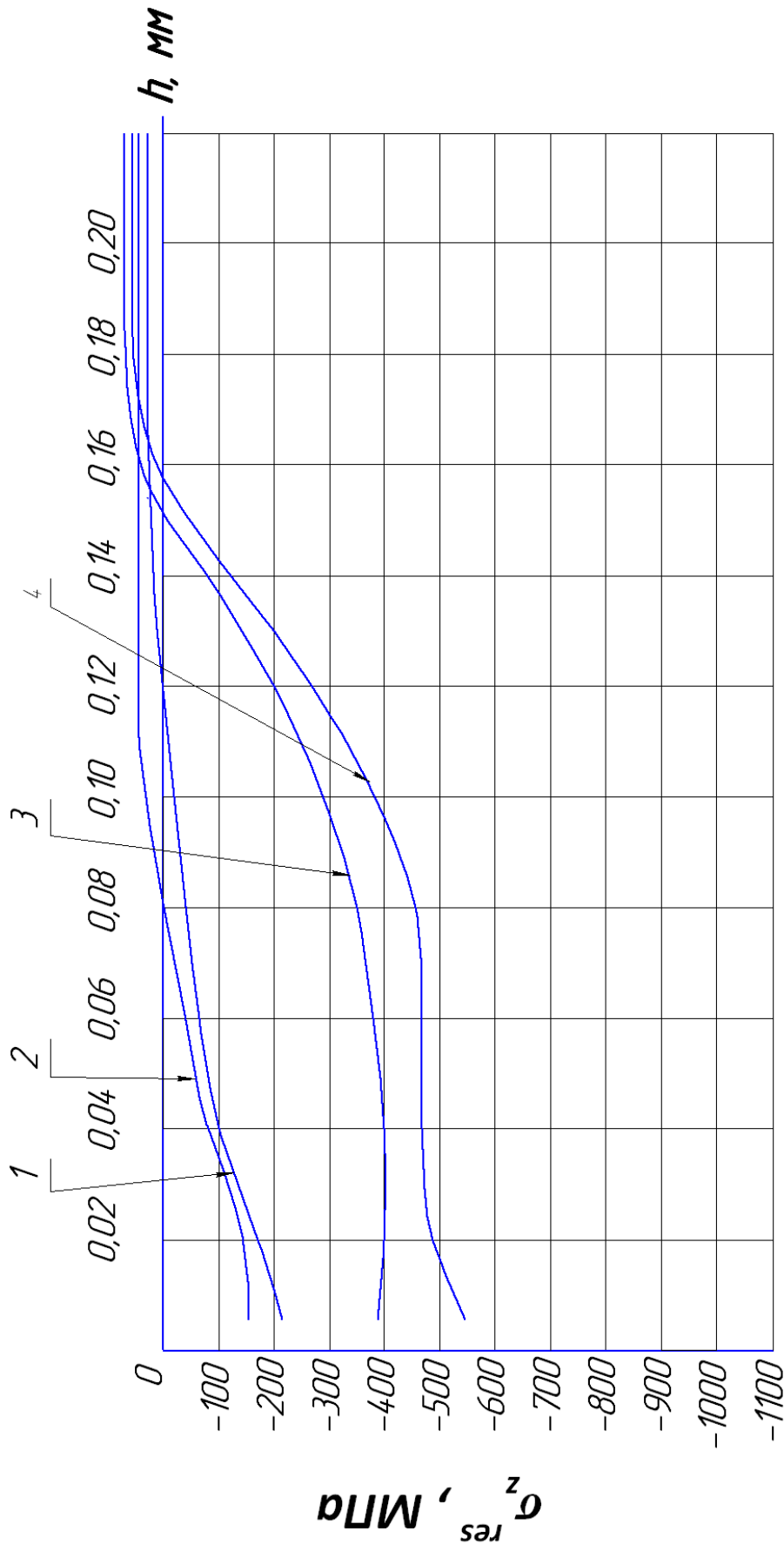
ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм).

В данном случае остаточные напряжения распределились следующим образом. Нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний позволяет получить максимальные значения остаточных напряжений сжатия равные 450 МПа на глубине поверхностного слоя 0,09 мм. Наложение на резьбонарезной инструмент ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении приводит к уменьшению сжимающих остаточных напряжений до значений 400 МПа, а при обработке с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении наблюдалось значительное увеличение остаточных напряжений сжатия до значений порядка 1000 МПа. Максимальные значения сжимающих остаточных напряжений (1100 МПа) получены в случае формирования резьбы с введение в зону резания ультразвуковых колебаний в радиальном направлении.

Таким образом, при обработке титановых сплавов наблюдается закономерность формирования осевых остаточных напряжений в зависимости от различных ультразвуковых параметров, применяемых при нарезании резьбы.

На рисунке 2.19 представлено распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 при нарезании резьбы на образцах из нержавеющей стали 12Х18Н9Т (режимы резания: скорость резания $V = 0,8$ м/мин; продольная подача $S = 0,8$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфофрезол; резонансная частота $f_r = 19760$ Гц при обработке с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями и $f_r = 19900$ Гц при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм).

При нарезании резьбы на образцах из нержавеющей стали 12Х18Н9Т в поверхностном слое также формируются сжимающие остаточные напряжения, но их распределение имеет значительное отличие. При нарезании резьбы без ультразвука около поверхности сжимающие остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -220$ МПа, затем они плавно уменьшаются (по модулю) и на глубине залегания 0,12 мм равны нулю, далее переходят в растягивающие и достигают



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

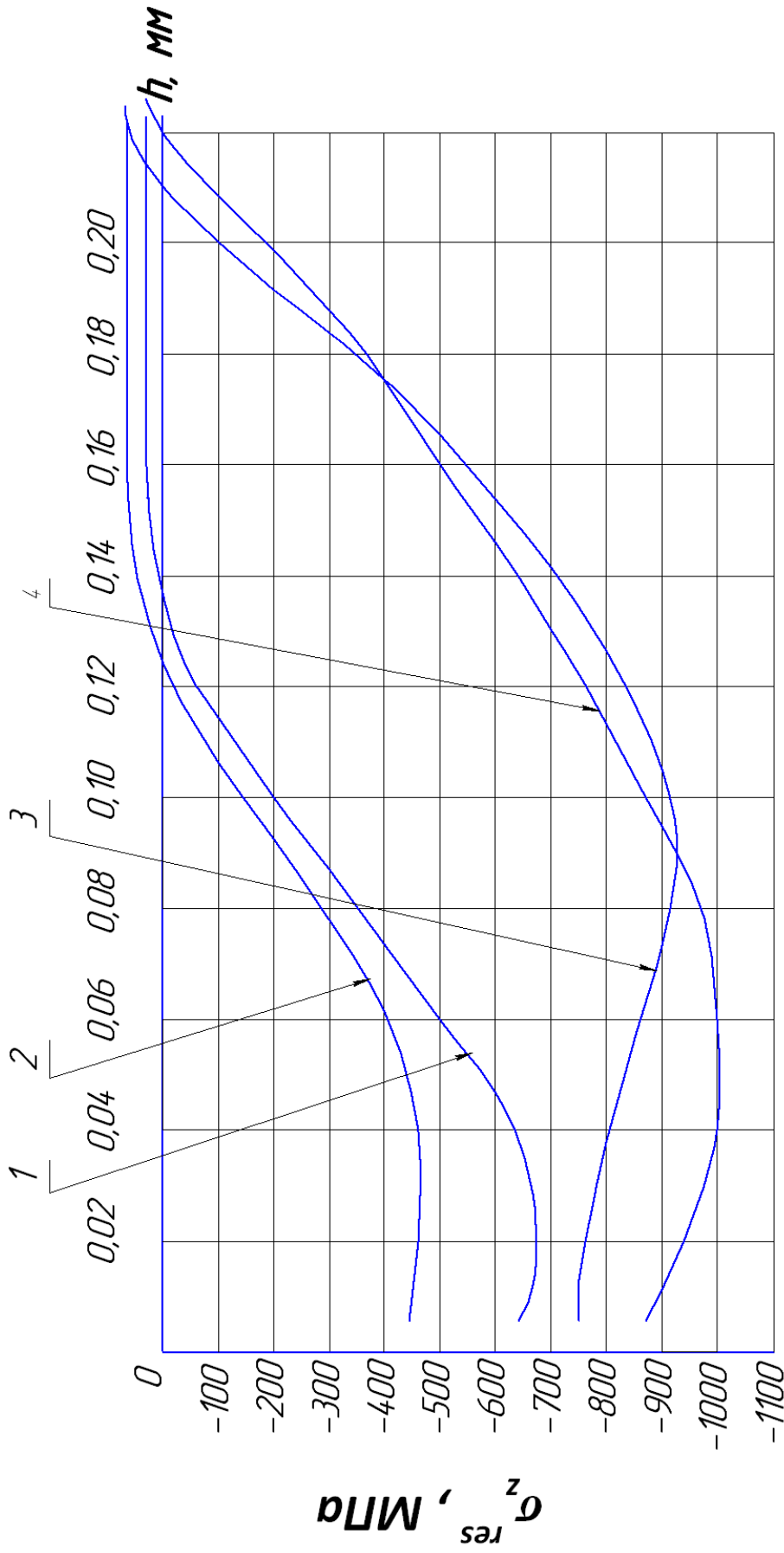
Рисунок 2.19 - Распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 (обрабатываемый материал - титановый сплав 12Х18Н9Т)

величин около 20 МПа. При наложении тангенциальных колебаний имеют очень близкое распределение: около поверхности сжимающие остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -160$ МПа, на глубине 0,08 мм равны нулю, а далее 30 МПа. При осевых колебаниях инструмента около поверхности $\sigma_z^{res} = -390$ МПа до глубины 0,06 мм, затем сходится спад сжимающих остаточных напряжений и на глубине 0,15 мм они равны нулю, а далее вырастают до значений $\sigma_z^{res} = 40$ МПа. При радиальных колебаниях инструмента около поверхности $\sigma_z^{res} = -550$ МПа, затем происходит небольшой спад на глубине 0,03-0,08 мм и остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -480$ МПа, а на глубине 0,16 мм они равны нулю и переходят в растягивающие.

Следовательно, в данном случае максимальные сжимающие остаточные напряжения формируются около поверхности, при этом наложение на резьбообразующий инструмент ультразвуковых колебаний в осевом и радиальном направлениях позволяет увеличить сжимающие остаточные напряжения в два-три раза по сравнению с обработкой без ультразвука.

На рисунке 2.20 представлено распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М8 при нарезании резьбы на образцах из высокопрочной стали 30ХГСА (режимы резания: скорость резания $V = 0,8$ м/мин; продольная подача $S = 0,8$ мм/об; глубина резания при окончательном проходе $t = 0,2$ мм; технологическая среда – сульфохрезол; резонансная частота $f_r = 19760$ Гц при обработке с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями и $f_r = 19900$ Гц при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм).

В данном случае, в поверхностном слое впадин резьбы сформировались значительные сжимающие остаточные напряжения. При нарезании резьбы на образцах из стали 30ХГСА без ультразвука близко к поверхности $\sigma_z^{res} = -600$ МПа, на глубине 0,02 мм сжимающие остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -680$ МПа, затем сжимающие остаточные напряжения плавно уменьшаются



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении;

4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.20. Распределение осевых остаточных напряжений во впадинах резьбы М8

(обрабатываемый материал - титановый сплав 30ХГСА)

до нуля на глубине 0,14 мм и далее достигают значений $\sigma_z^{res} = 30$ МПа.

При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями около поверхности $\sigma_z^{res} = -450$ МПа, с глубины 0,4 мм наблюдается плавный спад до нуля, при глубине 0,13 мм и далее формируются растягивающим равными $\sigma_z^{res} = 50$ МПа. Применение при нарезании осевых ультразвуковых колебаний приводит к следующему распределению остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы: при глубине залегания 0,01 мм остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = -750$ МПа, при глубине 0,09 мм остаточные напряжения $\sigma_z^{res} = 920$ МПа, при глубине 0,22 мм остаточные напряжения равны нулю, а далее переходят в растягивающие. В случае обработки с радиальными ультразвуковыми колебаниями около поверхности $\sigma_z^{res} = -870$ МПа, на глубине 0,04-0,06 мм имеют максимум (по модулю) $\sigma_z^{res} = -1000$ МПа, при глубине 0,21 мм остаточные напряжения равны нулю, а далее формируются растягивающие остаточные напряжения.

На основании ранее изложенного можно сделать следующие выводы.

При нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями происходит уменьшение значений сжимающих остаточных напряжений, так как направление ультразвуковых колебаний совпадает с вектором скорости резания и приводит к снижению действующих сил резания, оказывающих доминирующее влияние на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое.

Применение при обработке осевых или радиальных ультразвуковых колебаний приводит к упрочнению поверхности резьбового профиля и, соответственно, к увеличению сжимающих остаточных напряжений, что позволяет улучшить качество поверхностного слоя при нарезании резьбы в рассматриваемых материалах.

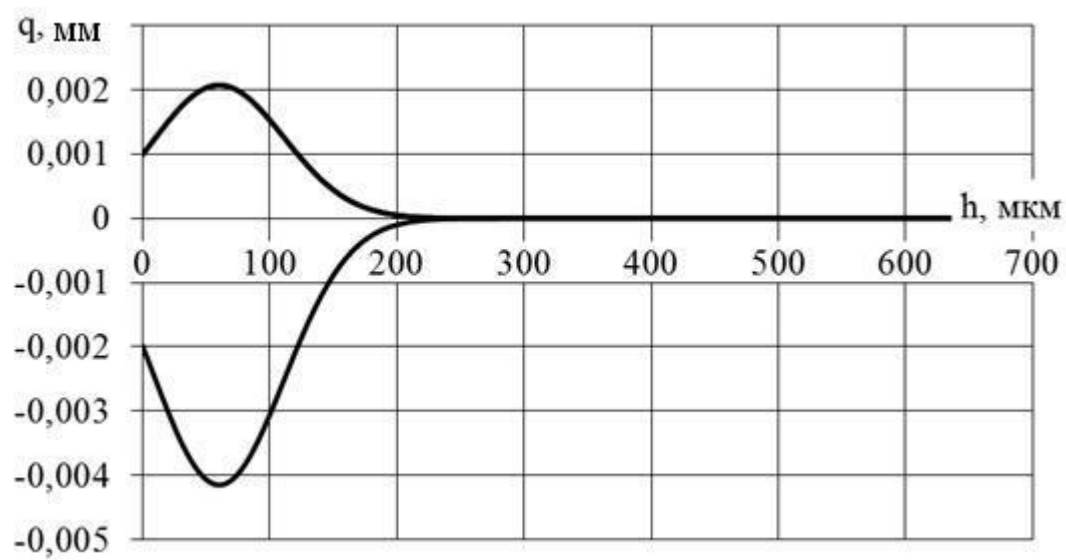
2.3 Результаты исследования влияния ультразвука на формирование остаточных напряжений и пластических деформаций во впадинах резьбы

По приведённой в предыдущем разделе методике были получены расчётным путем значения всех трёх составляющих компонент остаточных напряжений. При этом сначала были построены эпюры аппроксимации осевых остаточных напряжений на основе имеющихся экспериментальных данных, а далее проведен расчёт окружных и радиальных остаточных напряжений.

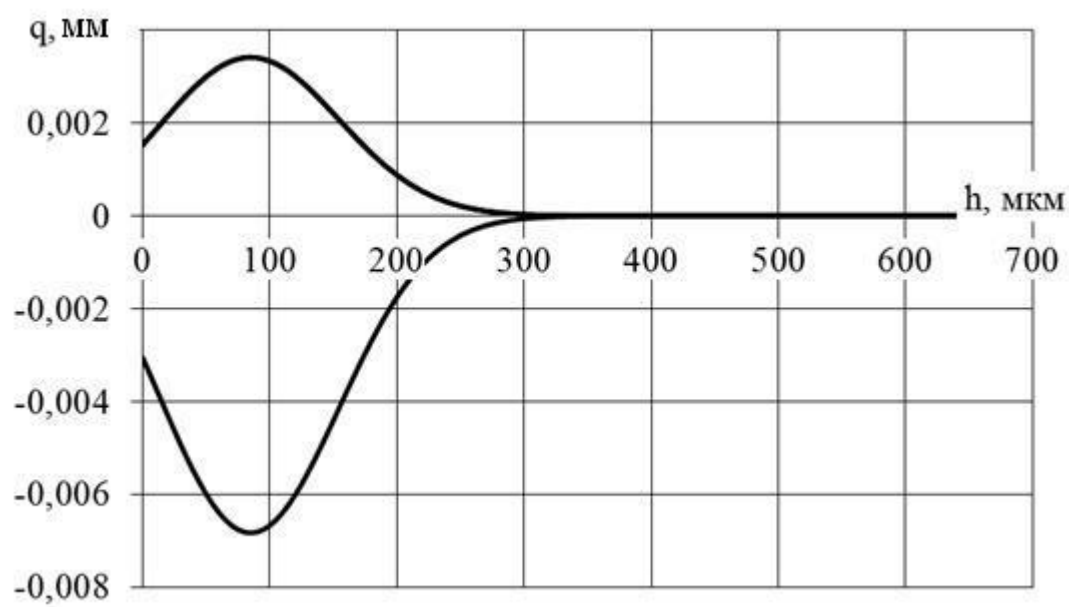
На рисунках 2.27-2.38 показано формирование окружных, осевых и радиальных остаточных напряжений во впадинах резьбовых образцов при обработке титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ16, нержавеющей стали 12Х18Н9Т и высокопрочной стали 30ХГСА.

Из полученных данных следует, что во всех случаях в поверхностном слое глубиной 0,16-0,22 мм сформировались сжимающие остаточные напряжения в окружном и осевом направлениях. В радиальном направлении формируются сразу растягивающие остаточные напряжения. Значения радиальных остаточных напряжений значительно меньше (по модулю), чем значения осевых и остаточных напряжений, поэтому доминирующими и оказывающими влияние на работоспособность резьбового соединения являются сжимающие осевые и окружные остаточные напряжения.

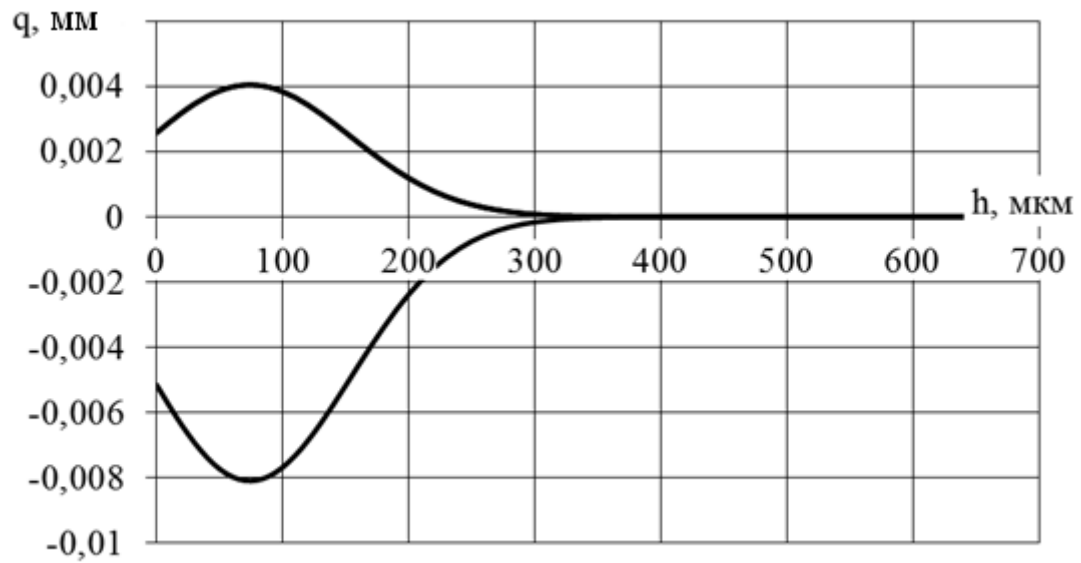
На рисунках 2.21 - 2.23 - показаны распределения пластических деформаций, полученных расчётным путём в поверхностном слое впадин резьбы на образцах из исследуемых материалов. Из приведённых данных видно, что деформации во впадине резьбы достигают значений до 8 мкм. Так, например, при обработке титанового сплава ВТ9 при нарезании резьбы без ультразвука максимальная деформация в осевом и окружном направлении достигает значений 4 мкм на глубине 0,06 мм, а в радиальном направлении 2 мкм (нижний график - $q_z = q_\theta$, верхний график - q_r).



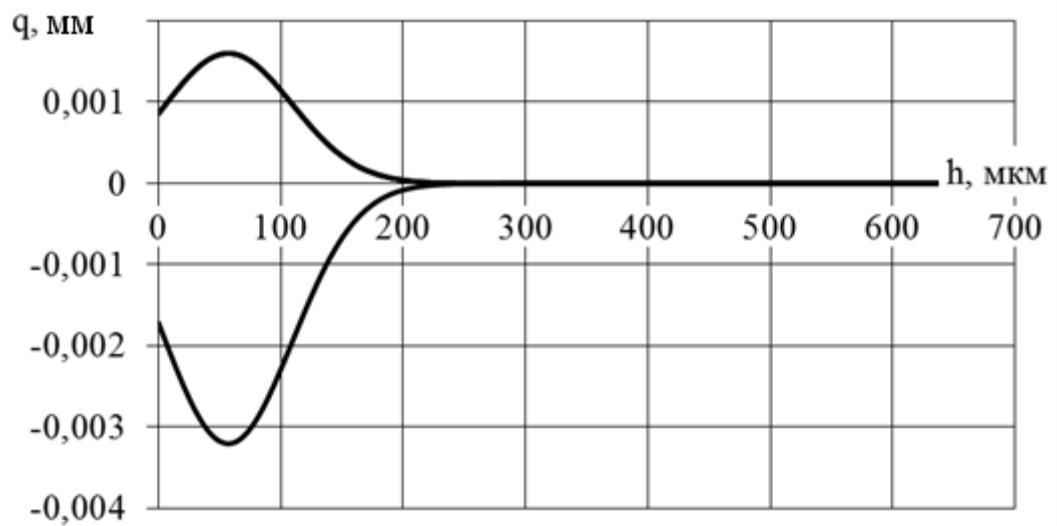
a



б



В

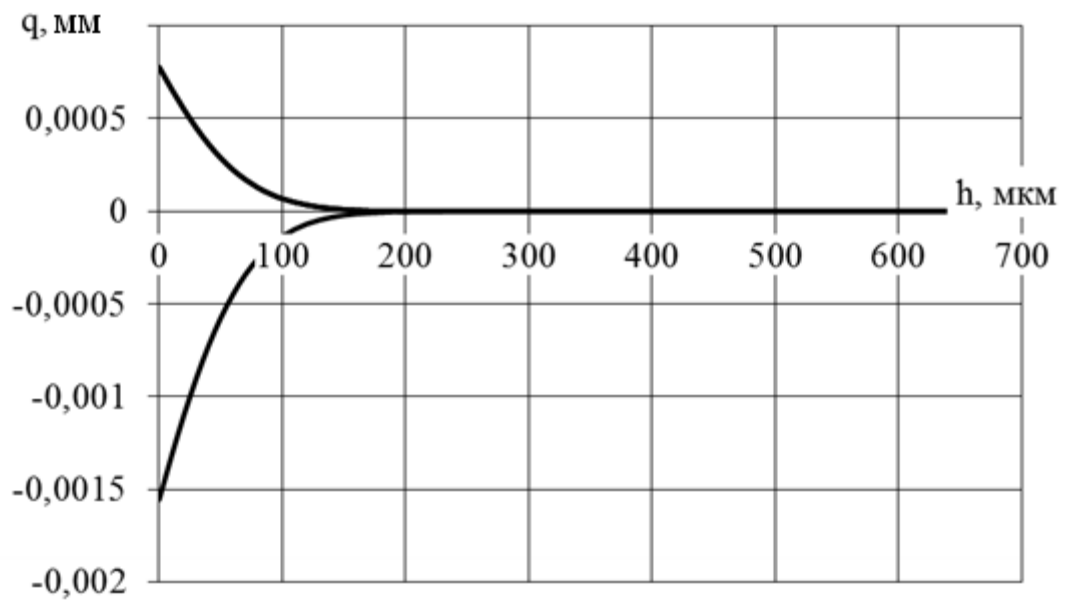


Г

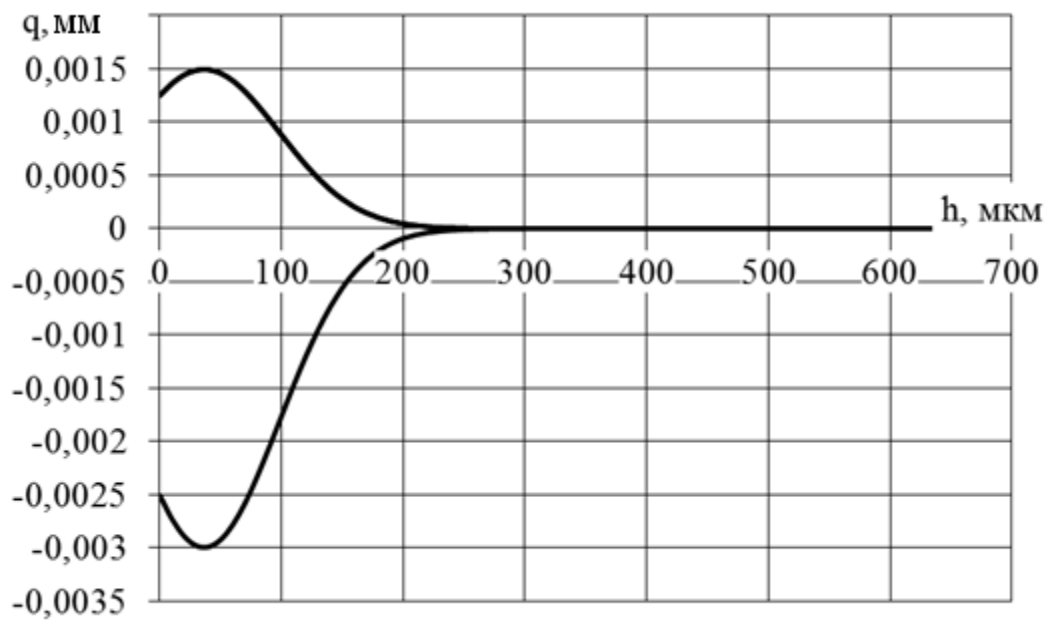
а - без ультразвуковых колебаний; б - с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

в - с радиальными ультразвуковыми колебаниями; г - с тангенциальными
ультразвуковыми колебаниями

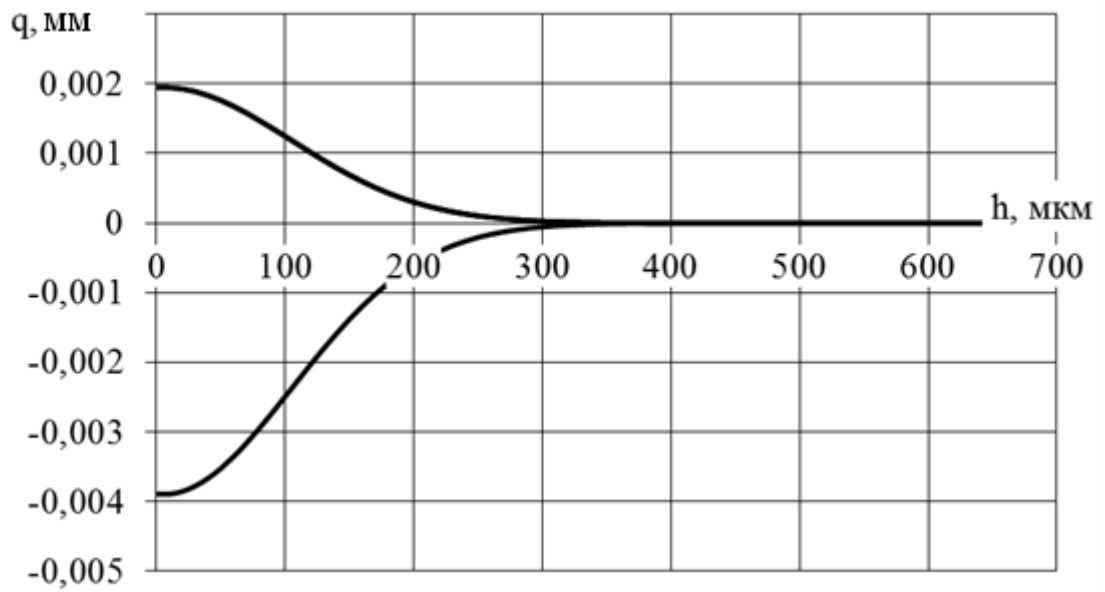
Рисунок 2.21 - Пластические деформации во впадине резьбы при обработке
титанового сплава ВТ9



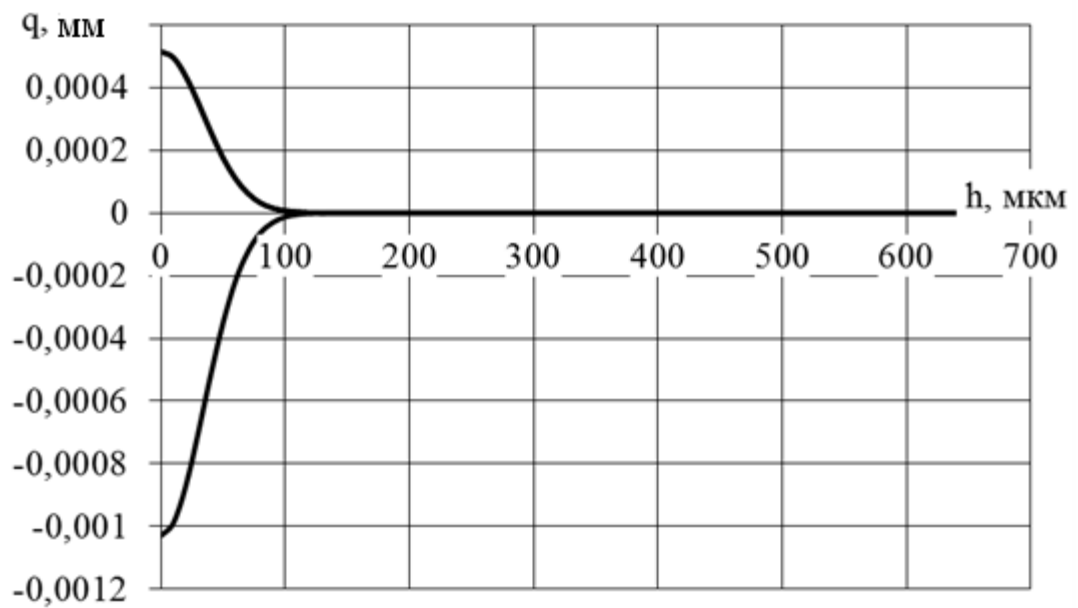
a



б



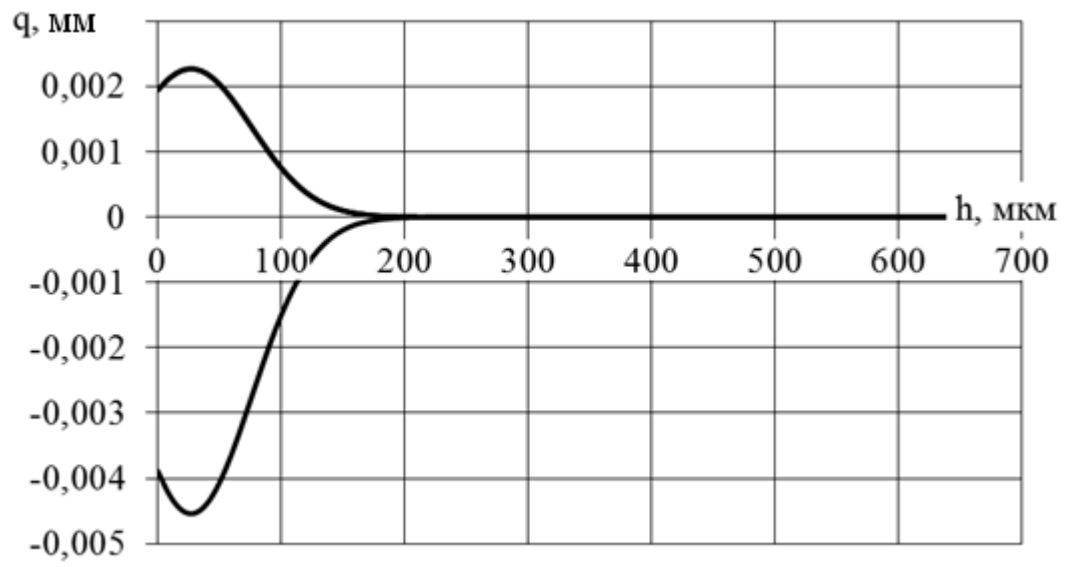
В



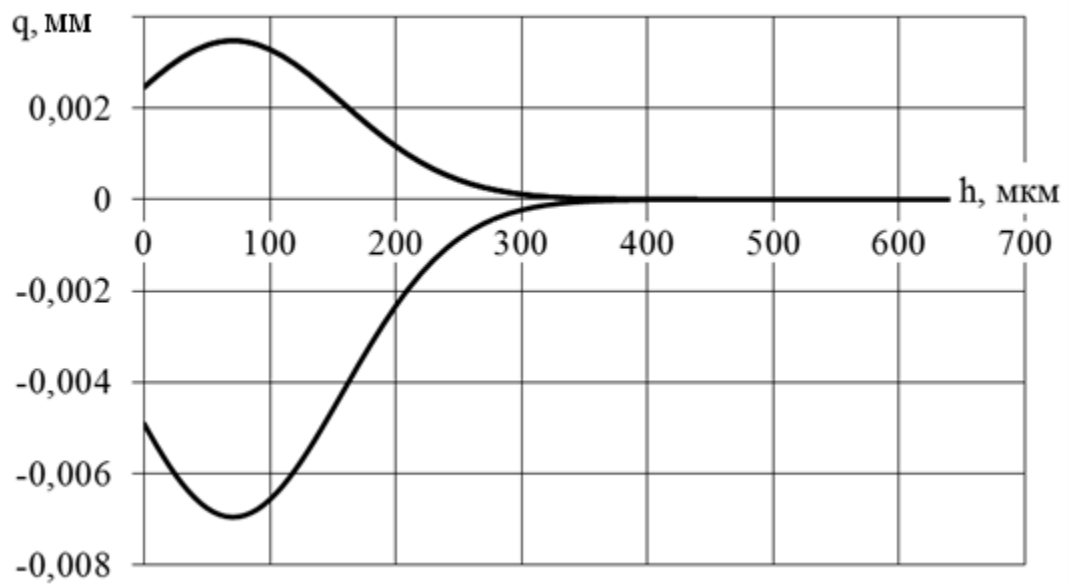
Г

а - без ультразвуковых колебаний; б - с осевыми ультразвуковыми колебаниями;
в - с радиальными ультразвуковыми колебаниями; г - с тангенциальными
ультразвуковыми колебаниями

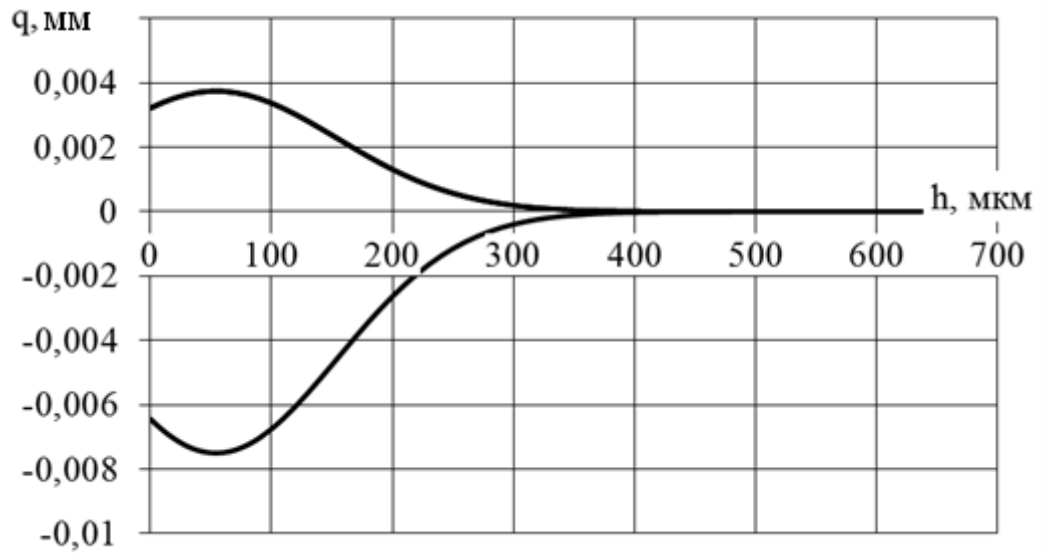
Рисунок 2.22 - Пластические деформации во впадине резьбы при обработке стали
12Х18Н9Т



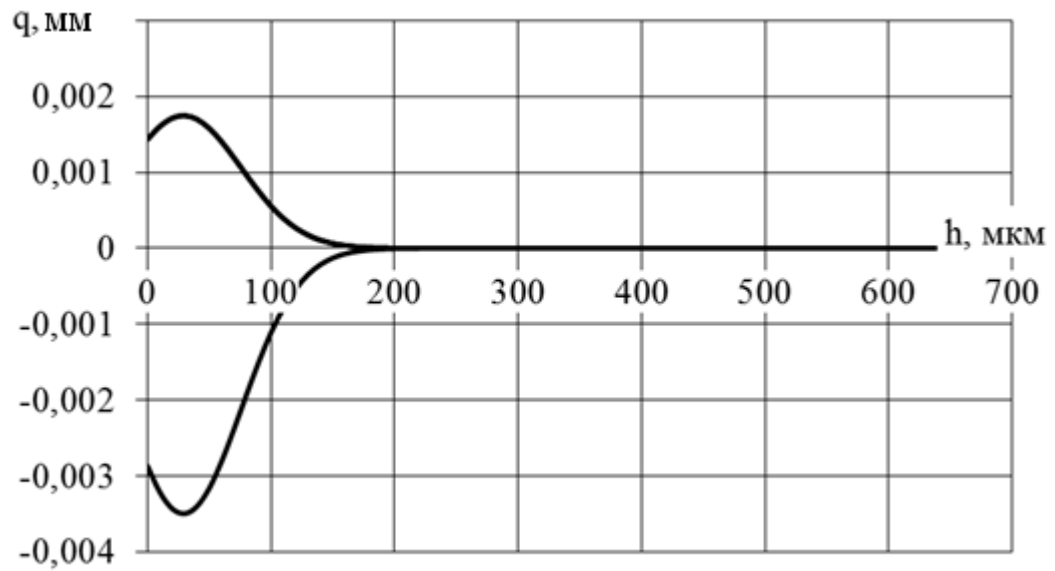
a



б



В



Г

а - без ультразвуковых колебаний; б - с осевыми ультразвуковыми колебаниями;
в - с радиальными ультразвуковыми колебаниями; г - с тангенциальными
ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 2.23 - Пластические деформации во впадине резьбы при обработке
стали 30ХГСА

При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями деформации q_z и q_θ имеют максимальное значение 3 мкм, при осевых ультразвуковых колебаниях $q_z = q_\theta = 7$ мкм, при радиальных ультразвуковых колебаниях $q_z = q_\theta = 8$ мкм.

При нарезании резьбы на образцах из нержавеющей стали 12Х18Н9Т деформация достигает меньших значений:

- при обработке без ультразвуковых колебаний - 1,5 мкм;
- при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями - 1 мкм;
- при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями - 3 мкм;
- при обработке с радиальными ультразвуковыми колебаниями - 4 мкм.

При обработке стали 30ХГСА максимальные деформации достигают следующих величин:

- при обработке без ультразвуковых колебаний - 4,5 мкм;
- при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями - 3,5 мкм;
- при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями - 6,8 мкм;
- при обработке с радиальными ультразвуковыми колебаниями - 7,5 мкм.

При нарезании резьбы М5 в титановом сплаве ВТ3-1 (рисунок 2.24) получили следующие значения остаточных напряжений. Окружные остаточные напряжения имеют следующие значения:

- при обработке без ультразвука на поверхности $\sigma_\theta^{res} = -100$ МПа, на глубине 0,08 мм $\sigma_\theta^{res} = -450$ МПа, на глубине 0,20 мм равны нулю и далее переходят в растягивающие не более 30 МПа;

- при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями на поверхности $\sigma_\theta^{res} = -110$ МПа, на глубине 0,07 мм $\sigma_\theta^{res} = -300$ МПа, на глубине 0,18 мм равны нулю и далее достигают значений $\sigma_\theta^{res} = 20$ МПа;

- при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями на поверхности $\sigma_\theta^{res} = -180$ МПа, на глубине 0,10 мм $\sigma_\theta^{res} = -800$ МПа, на глубине 0,24 мм равны нулю и далее достигают значений $\sigma_\theta^{res} = 40$ МПа;

- при обработке с радиальными ультразвуковыми колебаниями на

поверхности $\sigma_{\theta}^{res} = -420$ МПа, на глубине 0,07 мм $\sigma_{\theta}^{res} = -920$ МПа, на глубине 0,23 мм равны нулю и далее достигают значений $\sigma_{\theta}^{res} = 50$ МПа.

Распределение осевых остаточных напряжений приведено на рисунке 2.25 и подробно описано в предыдущем разделе. Здесь представлена оценка отклонения расчетных значений от экспериментальных данных. Погрешность определялась по следующей зависимости

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{\text{расчёт}} - \sigma_{\text{экспер}})^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{экспер}}^2}} \cdot 100\%. \quad (2.27)$$

Ниже в таблице 2.1 представлены данные по всем обрабатываемым материалам.

Таблица 2.1 - Оценка отклонения расчётных значений от экспериментальных данных для осевых остаточных напряжений

Обрабатываемые материалы	Среднеквадратичное отклонение расчётных значений от экспериментальных данных для осевых остаточных напряжений σ_z^{res}			
	обработка без ультразвука	обработка с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями	обработка с осевыми ультразвуковыми колебаниями	обработка с радиальными ультразвуковыми колебаниями
12X18H9	1,44%	5,20%	9,39%	13,00%
30ХГСА	5,08%	6,95%	9,48%	4,45%
BT3-1	13,92%	13,94%	12,49%	5,71%
BT9	8,04%	12,09%	5,52%	7,99%
BT16	9,55%	7,83%	15,20%	10,59%

Из полученных результатов следует, что максимальное отклонение не превышает 13,94% для сплава BT3-1; 12,09% для сплава BT9; 15,20% для сплава BT16; 9,48% для стали 30ХГСА; 13% для стали 12Х18Н9.

На рисунке 2.26 приведено формирование радиальных остаточных напряжений при нарезании резьбы М5 в титановом сплаве BT3-1. В данном случае имеет следующее распределение остаточных напряжений:

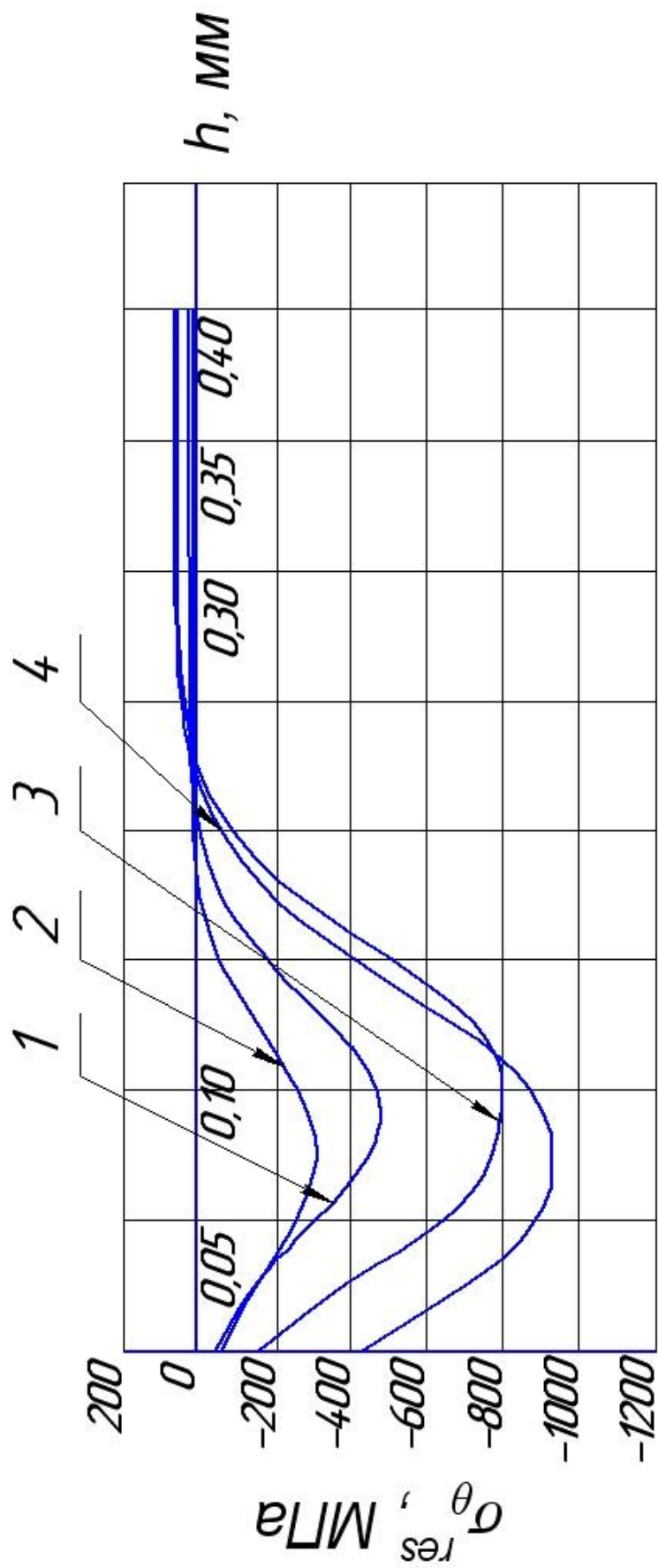
- при нарезании резьбы без ультразвука радиальные остаточные напряжения на поверхности равны нулю, затем плавно увеличиваются до значений $\sigma_r^{res} = 20 \text{ МПа}$ на глубине залегания 0,20 мм и далее остаются постоянными;

- при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями радиальные напряжения также плавно увеличиваются от нуля на поверхности до $\sigma_r^{res} = 12 \text{ МПа}$ на глубине 0,15 и далее не изменяется;

- при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями на поверхности равны нулю, затем возрастают до $\sigma_r^{res} = 45 \text{ МПа}$ на глубине 0,23 мм и далее остаются постоянными;

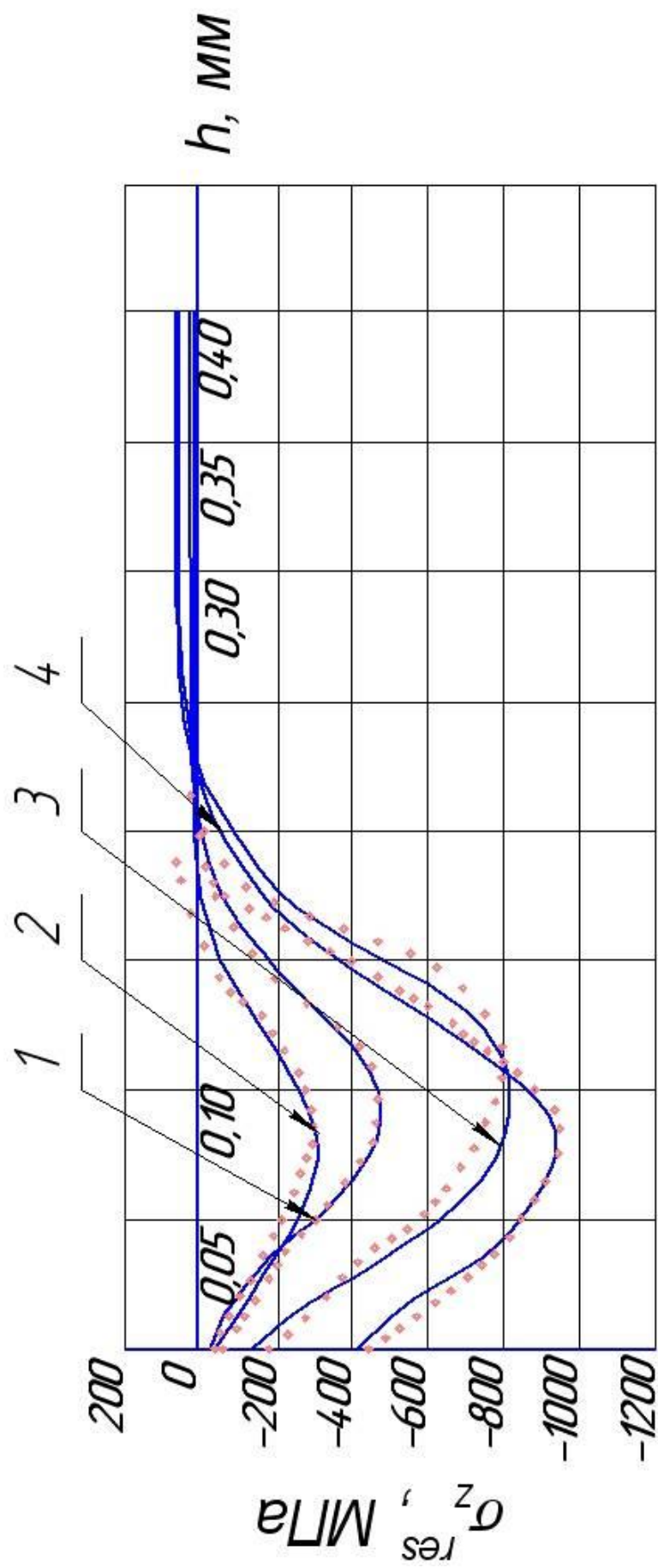
- при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями на поверхности равны нулю, затем происходит рост до $\sigma_r^{res} = 53 \text{ МПа}$ на глубине залегания 0,22 мм и далее не изменяются.

Таким образом, проведенный анализ показал, что максимальные (по модулю) значения окружных, осевых и радиальных остаточных напряжений формируются при обработке с осевыми или радиальными ультразвуковыми колебаниями. При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями получили минимальные (по модулю) значения всех компонент остаточных напряжений. Аналогичное распределение остаточных напряжений получили при нарезании резьбы на образцах титанового сплава BT9. Отличительной особенностью является то, что максимальные окружные и осевые остаточные напряжения имеют несколько большие (по модулю) значения в пределах 100 МПа.



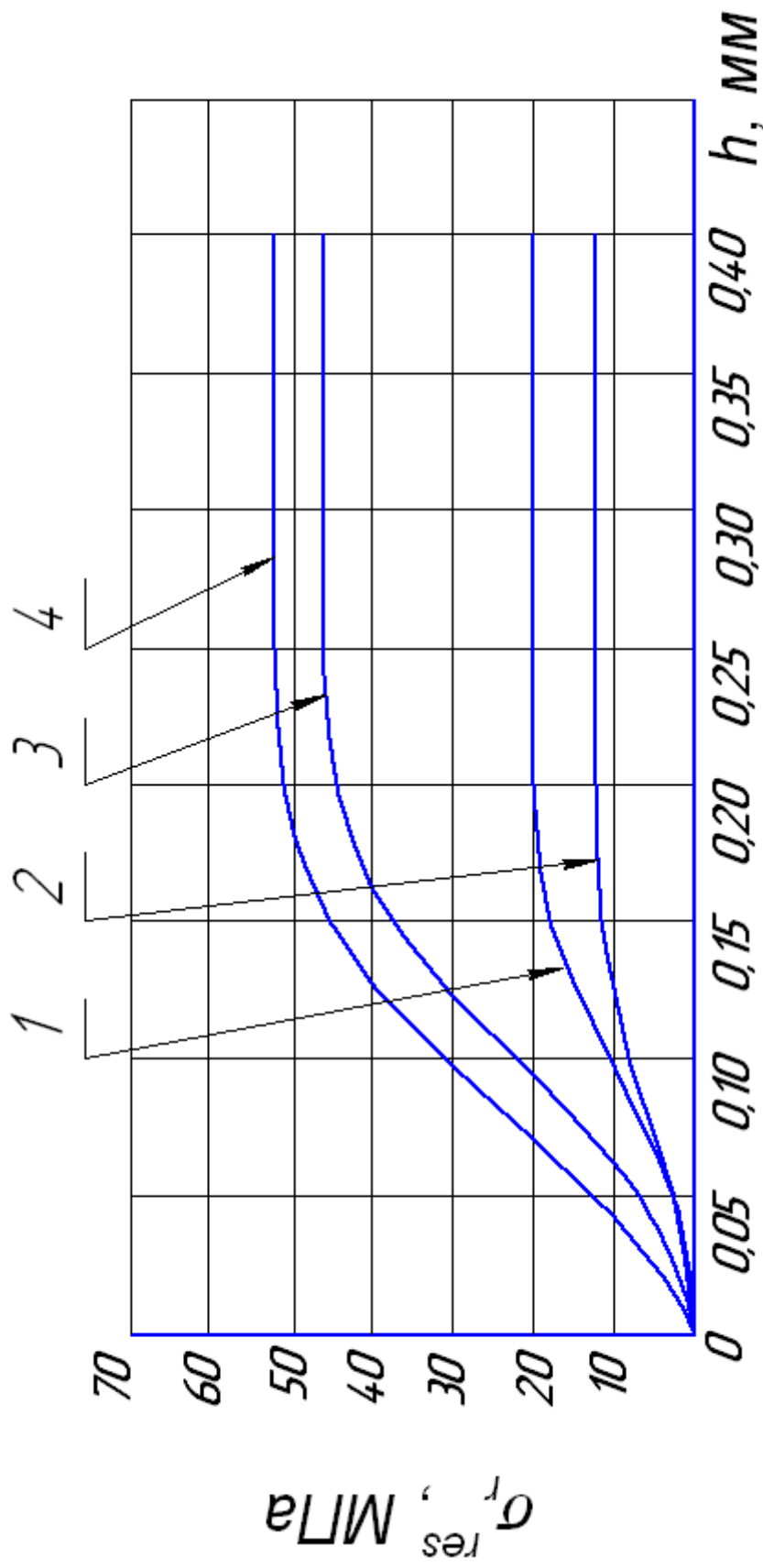
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.24 - Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М5 при обработке титанового сплава BT3-1



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.25 - Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М5 при обработке титанового сплава BT3-1



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.26 - Формирование радиальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М5 при обработке титанового сплава ВТ3-1

При обработке титанового сплава BT16 получили значения остаточных напряжений близкие к значениям при обработке титанового сплава BT3-1.

При обработке нержавеющей стали 12X18H9T получили следующие значения остаточных напряжений. При этом окружные остаточные напряжения формируются следующим образом:

- при нарезании резьбы без ультразвуковых колебаний на поверхности $\sigma_{\theta}^{res} = -220 \text{ МПа}$, затем плавно уменьшаются и на глубине 0,15 мм равны нулю и переходят в растягивающие $\sigma_{\theta}^{res} = 20 \text{ МПа}$;

- обработка с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении приводит к достижению следующих значений остаточных напряжений: около поверхности $\sigma_{\theta}^{res} = -150 \text{ МПа}$, на глубине 0,2 мм $\sigma_{\theta}^{res} = 0$, далее формируются растягивающими $\sigma_{\theta}^{res} = 15 \text{ МПа}$.

Применение ультразвуковых колебаний в осевом направлении изменяет распределение остаточных напряжений следующим образом: около поверхности $\sigma_{\theta}^{res} = -380 \text{ МПа}$, на глубине 0,04 мм $\sigma_{\theta}^{res} = -430 \text{ МПа}$, при $h = 0,16 \text{ мм}$ $\sigma_{\theta}^{res} = 0$, далее $\sigma_{\theta}^{res} = 25 \text{ МПа}$. При обработке с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении около поверхности $\sigma_{\theta}^{res} = -590 \text{ МПа}$, при $h = 0,24 \text{ мм}$ равны нулю, а далее $\sigma_{\theta}^{res} = 30 \text{ МПа}$.

Образование осевых остаточных напряжений было изучено ранее, поэтому далее рассмотрим формирование радиальных остаточных напряжений, которые имеют следующие значения:

- при обработке без ультразвуковых колебаний на поверхности равны нулю, далее плавно увеличиваются до значений около 40 МПа:

- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении $\sigma_r^{res} = 2 \text{ МПа}$;

- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении $\sigma_r^{res} = 25 \text{ МПа}$;

- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном

направлении $\sigma_r^{res} = 39$ МПа.

При обработке высокопрочной стали 30ХГСА получили следующие максимальные значения сжимающих окружных остаточных напряжений:

- при нарезании резьбы без ультразвука при $h = 0,07$ мм $\sigma_\theta^{res} = -980$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении при $h = 0,04$ мм $\sigma_\theta^{res} = -500$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении при $h = 0,07$ мм $\sigma_\theta^{res} = -1020$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении при $h = 0,06$ мм $\sigma_\theta^{res} = -1100$ МПа.

Радиальные остаточные напряжения распределяются следующим образом:

- на поверхности при всех видах обработки радиальные напряжения равны нулю;
- при нарезании резьбы без ультразвука при $h = 0,17$ мм $\sigma_\theta^{res} = 30$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении при $h = 0,16$ мм $\sigma_\theta^{res} = 21$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении при $h = 0,25$ мм $\sigma_\theta^{res} = 81$ МПа;
- при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении при $h = 0,30$ мм $\sigma_\theta^{res} = 100$ МПа.

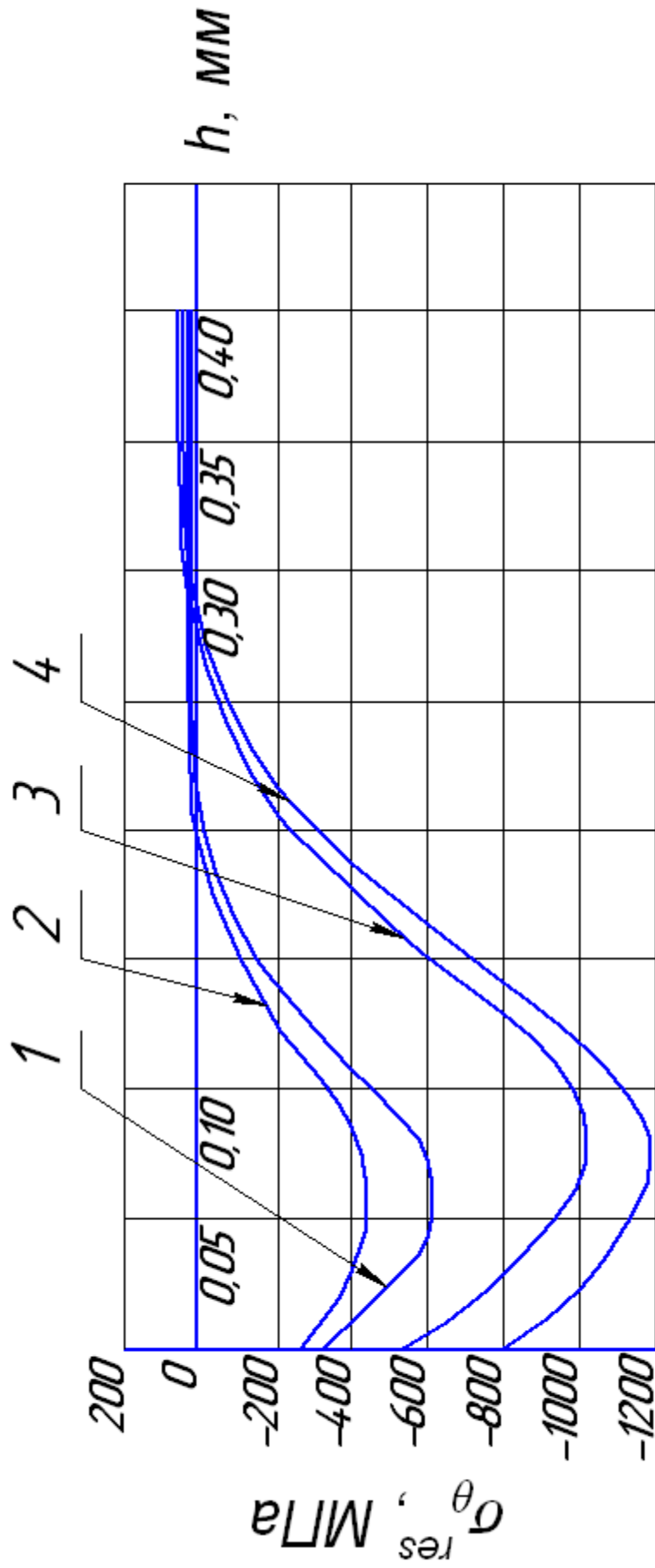
Полученные значения остаточных напряжений и пластических деформаций можно объяснить следующим образом. При нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями уменьшаются силы резания и, соответственно, уменьшаются пластические деформации и остаточные напряжения. В случае нарезания резьбы с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями поверхностный слой подвергается упрочнению за счёт ударно-циклического

воздействия режущего инструмента на формируемую резьбовую поверхность. При этом происходит значительное увеличение пластических деформаций, что обосновано в [85]. В результате в поверхностном слое формируются значительные остаточные напряжения, величина которых зависит от технологических параметров обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала.

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

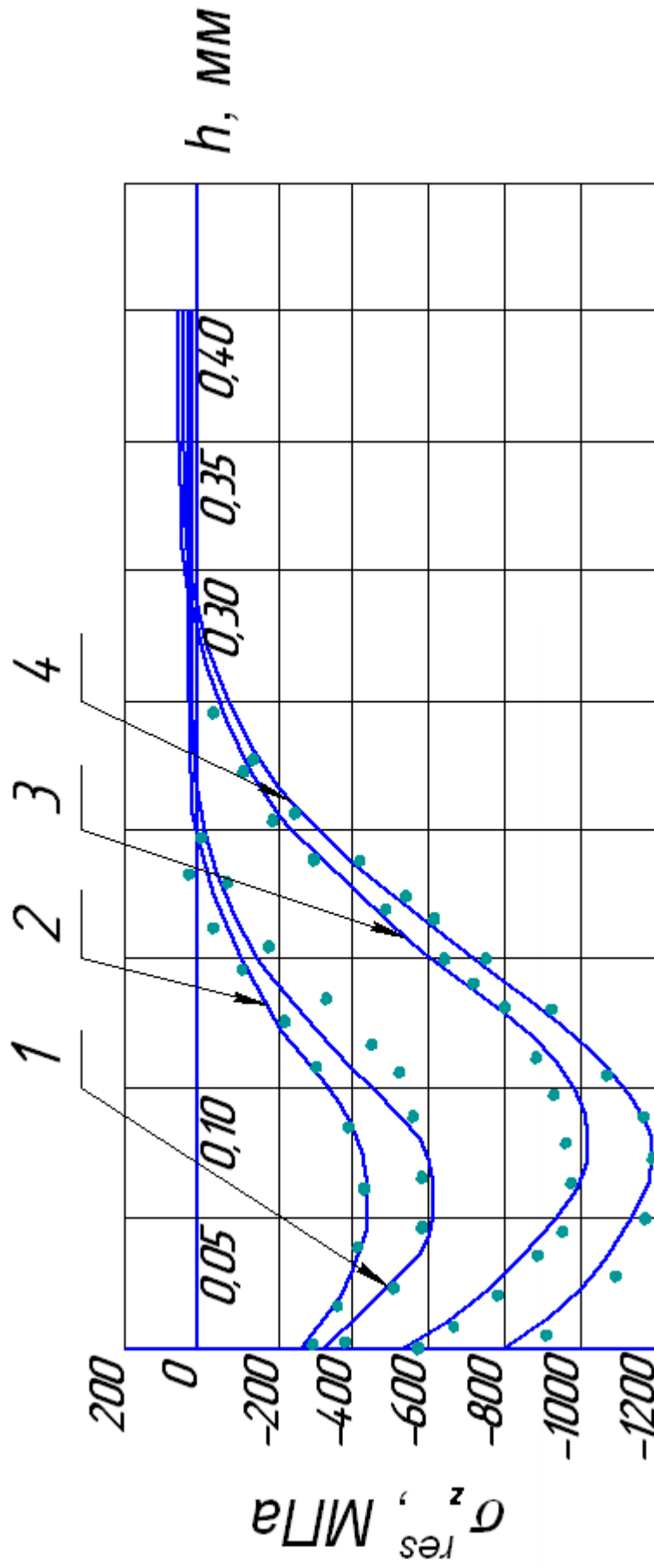
При нарезании резьбы лезвийным инструментом в поверхностном слое впадин резьбы формируются сжимающие остаточные напряжения в осевом и окружном направлениях, а в радиальном направлении всегда образуются растягивающие остаточные напряжения. При этом радиальные растягивающие напряжения незначительно (не более 100 МПа), а сжимающие остаточные напряжения в окружном и осевом направлениях достигают значений (по модулю) около 1100 МПа, т.е. являются на порядок большими.

Следует отметить, что остаточные напряжения в осевом и окружном направлениях имеют близкие значения и распределение в поверхностном слое. Наиболее благоприятное распределение остаточных напряжений получено при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями, а также несколько меньшие значения получены при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями. Следовательно, с точки зрения формирования в поверхностном слое максимальных сжимающих остаточных напряжений, оптимальными ультразвуковыми параметрами являются колебания в радиальном и осевом направлениях с амплитудой не менее 5 мкм.



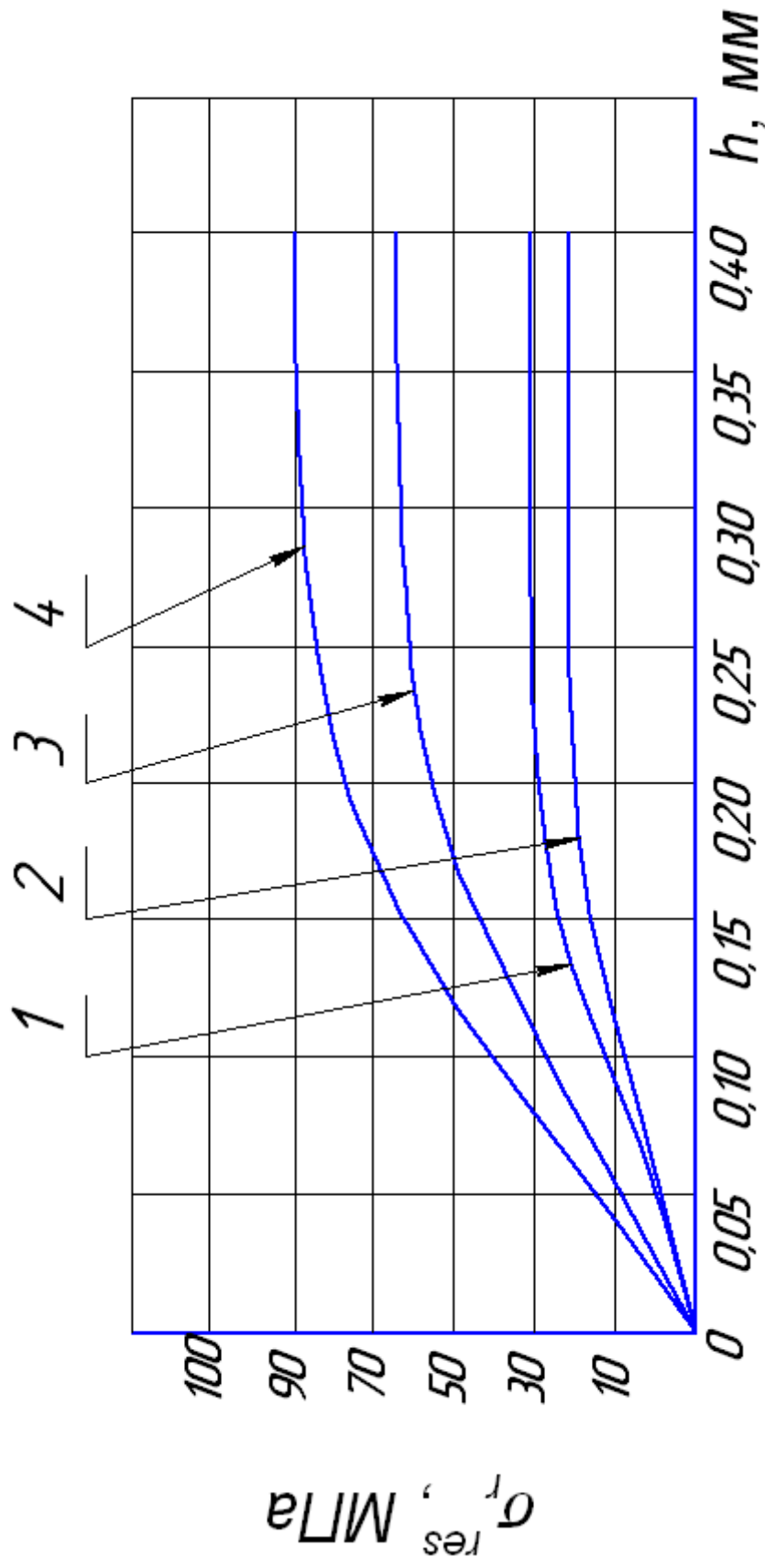
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.27 - Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке титанового сплава ВТ9



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.28 - Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке титанового сплава ВТ9



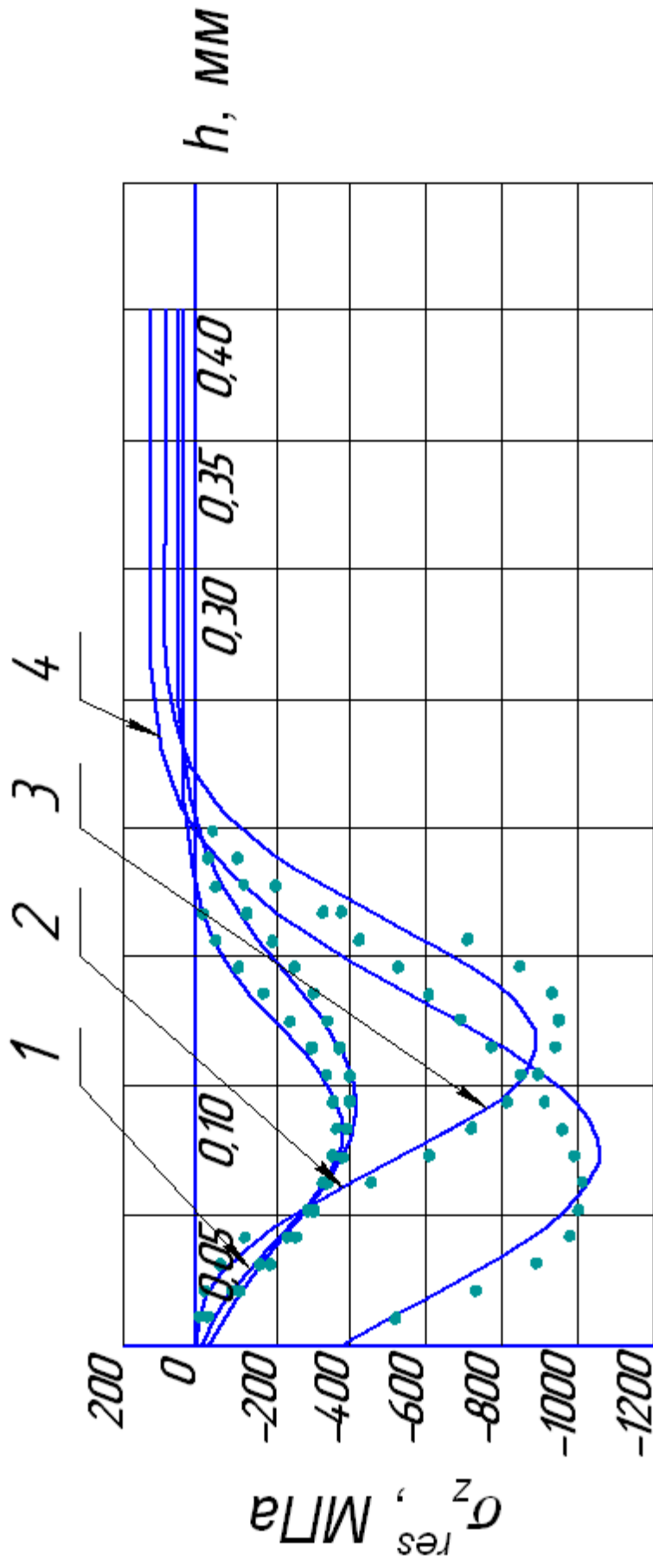
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.29 - Формирование радиальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке титанового сплава ВТ9



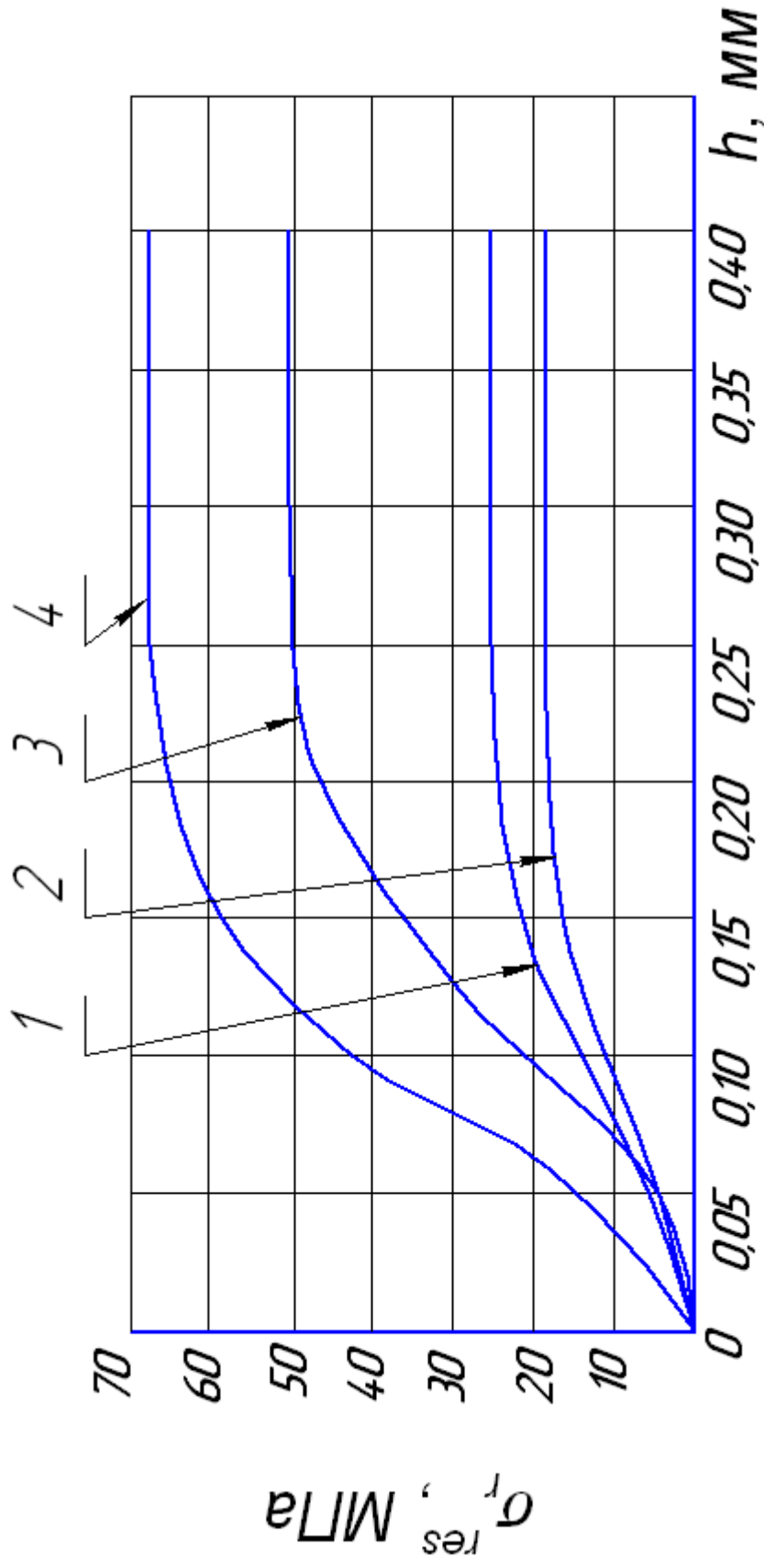
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.30 - Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке титанового сплава BT16



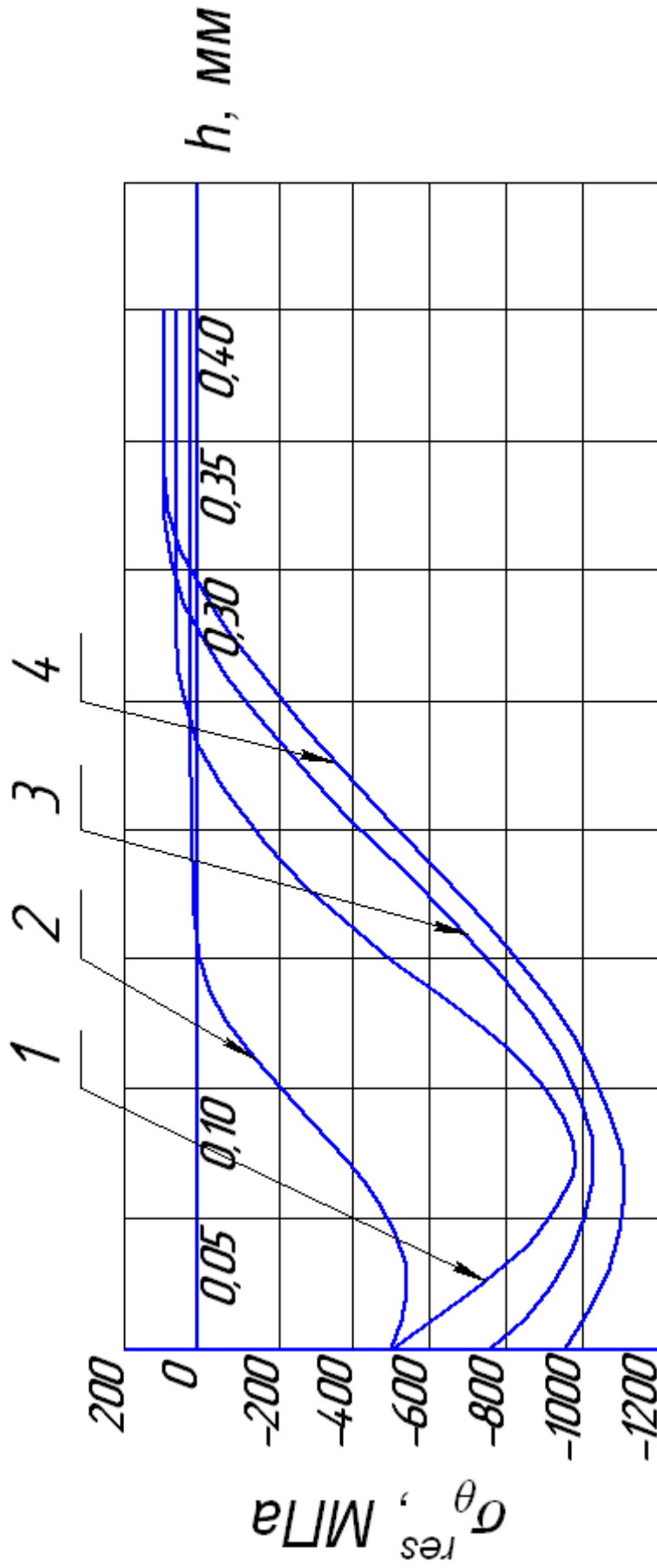
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.31 - Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке титанового сплава ВТ16



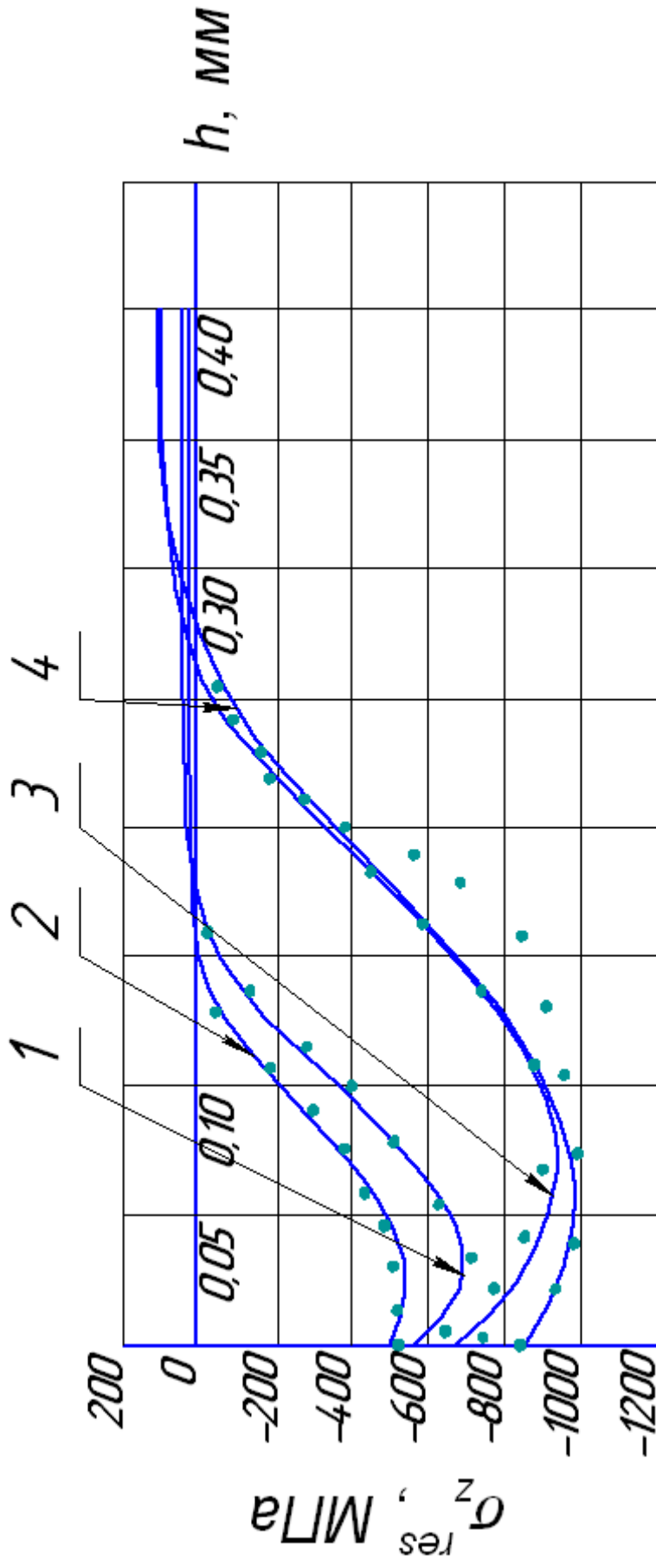
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.32 - Формирование радиальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке титанового сплава BT16



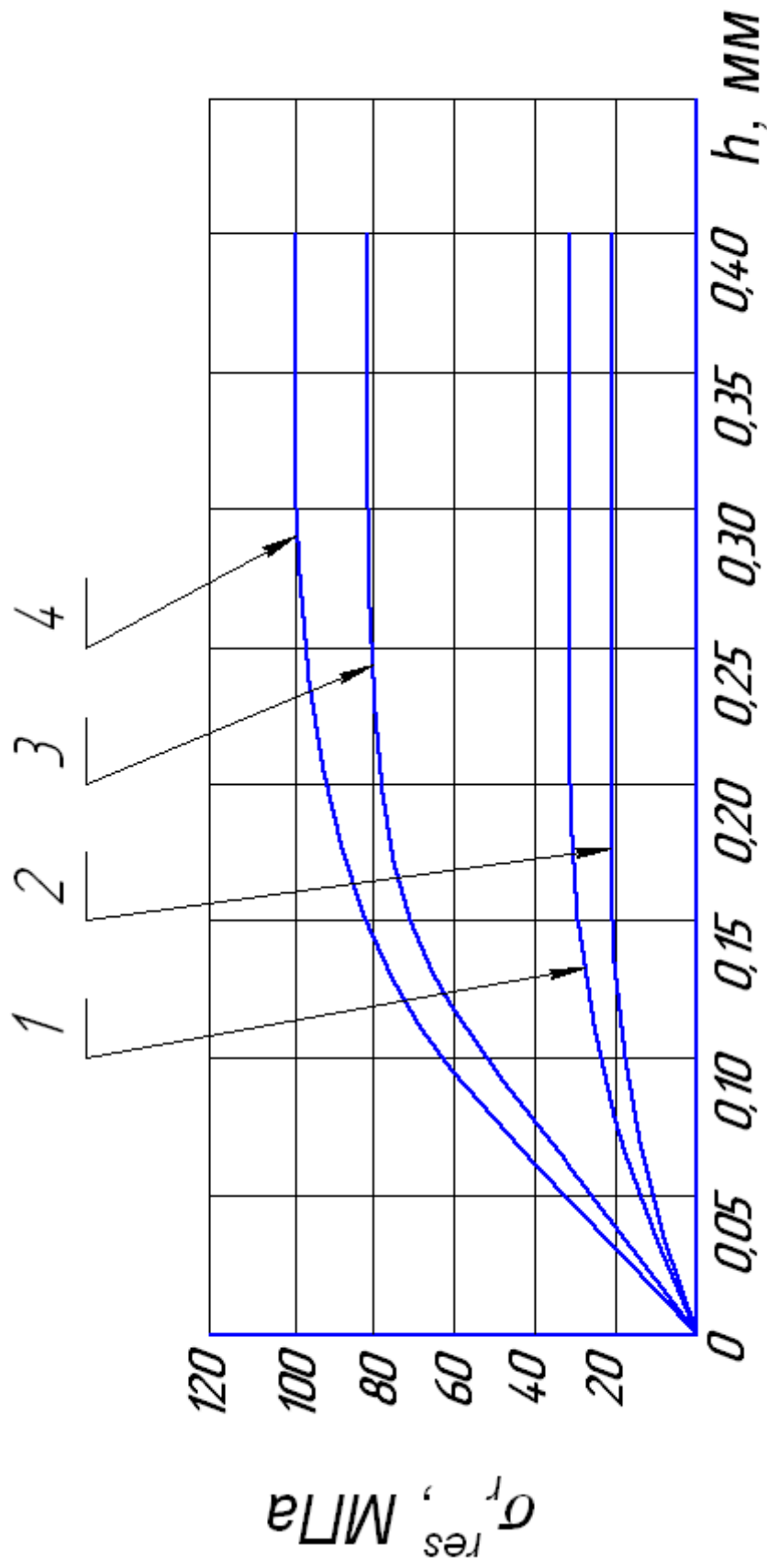
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.33 - Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке высокопрочной стали 30ХГСА



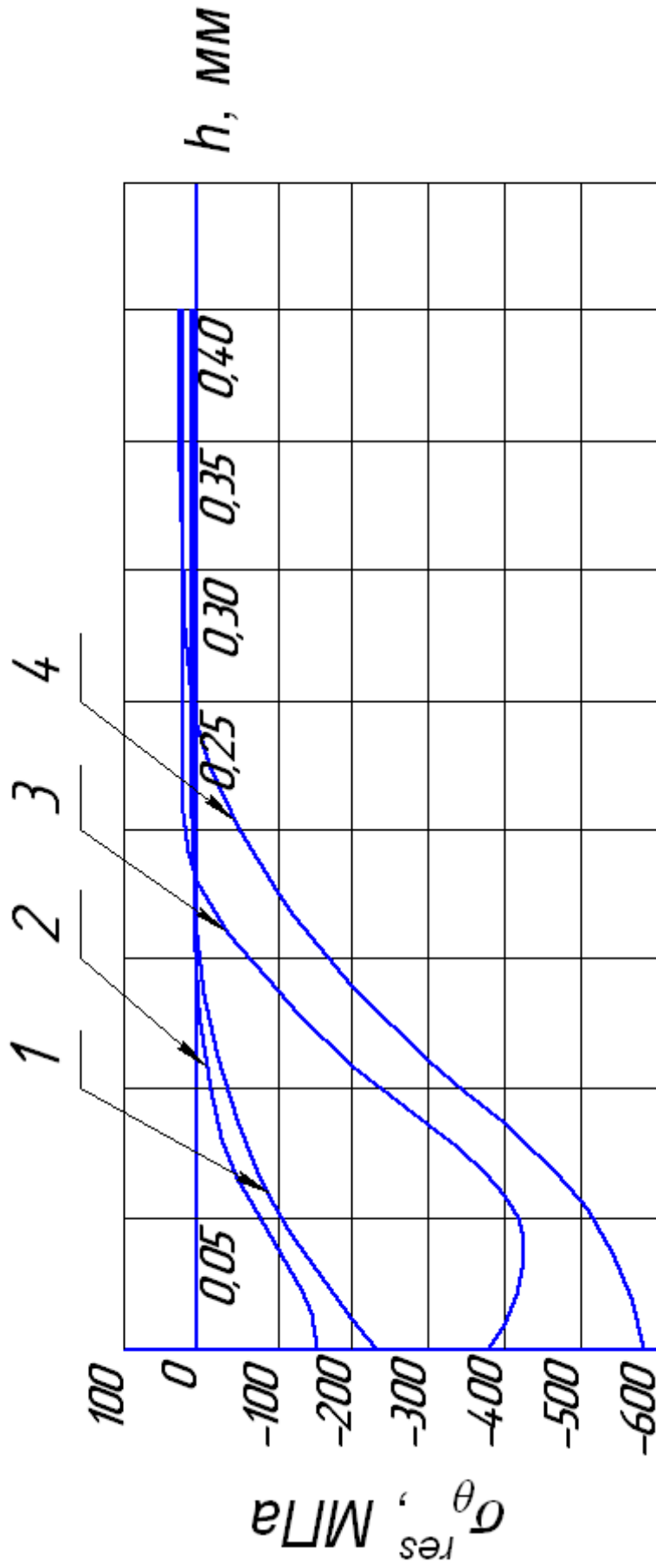
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.34 - Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке высокопрочной стали 30ХГСА



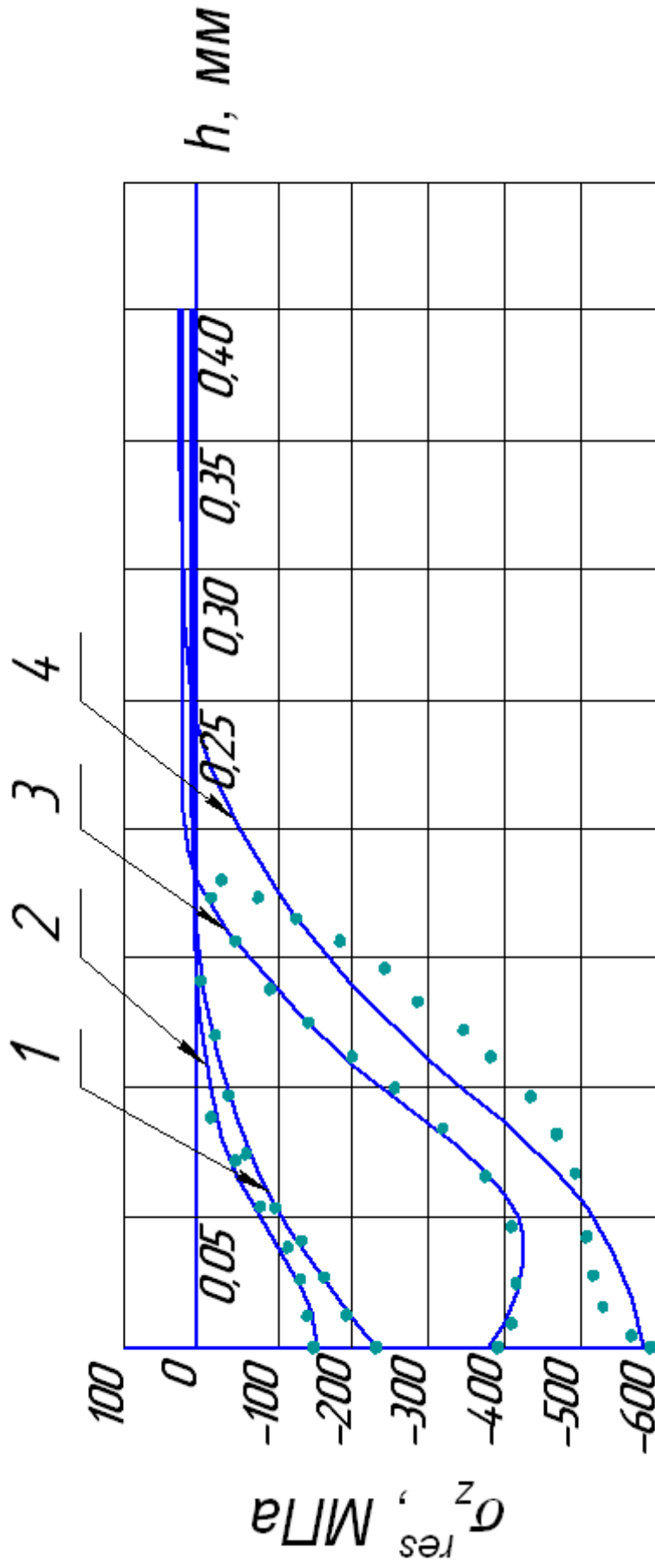
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.35- Формирование радиальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке высокопрочной стали 30ХГСА



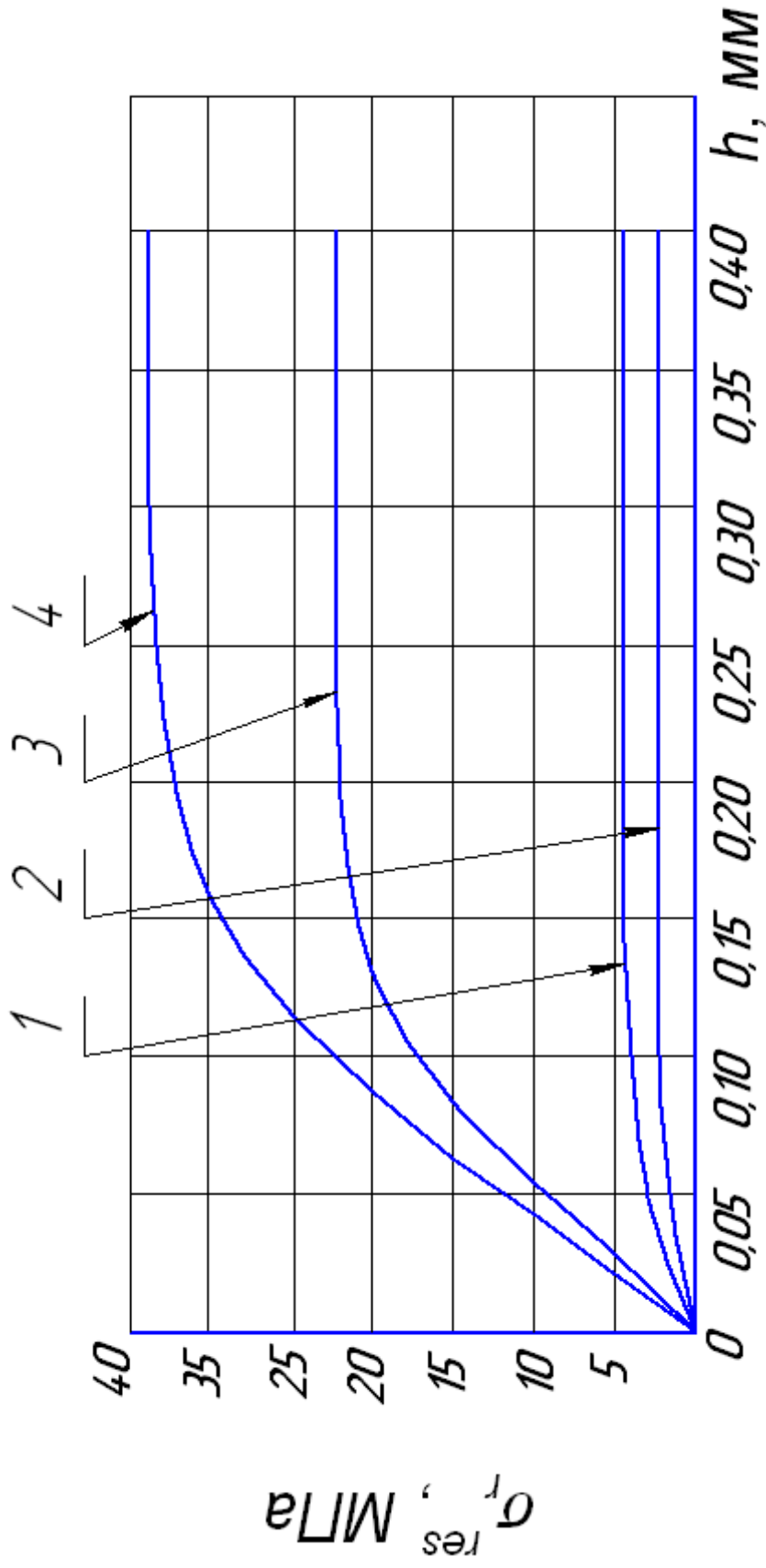
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.36 - Формирование окружных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении; 4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.37 - Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М8 при обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в тангенциальном направлении; 3 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении;

4 – нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении

Рисунок 2.38 - Формирование радиальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы М6 при обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т

2.4 Определение остаточных напряжений при свободном резании с учетом влияния ультразвуковых колебаний

При резании металла основная работа – это пластическая деформация срезаемого слоя и внешнее трение на рабочих гранях инструмента. Дополнительные ультразвуковые колебания, сообщаемые резьбонарезающему инструменту, оказывают влияние как на пластическую деформацию материала, так и на величину внешнего трения. Создаваемые ультразвуковыми колебаниями знакопеременные движения ускоряют движение и образование дислокаций, обеспечивая возникновение пластических деформаций при более низких напряжениях, а циклические перемещения контактных поверхностей вызывают периодический поворот векторов сил трения на рабочих гранях инструмента, значительно уменьшающий сопротивление сходу стружки и облегчающий процесс стружкообразования [1, 10, 24, 27, 70, 71, 87, 93, 115].

Для расчета остаточных напряжений, возникающих при нарезании резьбы, необходимо иметь данные о силах резания, усадке стружки и о механических свойствах обрабатываемого материала в условиях ультразвукового воздействия. Исследования для определения указанных параметров приведены ниже.

Процесс формирования остаточных напряжений во впадине резьбы отличается известной сложностью. В связи с этим можно оценить этот процесс при свободном резании с режимами, адекватными нарезанию резьб малого диаметра, а в дальнейшем – использовать полученные результаты для анализа формирования остаточных напряжений во впадине резьбы качественно, с возможностью последующего прогнозирования.

При механической обработке в поверхностном слое деталей возникает определенное напряжённо-деформированное состояние, характеризующееся деформационным упрочнением поверхности и появлением остаточных напряжений. При этом резание сопровождается направленной деформацией частиц поверхностного слоя детали, поэтому при взаимодействии с

нижележащими слоями возникают остаточные напряжения. Локальный нагрев тонких поверхностных слоев теплом, выделяющимся при резании, может привести к возникновению растягивающих остаточных напряжений. Структурно-фазовые изменения приводят к появлению вторичных структур с разными удельными объемами. В этом случае могут формироваться разные по знаку и величине остаточные напряжения. В зависимости от конкретных технологических условий обработки один из указанных факторов может быть преобладающим. Нарезание резьбы осуществляется с низкими скоростями резания, поэтому температура в зоне резания сравнительно низкая и следовательно доминирующим фактором, определяющим возникновение остаточных напряжений, является силовое поле.

Определение остаточных напряжений производилось на основе методики, разработанной профессором Б.А. Кравченко [71].

2.4.1 Схема силового нагружения в зоне обработки от действия сил резания

Для расчёта остаточных напряжений от действия силового поля необходимо иметь данные о силах резания и их распределения на поверхностях режущего инструмента. На рисунке 2.39 приведена схема сил, возникающих при свободном резании, на базе которой может быть составлена система уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_z &= P_N \cos \gamma + F \sin \gamma + Q \\ P_y &= F \cos \gamma - P_N \sin \gamma + N \end{aligned} \right\}, \quad (2.28)$$

где $F = \mu P_N$;

μ – коэффициент трения на передней поверхности инструмента.

Силы P_z и P_y , а для несвободного резания P_z и P_{xy} , находят опытным путем. Остальные четыре члена системы (2.28) являются искомыми величинами. Согласно этому способу определяются величины μ и N по формулам:

$$\mu = \frac{C_{P_y} Y_{P_y} a^{1-Y_{P_z}} + C_{P_z} Y_{P_z} a^{1-Y_{P_y}} \operatorname{tg} \gamma}{C_{P_z} Y_{P_z} a^{1-Y_{P_y}} - C_{P_y} Y_{P_y} a^{1-Y_{P_z}} \operatorname{tg} \gamma}, \quad (2.29)$$

где величины C_{P_y} , Y_{P_y} , C_{P_z} , Y_{P_z} являются постоянными и степенями в следующих зависимостях

$$\begin{aligned} P_y &= C_{P_y} a^{Y_{P_y}}, \\ P_z &= C_{P_z} a^{Y_{P_z}}, \\ N &= \frac{P_y (\mu \operatorname{tg} \gamma) - P_z (\mu - \operatorname{tg} \gamma)}{1 + 2\mu \operatorname{tg} \gamma - \mu^2}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Имея значения μ и N , при решении системы (2.28) находим остальные искомые величины. При этом коэффициенты трения по передней и задней поверхностях инструмента принимаются одинаковыми.

Равнодействующие силы R_n и R_z приложены соответственно на передней и задней поверхностях инструмента (см. рисунок 2.39). Как установлено многочисленными исследованиями, распределение нагрузок по этим поверхностям близко к экспоненциальному закону. На рисунке 2.40 приведены результаты исследований профессора Остафьева В.А., подтверждающие сказанное. При этом экспоненциальный характер эпюр приложенных сил таков, что их можно с минимальной погрешностью заменить эпюрами треугольного нагружения. В этом случае последующие решения значительно упрощаются. Если задняя поверхность инструмента непосредственно контактирует с обработанной поверхностью детали, то передняя оказывает свое воздействие на поверхностные слои изделия через стружку. Стружка при своём формировании претерпевает большие пластические деформации и значительно упрочняется, причем, за исключением тонкого прирезцового слоя, практически равномерно по сечению. Сказанное иллюстрируется характеристиками корня стружки, полученного при обработке сплава ЭИ766А на режиме: $V = 15$ м/мин; $a = 0,25$ мм; $b = 4,0$ мм (рисунок 2.41).

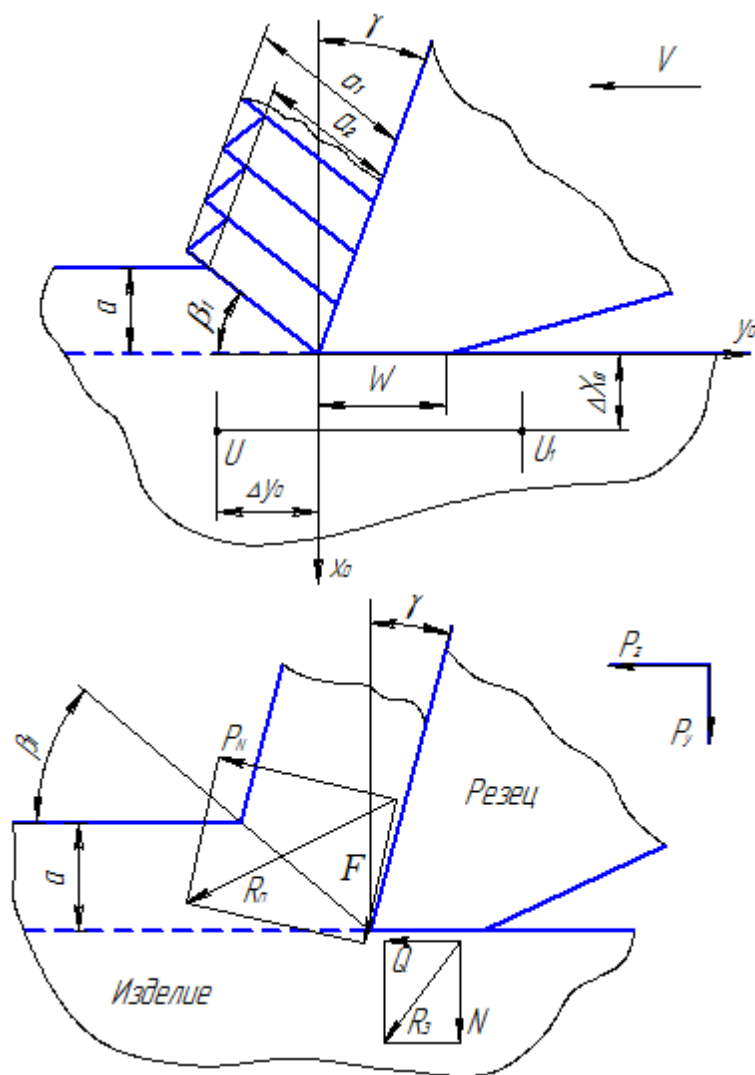


Рисунок 2.39 - Схема сил, возникающих при свободном резании

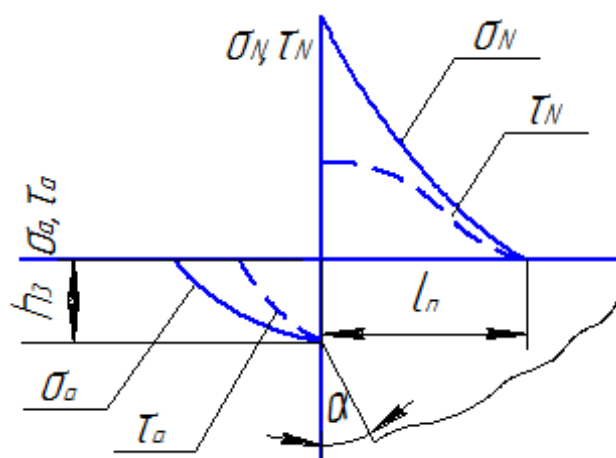


Рисунок 2.40 - Контактные нагрузки по передней и задней поверхностям

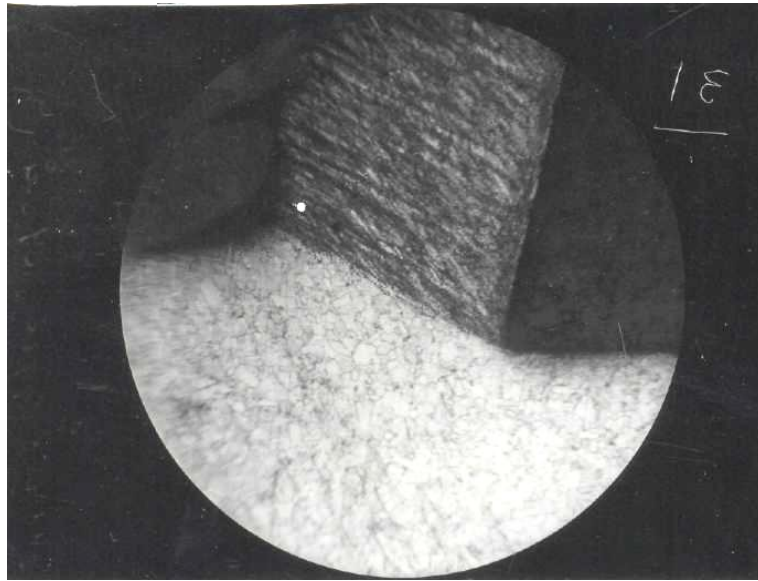


Рисунок 2.41 - Корень стружки, полученной при обработке сплава ЭИ 766А

Анализ фотографий показывает, что между основным металлом и стружкой существует четкая граница, положение которой характеризует угол сдвига β_1 . Эта граница разделяет зону больших пластических деформаций (стружка) и упруго-пластическую область (деталь). Стружка в этом случае может рассматриваться как абсолютно жесткое тело (штамп). При таком подходе действие равнодействующих сил на передней поверхности можно перенести к границе раздела и рассматривать её как равномерно распределённую нагрузку на плоскости сдвига. Сказанное характерно и для титановых сплавов. Отличие заключается лишь в том, что стружка формируется отдельными элементами, которые перемещаются в направлении сдвига. Изложенное иллюстрируется корнем стружки титанового сплава ВТ16, полученного на режиме: $V = 30$ м/мин; $a = 0,06$ мм; $b = 2,0$ мм (рисунок 2.42).



Рисунок 2.42 - Корень стружки, полученной при обработке титанового сплава ВТ 16

Поскольку центр давления эпюры сил на передней поверхности смещен от вершины инструмента на величину $1/3 l_n$, т.к. эпюра сил принята в виде треугольного нагружения, то возникает момент у вершины резца (рисунок 2.43)

В общем случае схема силового нагружения при обработке лезвийными инструментами представлена на рисунке 2.44.

$$M = \frac{Rl_n \sin(\omega - \gamma)}{3}, \quad (2.31)$$

где l_n – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента;

ω – угол действия равнодействующей силы R .

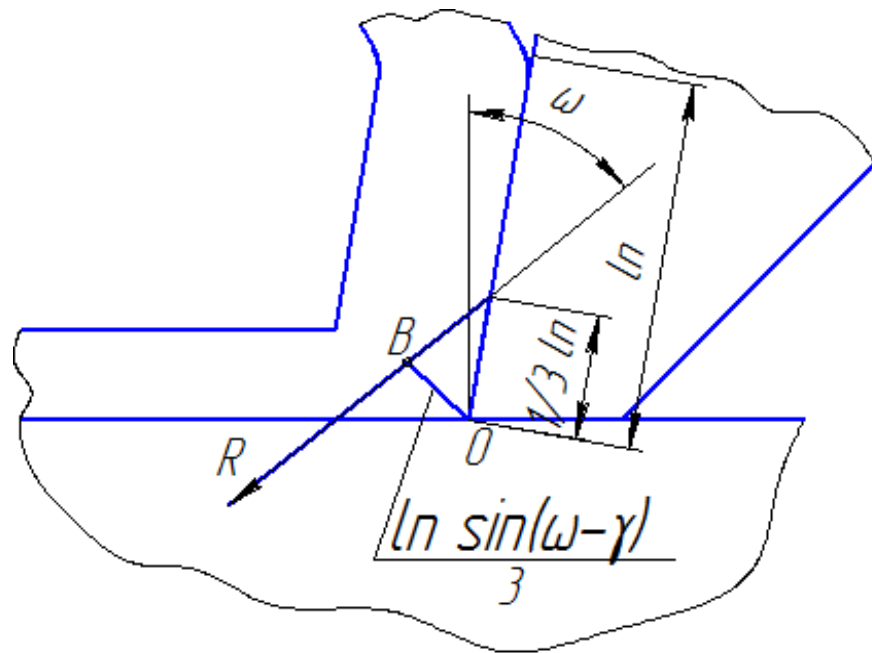


Рисунок 2.43 - Схема для определения момента резания у вершины резца

Величина l_n определяется опытным либо расчетным путем. Н.Г. Абуладзе предложил следующую зависимость для определения величины l_n :

$$l_n = a[K_l(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{Sec} \gamma], \quad (2.32)$$

где a – толщина среза;

K_l – коэффициент усадки стружки;

γ – передний угол инструмента.

Коэффициент усадки стружки для элементных стружек определяется следующим образом:

$$K_l = K_c \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}, \quad (2.33)$$

при этом коэффициент сплошности стружки равен

$$K_c = \frac{a_1 + a_2}{a_1}. \quad (2.34)$$

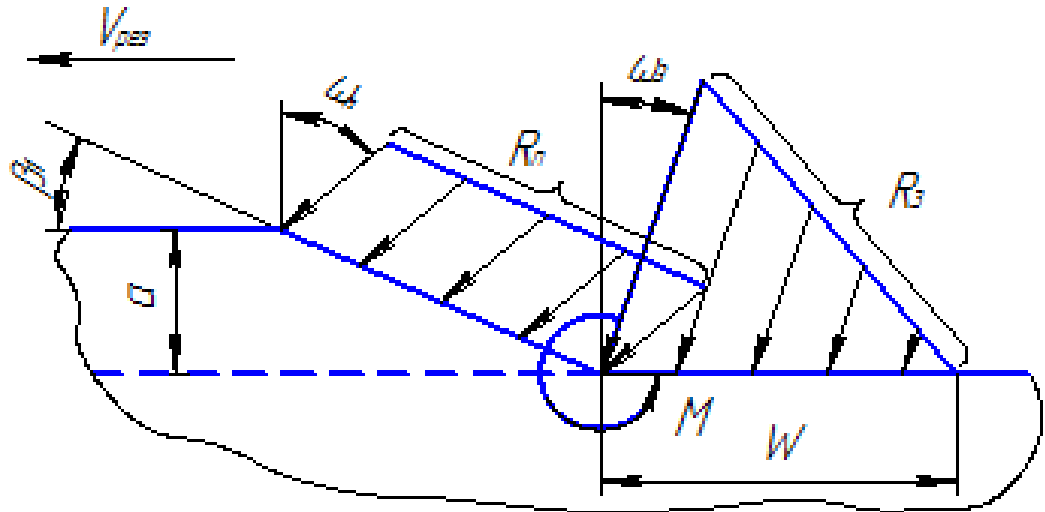


Рисунок 2.44 - Общая схема силового нагружения при обработке лезвийными инструментами

В связи с тем, что процесс лезвийной обработки материалов при нарезании резьбы характеризуется малыми толщинами среза, для упрощения расчета остаточных напряжений можно принять схему нагружения, как показано на рисунке 2.45.

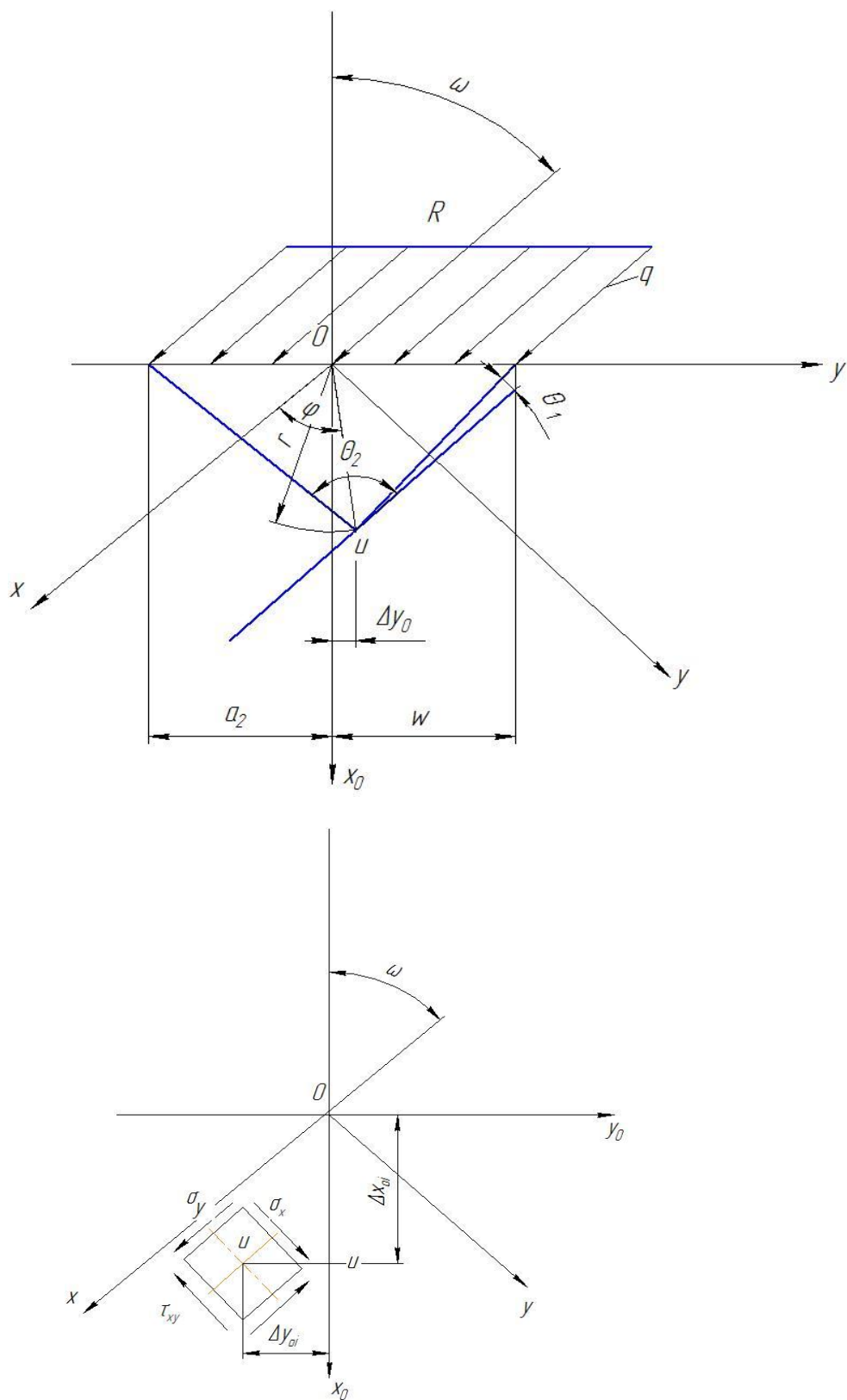


Рисунок 2.45 - Принятая схема силового нагружения при определении упругих напряжений в точке «И»

2.4.2 Определение остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной детали

На рисунке 2.45 представлена схема нагружения и необходимое построение для нахождения зависимостей, позволяющих определить упругие напряжения в точке «И» с координатами $\Delta x_0, \Delta y_0$ (система координат $X_0 Y_0$) в координатной системе XY при равномерном нагружении по плоскости сдвига. При выводе зависимостей упругих напряжений придерживаются правила: действующая сила направлена вдоль оси X . Формулы для расчета составляющих напряжений имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_x^R = -c_1[2(\theta_2 - \theta_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] \\ \sigma_y^R = -c_1[2(\theta_2 - \theta_1) - (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)] \\ \tau_{xy}^R = c_1[\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1] \end{cases}, \quad (2.35)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{q}{2\pi \cos \omega}, \\ \theta_1 &= \omega - \operatorname{arctg} \frac{w - \Delta y_0}{\Delta x_0}, \\ \theta_2 &= \omega + \operatorname{arctg} \frac{d_2 + \Delta y_0}{\Delta x_0}, \end{aligned}$$

где q – удельная нагрузка

$$q = \frac{R}{b(w + a_2)}.$$

Напряжённое поле в поверхностном слое детали, вызванное моментом силы R определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x^M &= \frac{2M \sin 2\psi}{\pi b r^2}, \\ \tau_{xy}^M &= \frac{2M \cos^2 2\psi}{\pi b r^2}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

где r – расстояние до изучаемой точки «И»;

ψ – угол между полярной осью и радиусом, проведенным в точку «И».

Значения Δy_0 и Δx_0 берутся со своими знаками, положительное значение углов θ_1 и θ_2 – против часовой стрелки.

Используя принцип суперпозиции с учётом принятых обозначений, составляющие напряжений в координатной системе XU можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{X\Sigma} &= \sigma_X^R + k\delta_X^M; \\ \sigma_{Y\Sigma} &= \sigma_Y^R + k\delta_Y^M; \\ \tau_{XY\Sigma} &= \tau_{XY}^R + k\tau_{XY}^M. \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

Опытным путем установлено, что формирование остаточных напряжений коррелирует с прочностными характеристиками обрабатываемого материала. Например, оказывается, что при лезвийной обработке материалов, у которых отношение $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,8$, формируются растягивающие остаточные напряжения, а при $\sigma_T/\sigma_B > 0,8$ – сжимающие, и чем больше это отношение, тем большие по величине формируются сжимающие остаточные напряжения, что связано с процессом стружкообразования. При элементном строении стружки роль момента у вершины резка снижается (см. рисунок 2.42). Из изложенного следует, что наблюдаемая связь между прочностными характеристиками обрабатываемого материала, величиной и знаком остаточных напряжений может быть выражена при помощи корректирующего коэффициента. Этот коэффициент принят в виде:

$$K = 1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_B}. \quad (2.38)$$

После определения упругих напряжений в поверхностном слое изделия при резании можно выделить область, где материал перейдет в упругопластическое состояние. Для этого необходимо в исследуемых точках определить интенсивность напряжений σ_i . Согласно общим положениям, в точках, где $\sigma_i > \sigma_T(\sigma_{0,2})$, возникнут упругопластические деформации.

Интенсивность напряжений относительно просто выражается, если

известны главные напряжения

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2.39)$$

Главные напряжения для условий плоской деформации подсчитываются согласно формуле

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{x\Sigma} + \sigma_{y\Sigma}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{x\Sigma} - \sigma_{y\Sigma})^2 + 4\tau_{xy\Sigma}^2}, \quad (2.40)$$

$$\sigma_2 = \mu(\sigma_1 + \sigma_3),$$

где $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона для упругой области при плосконапряженном состоянии $\sigma_2 = 0,2$.

Для определения главных деформаций необходимо определить интенсивность деформаций ε_i и угол вида деформации β_e , тогда

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_i \cos \beta_e; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_i \sin(\beta_e - 30^\circ); \\ \varepsilon_3 &= -\varepsilon_i \cos(60^\circ - \beta_e). \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Интенсивность деформации в точке, как это следует из рисунка 2.46, равна $\varepsilon_i = \sigma_i / E$.

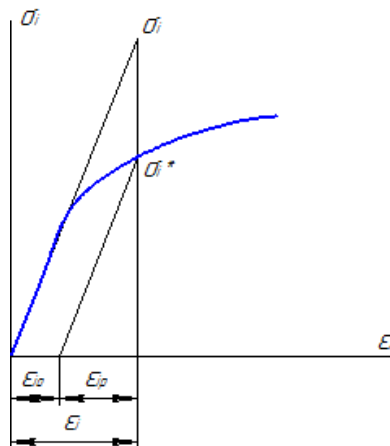


Рисунок 2.46 - К расчету остаточной интенсивности деформации

Угол вида деформации β_e равен углу вида напряженного состояния β_σ и в общем случае определяется на основании

$$\cos 3\beta_\sigma = \frac{27}{2\sigma_i^3} \begin{vmatrix} \delta_{x\Sigma} + P & \tau_{xy\Sigma} & \tau_{xz\Sigma} \\ \tau_{xy\Sigma} & \sigma_{y\Sigma} + P & \tau_{yz\Sigma} \\ \tau_{zx\Sigma} & \tau_{yz\Sigma} & \sigma_z + P \end{vmatrix}, \quad (2.42)$$

где гидростатическое давление определяется равенством

$$P = -\frac{\sigma_{x\Sigma} + \sigma_{y\Sigma} + \sigma_{z\Sigma}}{3}.$$

Эта зависимость с учетом главных напряжений преобразуется к виду

$$\cos 3\beta_\sigma = \frac{27}{2\sigma_i^3} \begin{vmatrix} \sigma_1 + P \\ \sigma_2 + P \\ \sigma_3 + P \end{vmatrix}, \quad (2.43)$$

Расчеты показывают, что для случая плоской деформации угол β_σ , рассчитанный по формулам (2.42), (2.43), близок к 30° . Это подтверждается анализом зависимостей (2.41). Действительно, для случая плоской деформации $\varepsilon_2 = 0$, поэтому угол вида деформации равен $\beta_e = 30^\circ$, что следует из второго равенства системы (2.41):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_i \sin(\beta_e - 30^\circ) = 0.$$

В связи с этим, для плоской деформации

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_i \cos 30^\circ,$$

$$\varepsilon_2 = 0,$$

$$\varepsilon_3 = -\cos 30^\circ.$$

Как следует из рассмотрения рисунка 2.46, остаточная интенсивность деформации будет равна

$$\varepsilon_{i0} = \varepsilon_i - \varepsilon_{ip},$$

где интенсивность деформации разгрузки может быть найдена, если известны

напряжения σ_i^* . Для нахождения напряжений σ_i^* необходимо иметь данные о связи между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций ε_i

При малых упруго-пластичных деформациях и простом нагружении обычно σ_i полагают связанной однозначной функциональной зависимостью с ε_i , то есть $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$. Эта функциональная связь может быть определена экспериментально по испытанию данного материала на растяжение. Обычно эта связь хорошо аппроксимируется степенной зависимостью вида

$$\sigma = A\varepsilon^m. \quad (2.44)$$

Очевидно, что искомые напряжения σ_i^* (см. рисунок 2.46) найдем, если в зависимость (2.44) подставим значение ε_i , то есть $\sigma_i^* = A\varepsilon_i^m$. На основании величин σ_i^* находим величину деформации разгрузки (см. рисунок 2.46)

$$\varepsilon_{ip} = \sigma_i^* / E.$$

Таким образом, главные остаточные деформации в общем случае составят

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1^{res} &= (\varepsilon_i - \varepsilon_{ip}) \cos \beta_\sigma; \\ \varepsilon_2^{res} &= (\varepsilon_i - \varepsilon_{ip}) \sin(\beta_\sigma - 30^\circ); \\ \varepsilon_3^{res} &= -(\varepsilon_i - \varepsilon_{ip}) \cos(60^\circ - \beta_\sigma). \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

Информация о величинах ε_1^{res} , ε_2^{res} , ε_3^{res} позволяет в дальнейшем перейти к определению остаточных напряжений.

Расчет остаточных напряжений в поверхностных слоях изделия при свободном резании осуществляется в следующей последовательности. Задаемся значением ΔX_0 начиная с величины, например, $\Delta X_0 = 0,01$. Затем для заданного значения ΔX_0 принимаем ряд значений ΔX_0 с интервалом равным 0,002 мм. Для каждой искомой точки находим по формулам (2.35), (2.36) соответствующие напряжения σ_X , σ_Y , τ_{XY} в своих координатных системах. Затем с помощью формул перехода (2.35) приводим эти данные к координатной системе XU и находим составляющие $\sigma_{X\Sigma}$, $\sigma_{Y\Sigma}$, $\tau_{XY\Sigma}$. Далее определяем главные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 и

интенсивность напряжений σ_i . Для точки, где интенсивность напряжений имеет максимальное значение σ_{imax} , продолжаем расчёт и находим интенсивность деформаций ε_i , интенсивность деформаций разгрузки ε_{ip} , значение угла вида деформации $\beta_e = \beta_\sigma$ и значения главных остаточных деформаций ε_1^{res} , ε_2^{res} , ε_3^{res} .

Таким образом, для целого ряда расчётных точек $(\Delta X_{oi}, \Delta Y_{oi})$ выбирается лишь точка «И», где интенсивность σ_{imax} . Такой выбор обусловливается следующими соображениями. В точке "И" интенсивность σ_{imax} ; и это приводит к формированию максимальных значений относительных деформаций ε_1 , ε_2 , ε_3 . Система координат X_oY_o движется вместе с вершиной резца влево, поэтому в последующий момент времени точка «И» окажется правее, где интенсивность напряжений уменьшается и уже не может оказать влияние на последующее формоизменение рассматриваемой точки. Поэтому величины ε_1 , ε_2 , ε_3 и определяющий положение осей деформации угол λ , сформировавшиеся в точке, где интенсивность напряжений максимальна, остаются неизменными и перемещаются вдоль линии с координатой ΔX_0 образуя упрочнённый поверхностный слой.

На рисунке 2.45 показана схема напряженного состояния в точке «И» с координатами ΔX_{oi} , ΔY_{oi} в координатной системе XY . Под воздействием напряжений $\sigma_{x\Sigma}$, $\sigma_{y\Sigma}$, $\tau_{xy\Sigma}$ в области точки «И» частицы материала приобретут деформацию определенной направленности, которая может быть определена, если известен угол λ :

$$\operatorname{tg} 2\lambda = \frac{2\tau_{xy\Sigma}}{\sigma_{x\Sigma} - \sigma_{y\Sigma}}. \quad (2.46)$$

При этом возможны два варианта. В случае $\sigma_{x\Sigma} > \sigma_{y\Sigma}$ угол λ отсчитывается от оси X , как это показано на рисунок 2.47, б (положительное направление против часовой стрелки). Если $\sigma_{x\Sigma} < \sigma_{y\Sigma}$, то отсчет ведется от оси Y (рисунок 2.47, а).

Направленность деформаций отдельных частиц обрабатываемого материала в поверхностном слое изделия при лезвийной обработке показана на схемах рисунок 2.47, а и рисунок 2.47, б.

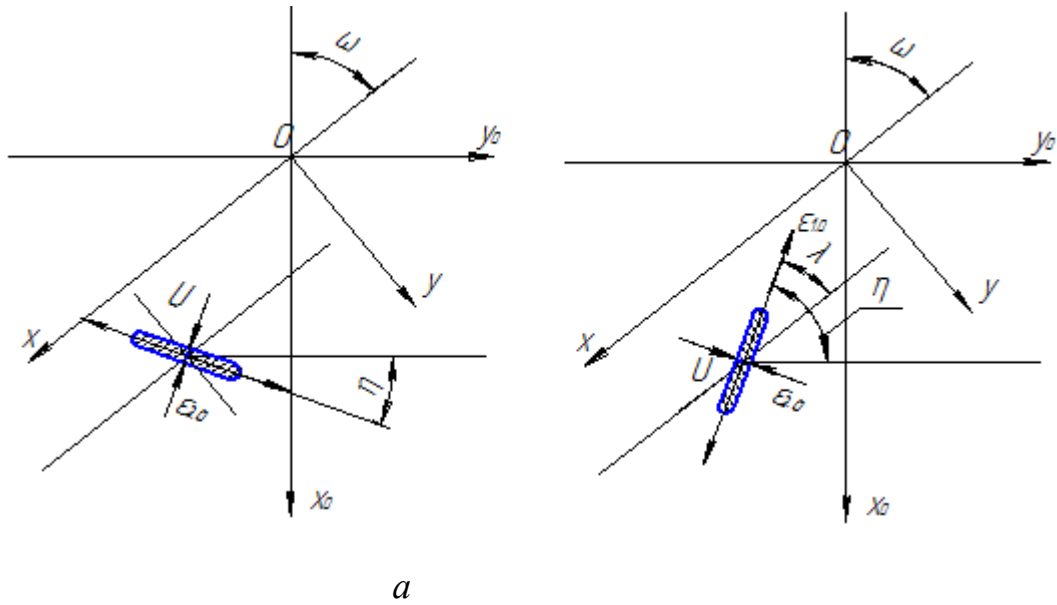


Рисунок 2.47. Определение направленности деформаций отдельных частиц обрабатываемого материала

Приводимые рисунки соответствуют сечению, в котором находятся вектор скорости и относительные деформации ε_1 и ε_3 . В перпендикулярном направлении плоскости чертежа содержится относительная деформация ε_2 . Для определения составляющих деформаций в тангенциальном направлении, совпадающим с вектором скорости резания (ось Y_0), и в перпендикулярном направлении (осевом направлении – ось X_0) воспользуемся известным равенством $\varepsilon_v = \varepsilon_1 l^2 + \varepsilon_2 m^2 + \varepsilon_3 n^2$.

Из рассмотрения рисунков 2.47, *a* и 2.47, *б* следует

$$\begin{aligned} l_{Y_0} &= \cos \eta; \quad m_{Y_0} = \cos 90^\circ = 0; \quad n_{Y_0} = \sin \eta; \\ l_{X_0} &= \cos 90^\circ = 0; \quad m_{X_0} = \cos 0 = 1; \quad n_{X_0} = \cos 90 = 0. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Таким образом, составляющие относительных деформаций в тангенциальном и осевом направлениях соответственно будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\theta^{res} &= \varepsilon_1^{res} \cos^2 \eta + \varepsilon_3^{res} \sin^2 \eta; \\ \varepsilon_z^{res} &= \varepsilon_2^{res}. \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Значение угла η вытекает из построений, выполненных на рисунок 2.47, *a* и на рисунок 2.47, *б*:

- для случая $\sigma_{X\Sigma} > \sigma_{Y\Sigma}$ $\eta = 90^\circ - (\omega - \lambda)$;
- для случая $\sigma_{X\Sigma} > \sigma_{Y\Sigma}$ $\eta = \omega - \lambda$.

При лезвийной обработке в процесс пластического деформирования вовлекается относительно тонкий поверхностный слой обрабатываемой детали (обычно около 200 мкм), и напряжённое состояние близко к плосконапряжённому. В результате формулы для расчёта остаточных напряжений с учётом зависимостей (2.48) будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta}^{res} &= -\frac{\varepsilon_{\theta}^{res} + \mu\varepsilon_z^{res}}{1-\mu^2} E; \\ \sigma_z^{res} &= -\frac{\varepsilon_z^{res} + \mu\varepsilon_{\theta}^{res}}{1-\mu^2} E. \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Анализ показывает, что силы на передней и задней поверхностях приводят к такому напряженному состоянию в поверхностном слое детали, при котором ориентация составляющей остаточной деформации ε_1^{res} образует с направлением оси Y_0 угол $\eta < 45^\circ$. При таком направлении вектора относительного удлинения ε_1^{res} согласно зависимостям (2.48) и (2.49) возникают остаточные напряжения сжатия. Момент у режущей кромки приводит к величинам $\eta > 45$ и наведению растягивающих остаточных напряжений. Таким образом, знак остаточных напряжений определяется конкурирующим взаимодействием сил на задней и передней поверхностях инструмента и момента у режущей кромки. При обработке пластичных материалов за счёт относительно больших значений момента у режущей кромки инструмента сформируются растягивающие остаточные напряжения, так как угол η в зависимостях (2.48) больше 45° . В случае обработки малопластичных материалов (например, закаленных сталей) и материалов с гексагональной структурой превалирующее значение в формировании напряженного состояния приобретают силы R_{π} и R_z , так как за счет элементного строения стружки интегральная величина длины контакта l_{π} резко уменьшается, снижая значения момента, что сопровождается уменьшением угла $\eta > 45$, и, как следствие, за счет стремления поверхностного слоя изделия

площадь увеличивается и во взаимодействии с нижележащими слоями формируются сжимающие остаточные напряжения.

Общеизвестно, что наложение на инструмент ультразвуковых колебаний приводит к изменению кинематики процесса, а также сил резания и трения. В свою очередь изменение силовой ситуации в зоне резания оказывает влияние на формирование остаточных напряжений. Таким образом, для расчёта остаточных напряжений и для выявления взаимосвязи ультразвука с силами резания были проведены специальные исследования.

Опытным путём определялись силы P_Z и P_Y , возникающие при свободном резании титанового сплава ВТ 16, ширина среза $b = 2$ мм, скорость резания $V = 30$ м/мин. Из приведенных данных следует, что при сообщении резцу радиальных ультразвуковых колебаний ($\xi = 5$ мкм) наблюдается уменьшение силы P_Y на 20-30 %. Значительного изменения главной составляющей силы резания P_Z не наблюдалось.

Обмер стружек, полученных в общих условиях и с наложением ультразвуковых колебаний, показал, что в ультразвуковом поле угол сдвига уменьшается с $\beta_1 = 54^\circ$ до $\beta_1 = 43^\circ$ и, соответственно, коэффициент усадки стружки растет на 20-30 %. Это обстоятельство указывает на интенсификацию сдвиговых процессов за счет облегчения дислокационных перемещений. Однако в силу незначительных изменений величин β_1 и K_a наблюдается небольшое изменение остаточных напряжений.

Также были проведены исследования влияния ультразвука на процесс пластического деформирования обрабатываемого материала.

Исследования проводились с наложением на резец радиальных ультразвуковых колебаний. Резец поджимался к детали с усилием равным по значению средней силе P_Y^* , инструменту сообщались ультразвуковые колебания, и затем определялась площадь пятна контакта резца с деталью. Потом опытным путем подбиралось такое усилие прижима резца P_Y , при котором площадь контакта была равной по величине площади контакта, полученной от действия

ультразвука. Очевидно, что для расчета при ультразвуковом резбонарезании следует принимать силу P_y , учитывающую влияние ультразвука на процесс пластического деформирования обрабатываемого материала (табл. 2.2).

Таблица – 2.2 - Значения составляющих сил резания при обработке сплава ВТ16

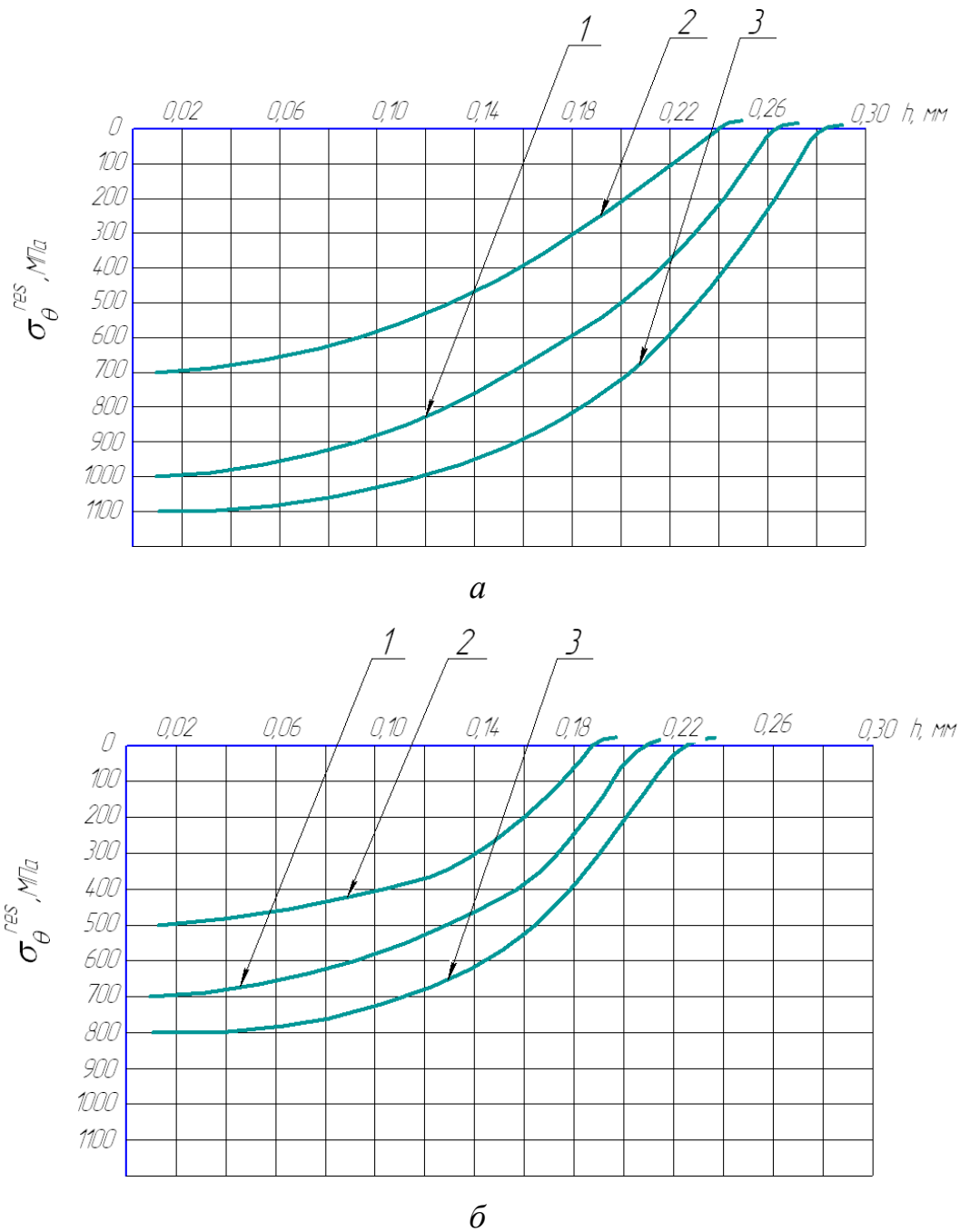
Толщина срезаемого слоя, a , мм	Силы резания, Н				
	P_z	P_z	P_y	P_y	P_y^*
	без ультразвука	с ультразвуком	без ультразвука	с ультразвуком	
0,05	330	300	230	200	380
0,01	550	520	330	300	470

Значения рассчитанных остаточных напряжений показаны на рисунках 2.48 и 2.49.

На рисунке 2.48 приведены результаты расчетов тангенциальных остаточных напряжений при свободном резании в обычных условиях и с наложением ультразвуковых колебаний. На рисунке 2.49 – осевые остаточные напряжения при тех же условиях.

Если сопоставить данные расчета с реальными значениями остаточных напряжений, найденных опытным путем, то наблюдается практическое совпадение значений тангенциальных остаточных напряжений расчетных с осевыми, полученными опытным путем. Учитывая, что в реальных условиях во впадине резьбы мы имеем стесненное состояние, характеризующееся максимальными деформациями, можно предположить возможность их оценки по максимальным деформациям, найденным при расчете, т.е. в тангенциальном направлении. Поэтому приведенный анализ формирования поверхностного слоя деталей из титанового сплава ВТ 16 при обычном и ультразвуковом резании имеет, прежде всего, качественное значение. Однако, на основании этих решений можно прогнозировать процесс наведения остаточных напряжений при

изменении параметров обработки, в том числе, и при нарезании резьбы с наложением ультразвуковых колебаний.

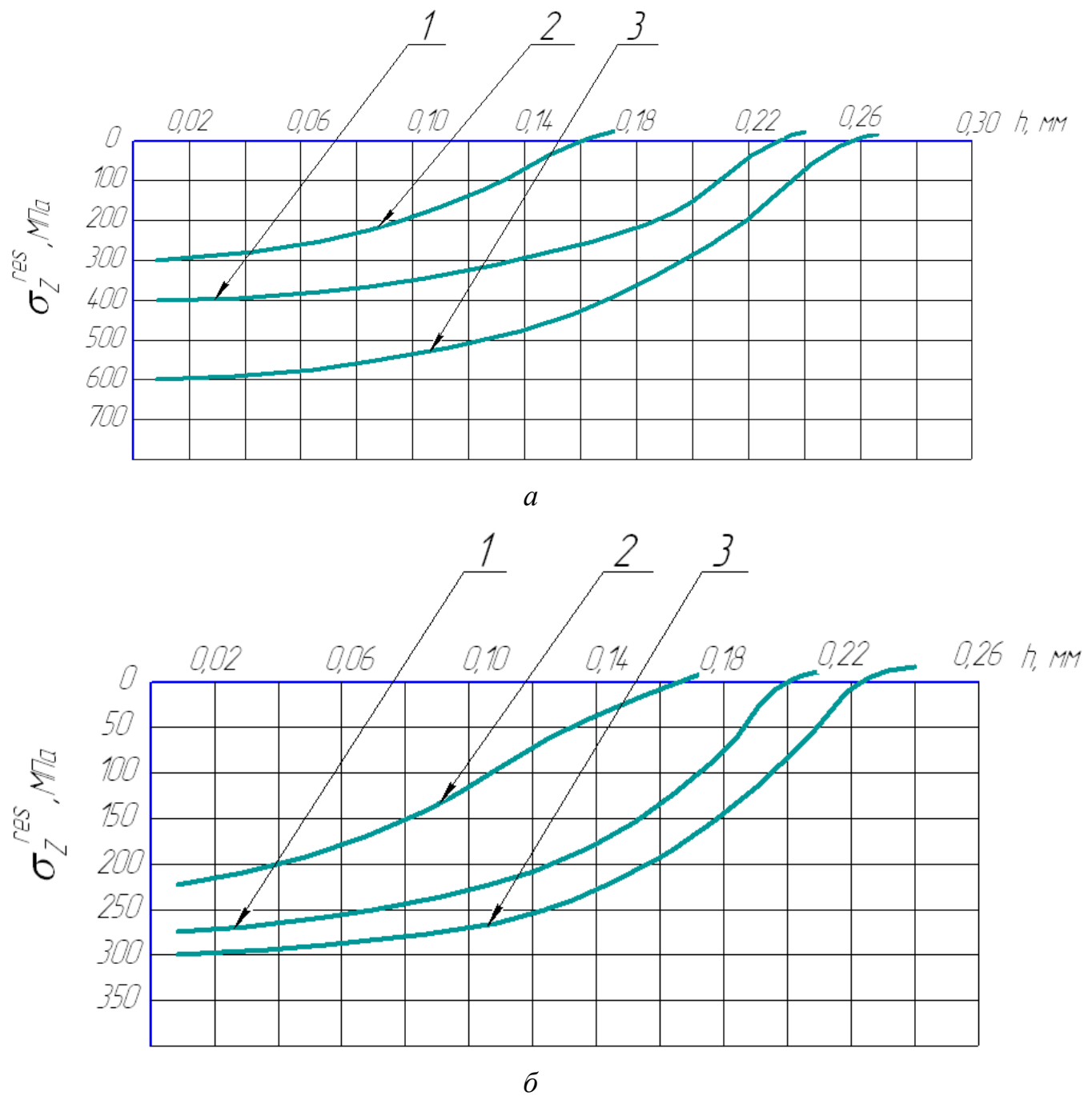


а - при $a = 0,1$ мм; б - при $a = 0,05$ мм

1 - обработка без ультразвука; 2 - резание с ультразвуком;

3 - с учётом силы P_y^*

Рисунок 2.48 - Распределение тангенциальных остаточных напряжений



а - при $a = 0,1$ мм; б - при $a = 0,05$ мм

1 - обработка без ультразвука; 2 - резание с ультразвуком;

3 - с учётом силы P_y^*

Рисунок 2.49. Распределение осевых остаточных напряжений

Выводы по главе

1. Раскрыт и математически описан механизм влияния ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы, являющихся концентраторами напряжений. Установлены условия интенсификации процесса образования остаточных напряжений сжатия путём воздействия различными по направлению ультразвуковыми колебаниями и с помощью математической модели получены аналитические зависимости расчёта напряжённо-деформированного состояния во впадинах резьбы.

2. Для установления напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя во впадинах резьбы, разработана методика экспериментального определения осевых остаточных напряжений.

3. На основе анализа процесса нарезания резьбы разработана феноменологическая модель, позволяющая определить влияние крутящего момента резания при обработке с ультразвуковыми колебаниями на формирование остаточных напряжений в тангенциальном и осевом направлениях.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния различных параметров ультразвука на формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы. В результате проведённых экспериментов установлено, что применение тангенциальных колебаний приводит к уменьшению (по модулю) значений остаточных напряжений по сравнению с обработкой без ультразвука, а применение осевых или радиальных ультразвуковых колебаний приводит к увеличению (по модулю) значений осевых остаточных напряжений в 1,5 - 2 раза.

5. Расчётным путём получено полное распределение пластических деформаций и остаточных напряжений (окружных, осевых и радиальных) во впадинах резьбы при обработке титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ16, нержавеющей стали 12Х18Н9Т и стали 30ХГСА с различными по направлению ультразвуковыми колебаниями. При нарезании резьбы с радиальными

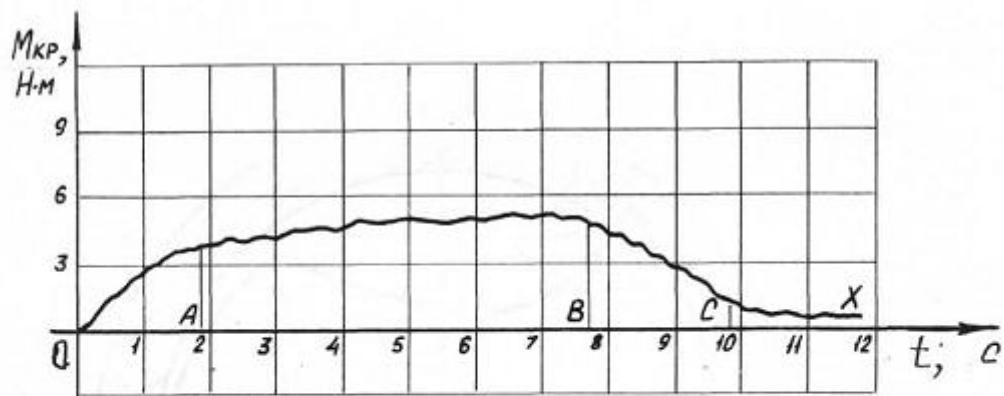
ультразвуковыми колебаниями удалось получить следующие максимальные значения сжимающих остаточных напряжений: при обработке титанового сплава ВТЗ-1 сжимающие остаточные напряжения достигают значений порядка 900 МПа на глубине залегания 0,08 мм, титанового сплава ВТ16 около 1100 МПа на глубине 0,06 мм, стали 30ХГСА около 1000 МПа на глубине 0,06 мм, нержавеющей стали 12Х18Н9Т около 480 МПа на глубине 0,03-0,07 мм.

4. На основе проведённого анализа установлено, что для формирования в поверхностном слое резьбы благоприятных максимальных сжимающих остаточных напряжений непосредственно в процессе нарезания резьбы окончательную обработку следует производить с радиальными ультразвуковыми колебаниями. Также возможно применение осевых ультразвуковых колебаний, так как сжимающие остаточные напряжения имеют близкие значения. При этом имеется возможность повысить предел выносливости резьбовых деталей за счёт сжимающих остаточных напряжений без дополнительных упрочняющих операций.

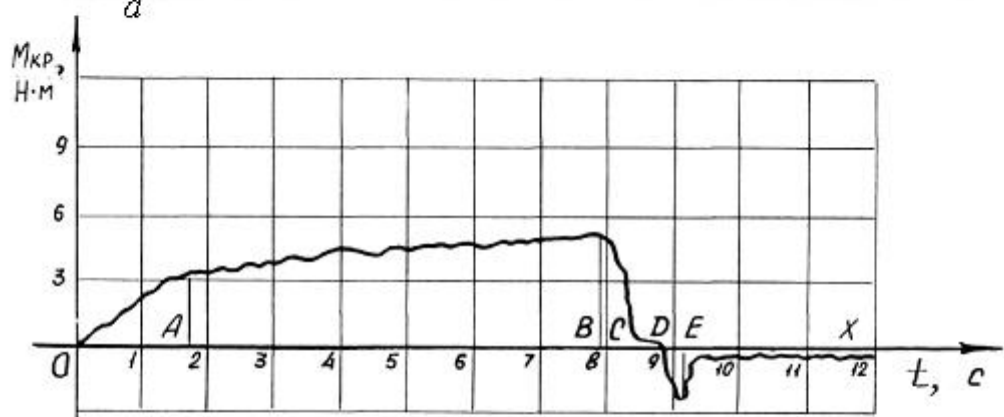
Глава 3 Результаты экспериментальных исследований влияния ультразвуковых колебаний на крутящий момент, стойкость метчиков, точность нарезаемых резьб, шероховатость обработанной поверхности и деформационное упрочнение

3.1 Анализ технологических особенностей процесса нарезания внутренних резьб в глухих отверстиях и специальные конструкции метчиков

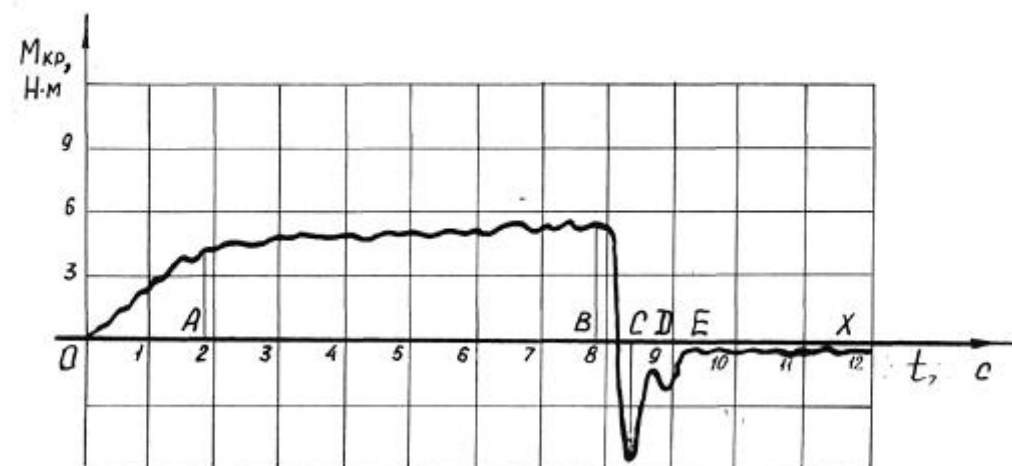
Процесс нарезания резьб в глухих отверстиях имеет существенные отличия по сравнению с нарезанием резьб в сквозных отверстиях. В сквозных отверстиях резьба нарезается на всю длину отверстия, стружка легко удаляется из зоны обработки, режущая часть метчика может иметь значительную длину и не ограничена глубиной отверстия под резьбу. При нарезании резьбы в глухих отверстиях возникают сложности, связанные с отводом стружки из отверстия, с конструкцией метчиков и другими факторами. Для выявления отличий был проведён сопоставительный анализ технологических процессов нарезания внутренних резьб в сквозных и других отверстиях [89]. При этом, как следует из рисунка 3.1, нарезание резьбы в сквозном отверстии осуществляется следующим образом: сначала происходит врезание режущей части метчика и наблюдается резкий рост крутящего момента резания (ОА), затем процесс резания стабилизируется и осуществляется нарезание резьбы по всей длине отверстия (АВ). При этом имеет место незначительное увеличение крутящего момента резания, связанное с трением, возникающим на калибрующей части метчика при увеличении глубины нарезаемой резьбы. Далее можно выделить следующие этапы. Это выход режущей части метчика за пределы обработанного отверстия и калибровка резьбы (ВС), а далее остановка метчика, его реверсирование и вывинчивание из отверстия. Нарезание резьбы в глухих отверстиях характеризуется следующими этапами. Как следует из рисунков 3.1,б и 3.1,в сначала так же как и при нарезании сквозных резьб происходит врезание режущей



а



б



в

а – нарезание резьбы в сквозном отверстии, б – нарезание резьбы в глухом отверстии, в – нарезание резьбы в глухом отверстии до дна

Рисунок 3.1 - Осциллограммы крутящего момента резания при обработке метчиком

части метчика, сопровождающееся ростом крутящего момента резания (ОА). Далее нарезается резьба на требуемую глубину (АВ) и происходит остановка метчика в отверстии (режущая часть не выходит за пределы обрабатываемого отверстия) а затем осуществляется реверсирование метчика и выход из отверстия с резьбой (ВХ).

Анализируя проблемы, возникающие при обработке глухих отверстий можно сделать следующие выводы. Негативное воздействие на заключительном этапе резьб метчиком оказывают стружки, накопившиеся на дне отверстия в процессе обработки, а также то, что в момент остановки метчика в отверстии у каждого режущего зуба метчика остаются корни неотделённых стружек от обрабатываемой заготовки. При реверсировании метчика режущие зубья своей задней поверхностью вступают во взаимодействие с неотделёнными стружками (рисунок 3.2), что может привести к сколу режущих зубьев от действия силы $P_{см}$.

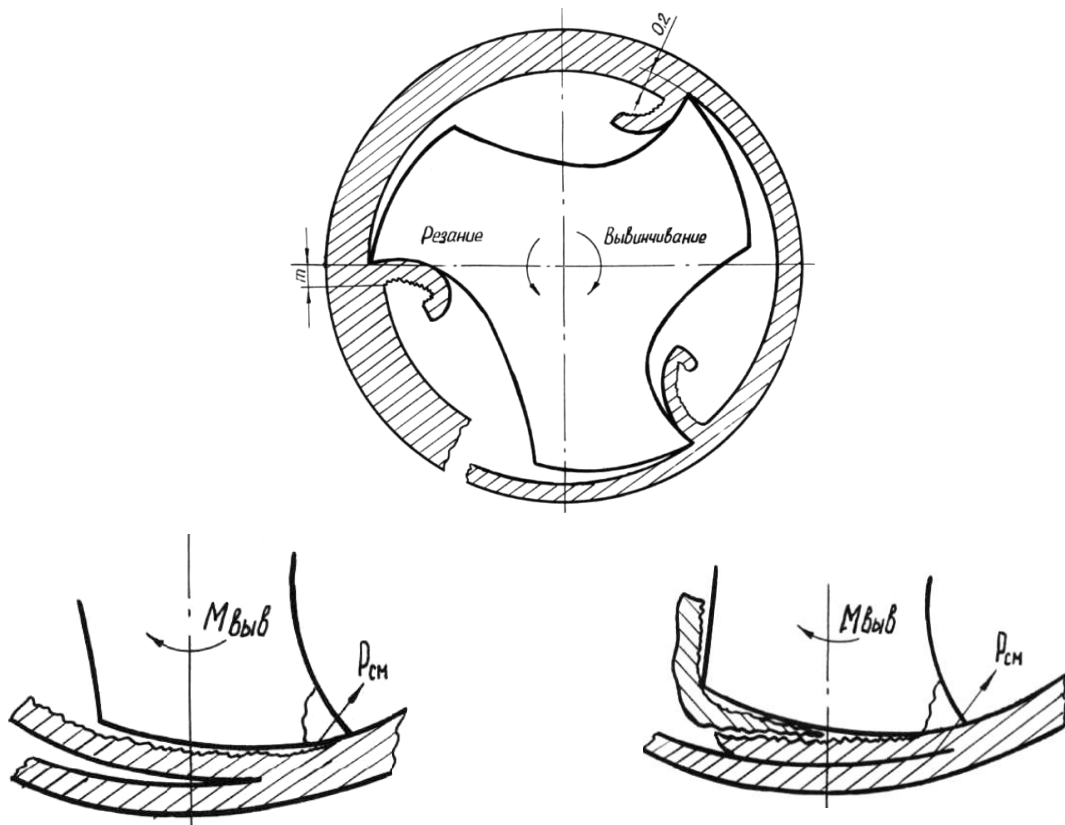


Рисунок 3.2. - Особенности нарезания резьбы метчиком в глухом отверстии

Из представленных осциллограмм следует, что при нарезании резьбы до дна отверстия в момент реверсирования метчика происходит резкий скачок крутящего момента от воздействия стружек, скопившихся на дне отверстия и задней поверхности режущих зубьев метчика. При этом стружка попадает под затылованную поверхность режущих зубьев метчика и происходит их смятие, кроме этого, как уже отмечалось ранее, режущие зубья подвергаются действию силы $P_{см}$, от контакта с корнями неотделённых стружек. Учитывая тот факт, что взаимодействие режущих зубьев с срезанной стружкой может происходить при определённых условиях был проведён анализ процесса нарезания резьб в глухих отверстиях, позволяющий определить объем срезанной стружки, который может скапливаться на дне отверстия.

Как следует из рисунка 3.3 объем стружки можно вычислить следующим образом:

$$V_{СТР} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_M^2}{4} - \frac{\pi d_0^2}{4} \right) L, \quad (3.1)$$

или

$$V_{СТР} = \frac{\pi L}{8} (d_M^2 - d_0^2). \quad (3.2)$$

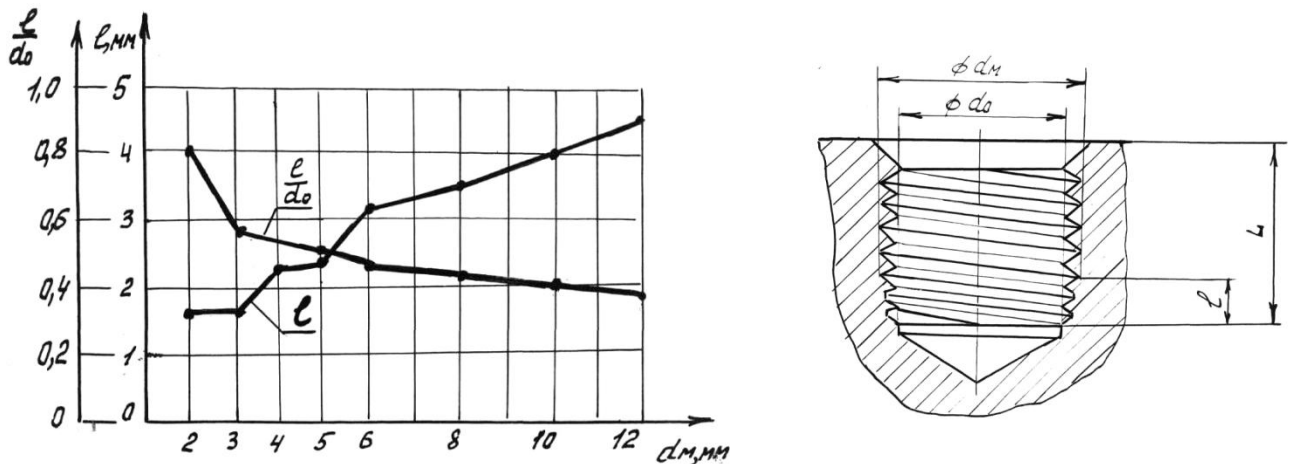
Высоту срезанной стружки l можно определить из выражения

$$\frac{\pi L}{8} (d_M^2 - d_0^2) = \frac{\pi l d_0^2}{4} \quad (3.3)$$

откуда:

$$l = \frac{d_M^2 - d_0^2}{4} LK, \quad (3.4)$$

где K – коэффициент, учитывающий неплотное размещение стружки на дне отверстия $K = 1,2$.



d_M – диаметр метчика, d_0 – диаметр отверстия, L – длина нарезанной резьбы, l – длина, которую займёт срезанная стружка

Рисунок 3.3 - К анализу особенностей нарезания резьб в глухих отверстиях

Из приведённых на рисунке 3.3 зависимостей можно сделать вывод о том, что с уменьшением диаметра нарезаемой резьбы условия обработки значительно ухудшаются, так как с увеличением объёма срезаемой стружки на дне глухого отверстия увеличивается вероятность попадания срезанных стружек под режущие зубья метчика, что может привести к их разрушению. В связи с этим необходимо принять меры по удалению стружки из обрабатываемого отверстия в процессе резания или увеличить глубину отверстия, исключив возможность внедрения метчика в зону l . Следует отметить, что увеличение глубины отверстия приведет к увеличению габаритов и массы детали.

Выявленные особенности предопределили необходимость разработки специальных конструкций метчиков, в том числе для ультразвукового резбонарезания.

В настоящее время разработаны и выпускаются промышленностью стандартные метчики для нарезания резьб в сквозных отверстиях, в том числе для нарезания резьб в нержавеющей и жаропрочных сталях. Проведенный анализ показал, что нарезания резьб в глухих отверстиях в силу специфических особенностей вызывает определенные затруднения. Особенно проблемным

является нарезание резьб в заготовках из материалов с особыми физико-механическими характеристиками. Подтверждением данного факта служит большое количество изобретений по данной тематике. Так, например, предложен способ (патент № 2004121426) при котором глухое отверстие предварительно заполняют вязкой технологической средой, которая при нарезании резьбы выдавливается вместе со стружкой. Анализ основных конструктивных особенности метчиков для нарезания резьб в глухих отверстиях приведён ниже (рисунок 3.4).

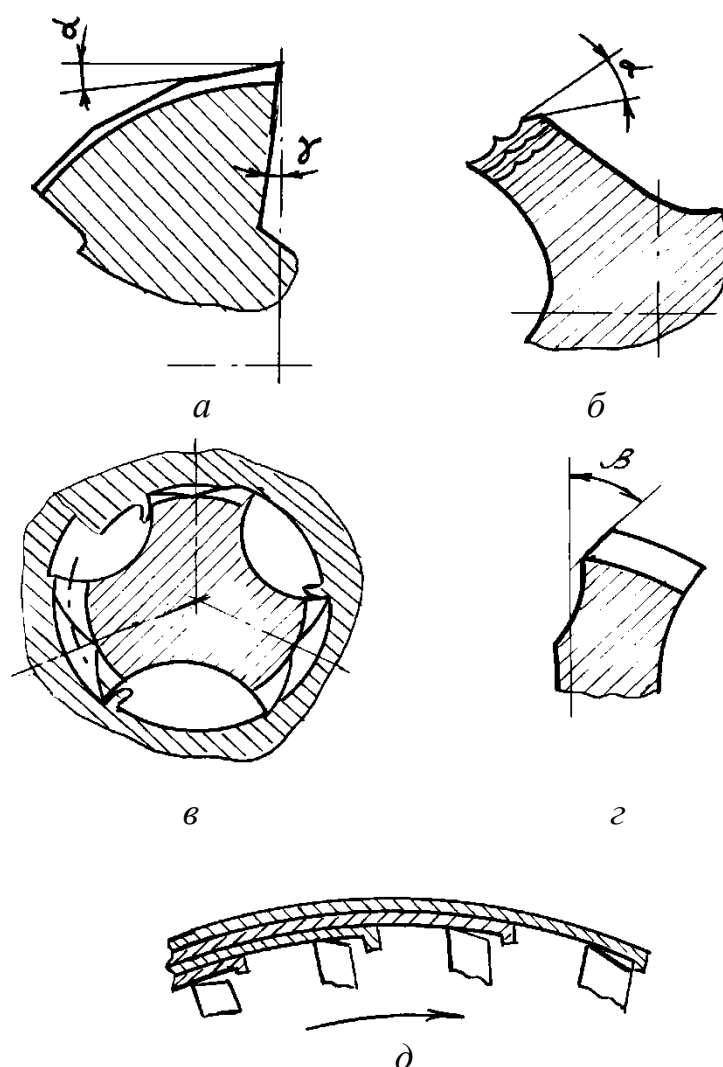


Рисунок 3.4 – Специальные конструкции метчиков для нарезания резьб в глухих отверстиях

Метчики, имеющие специальное затылование по задней поверхности зуба (рисунок 3.4, *а*). Применение специального затылования позволяет уменьшить задний угол α и, следовательно, силу смятия, действующую на режущую кромку зуба метчика. При этом также повышается прочность зуба и уменьшается вероятность скола при вывинчивании метчика. Применение данных конструкций метчиков позволяет повысить стойкость метчиков за счет уменьшения крутящего момента при вывинчивании.

Метчики, имеющие рифление на задней поверхности зубьев (рисунок 3.4, *б*). Данная конструкция также позволяет повысить стойкость метчика за счёт лучшего срезания оставшихся корней стружек и изменения заднего угла α .

На рисунке 3.4, *в* представлены метчики имеющие зубья обратного резания, позволяющие срезать корни стружек, образованные при нарезании резьбы последующими зубьями. В результате также улучшаются условия работы метчика и повышается его стойкость.

Метчики, имеющие зубья с отрицательными значениями переднего угла, позволяющие предотвратить сколы за счет увеличения прочности (рисунок 3.4, *г*). В результате также повышается стойкость метчика.

Метчики, у которых, с целью уменьшения крутящего момента при вывинчивании, изменен угол перьев таким образом, что срезание корней стружек происходит поочередно каждым зубом метчика (рисунок 3.4, *д*), что также позволяет увеличить работоспособность метчика.

В перечисленных пяти группах обобщены практически все конструктивные признаки, позволяющие повысить работоспособность метчиков при нарезании глухих резьб.

Все перечисленные изменения конструкций метчиков позволяют в различной степени, в основном в зависимости от обрабатываемых материалов, увеличить стойкость метчиков.

На основании анализа приведенных конструкций была разработана новая конструкция метчика (рисунок 3.5). Отличительной особенностью этой

конструкции является неравномерное расположение перьев с режущими зубьями метчика. В результате, при работе данным метчиком срезание корней неотделённых стружек происходит поочередно каждым пером метчика, что приводит к уменьшению крутящего момента при вывинчивании в 1,5 - 2,5 раза. Хорошо зарекомендовали себя метчики с винтовыми канавками и покрытием из нитрида титана (рисунок 3.6). Наличие винтовых канавок в сочетании с дополнительным колебательным движением инструмента способствует лучшему удалению стружки из отверстия в процессе обработки. Это особенно важно при нарезании резьб в глухих отверстиях сразу полнопрофильным метчиком.

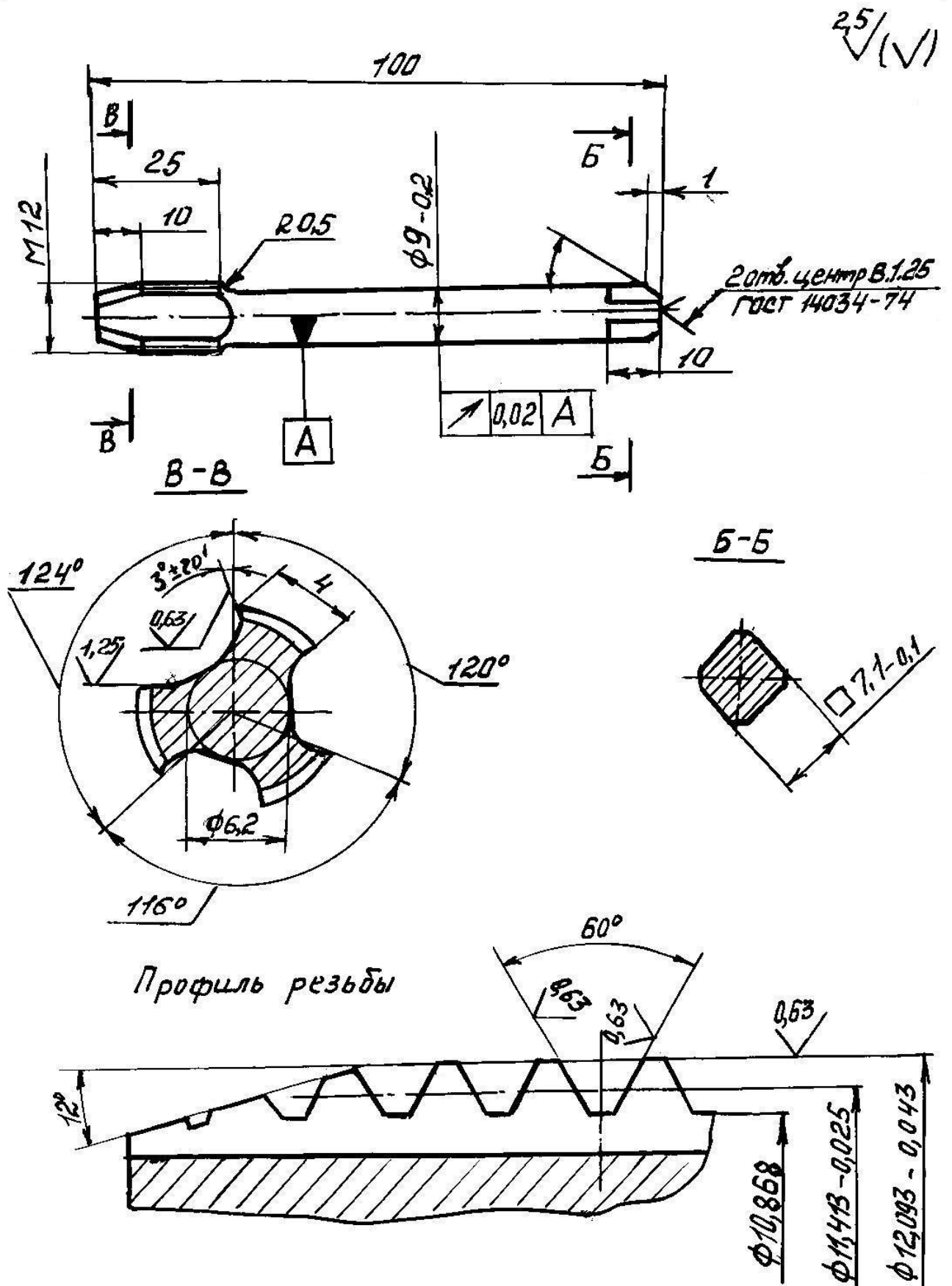


Рисунок 3.5 - Метчик с неравномерным расположением режущих зубьев

3.2 Исследование влияния ультразвука на крутящий момент при нарезании внутренних резьб метчиками в глухих отверстиях

При нарезании резьбы метчиком основным силовым фактором является крутящий момент резания, поэтому были проведены исследования по влиянию различных технологических факторов на изменение крутящего момента резания. Основной задачей исследования являлось установить влияние ультразвуковых колебаний на процесс нарезания резьб в глухих отверстиях заготовок из труднообрабатываемых материалов. Рассмотрим более подробно силы действующей на метчик при нарезании резьбы.

3.2.1 Силы, действующие на метчик при резьбонарезании

При нарезании резьбы на метчик действуют силы как со стороны шпинделя станка, так и со стороны обрабатываемой заготовки (рисунок 3.7). К хвостовику метчика прикладывается внешняя сила $P_{o\text{ вн}}$ и крутящий момент $M_{кр}$. В начальный период обработки осевые составляющие силы резания P_x являются реакцией внешней силы $P_{o\text{ вн}}$. В дальнейшем функцию $P_{o\text{ вн}}$ частично или полностью берет на себя сила самозатягивания.

Осевую составляющую силы резания P_x можно представить как сумму осевых сил, вызванных резанием отдельными зубьями метчика:

$$P_x = \sum_1^n P_{x_i} \quad (3.5)$$

Для метчиков с наклонными стружечными канавками

$$P_x = \sum_1^n P_{x_i} \pm \sum_1^n P'_{x_i} \quad (3.6)$$

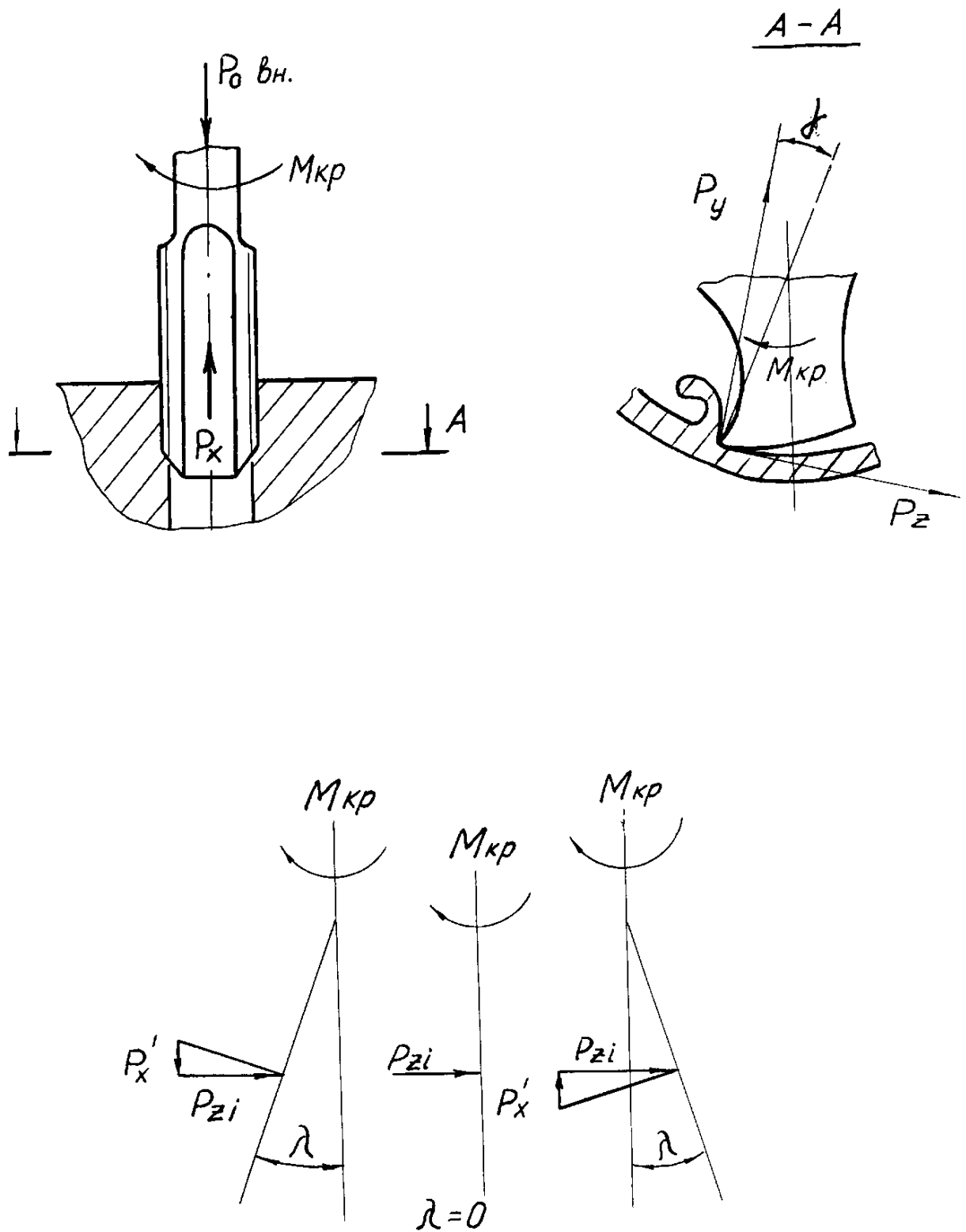


Рисунок 3.7 - Силы, действующие на метчик в процессе нарезания резьбы

При нарезании резьбы тангенциальные P_z и радиальные P_y составляющие сил резания образуют крутящий момент резания и незначительный изгибающий момент относительно опоры метчика. Определяющим в формировании силовой

ситуации при резбонарезании является крутящий момент, который можно рассматривать как интегральный показатель сил, действующих в процессе резания. Поэтому в большинстве случаев ограничивается исследованием крутящего момента и его составляющих.

Крутящий момент при нарезании резьб в сквозных отверстиях может быть предоставлен в виде суммы следующих составляющих [149]:

$$M_{кр.} = M_p + M_{ос} + M_{рад} + M_{изг} + M_{стр} + M_{скр}, \quad (3.7)$$

где M_p - крутящий момент, возникающий от резания;

$M_{ос}$ - крутящий момент трения, возникающий за счет подачи метчика в осевом направлении и действия осевых сил;

$M_{рад}$ - крутящий момент трения, возникающий за счет разности радиальных составляющих от сил резания;

$M_{изг}$ - крутящий момент трения, возникающий за счет сжатия и растяжения шагов метчика от действия изгибающего момента, приложенного к хвостовику метчика;

$M_{стр}$ - крутящий момент трения стружки о метчик и заготовку;

$M_{скр}$ - крутящий момент трения, возникающий за счет скручивания метчика и депланации его поперечных сечений.

При нарезании резьб в глухих отверстиях дополнительно возникает крутящий момент при вывинчивании метчика из отверстия. При этом существенным является резкий рост крутящего момента в начале вывинчивания. Последнее связано со срезанием зубьями метчика корней стружек, образованных последующими зубьями и попаданием срезанной, находящейся в основном на дне отверстия, стружки под зубья режущей части метчика. Следовательно, крутящий момент при вывинчивании можно представить следующим образом:

$$M_{кр.выв.} = M_{к.с.} + M_{с.с.} + M_{тр.}, \quad (3.8)$$

где $M_{к.с.}$ - крутящий момент, возникающий при срезании корней стружек, образованных последующими зубьями метчика;

$M_{с.с.}$ - крутящий момент, возникающий при попадании срезанной стружки

под зубья заборного конуса метчика;

$M_{тр.}$ - крутящий момент трения при вывинчивании метчика.

Проведённый анализ показывает, что при нарезании резьб в глухих отверстиях для крутящего момента характерен ряд специфических особенностей, что предопределило необходимость проведения специальных исследований.

Для исследования сил резания и крутящего момента при нарезании резьбы использовали динамометрический комплекс (рисунок 3.8) включающий:

- универсальный динамометр УДМ-100;
- усилитель для тензометрических измерений «ТА-5»;
- осциллограф Н 117/1.

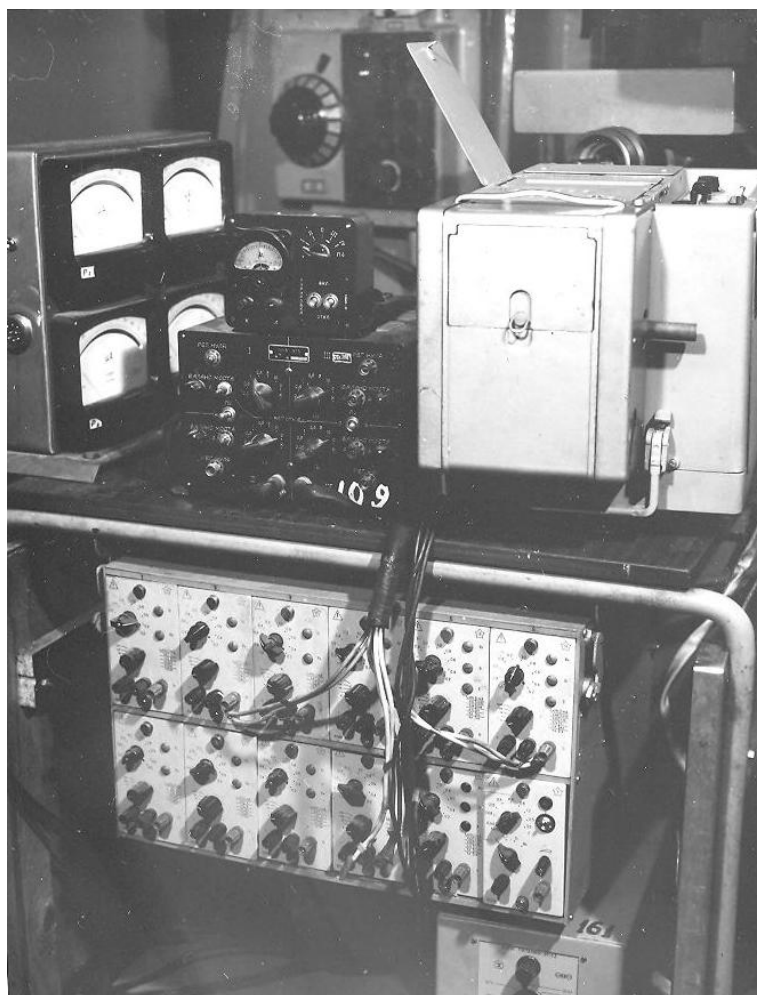


Рисунок 3.8 - Динамометрический комплекс для измерения сил резания и крутящего момента

В качестве образцов использовались прямоугольные заготовки из труднообрабатываемых материалов. Тарирование аппаратуры до и после каждой серии опытов проводили по известной методике, включающей нагружение динамометра эталонными нагрузками. При проведении исследований амплитуда ультразвуковых колебаний инструмента определялась оптическим методом, а резонансная частота с помощью электронного частотомера ЧЗ-33. На рисунке 3.9 показаны измерения крутящего момента при нарезании резьбы на образцах из исследуемых материалов с наложением на метчик ультразвуковых колебаний.

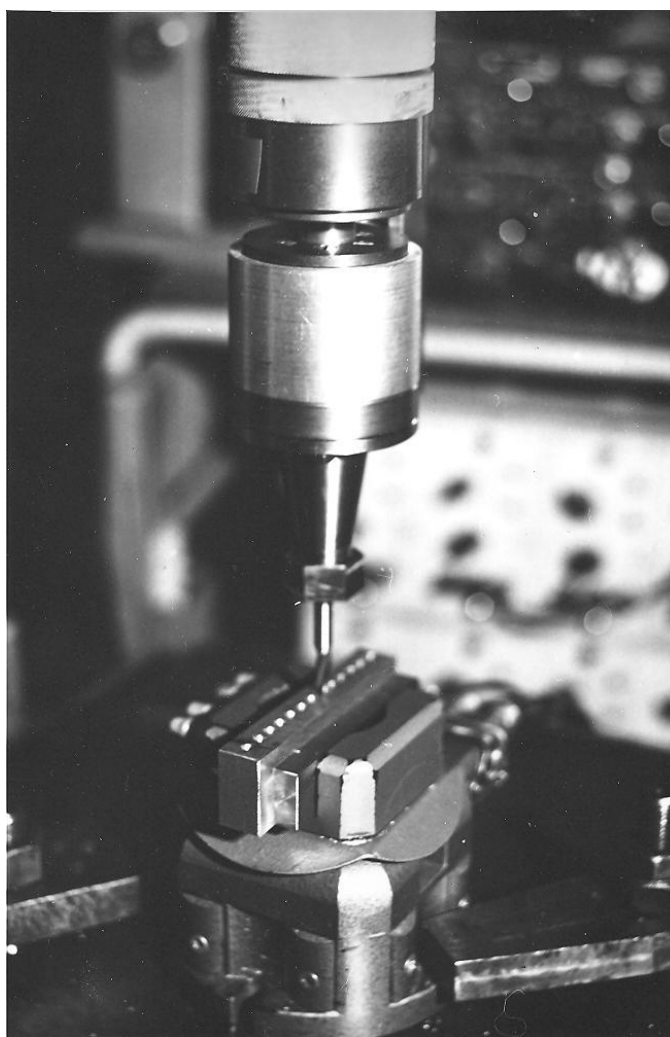


Рисунок 3.9 - Измерение крутящего момента при нарезании резьбы в глухих отверстиях на специальных образцах

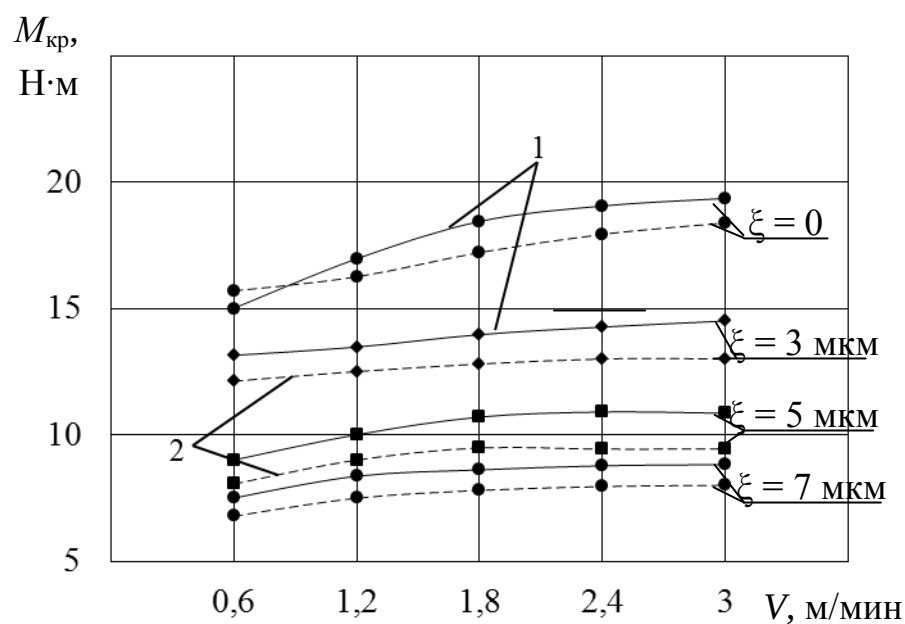
3.2.2 Сравнительные исследования крутящего момента при обычном и ультразвуковом нарезании резьб в глухих отверстиях

Как уже указывалось, при нарезании резьбы метчиком силовым фактором является крутящий момент. По изменению крутящего момента в процессе работы можно также косвенно судить о работоспособности инструмента. Такой подход наиболее эффективен при нарезании резьб малого диаметра, т.к. в этом случае отказы инструмента происходят главным образом из-за его поломок. Поэтому в данной работе в качестве критерия затупления метчика был принят крутящий момент, предельно допустимый прочностью метчика.

Для сравнительной оценки различных конструкций метчиков, в том числе метчиков с износостойкими покрытиями, были проведены исследования крутящего момента при нарезании резьб малого диаметра в труднообрабатываемых материалах с наложением на метчик ультразвуковых осевых колебаний.

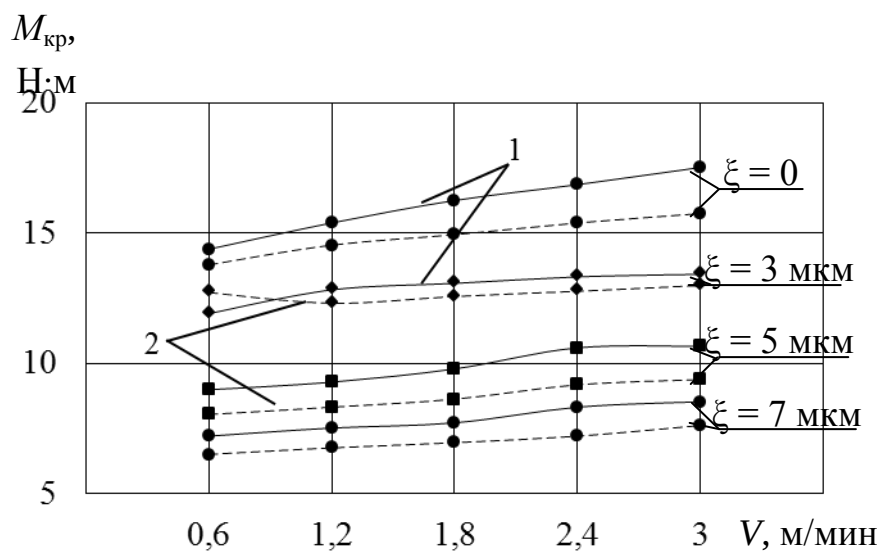
Сравнительные исследования крутящего момента $M_{кр.}$ проводили при обычном и ультразвуковом нарезании резьб в титановых, нержавеющей и жаропрочных сплавах комплектом метчиков и одним метчиком полного профиля, а также метчиками с покрытием из нитрида титана (TiN).

Результаты исследований влияния амплитуды колебаний (ξ) и скорости резания (V) на крутящий момент ($M_{кр.}$) при обработке сплавов BT9 и X12H22T3MP приведены на рисунках 3.10 и 3.11. Из приведённых графиков видно, что наложение ультразвука способствует снижению $M_{кр.}$ во всем диапазоне исследованных скоростей. При этом с увеличением амплитуды эффективность действия ультразвука возрастает, однако, при дальнейших исследованиях было установлено, что при увеличении $\xi > 5$ мкм наблюдается интенсивный износ и выкрашивание режущих кромок зубьев метчика. Таким образом, для метчиков M8 оптимальной амплитудой является $\xi = 5$ мкм.



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

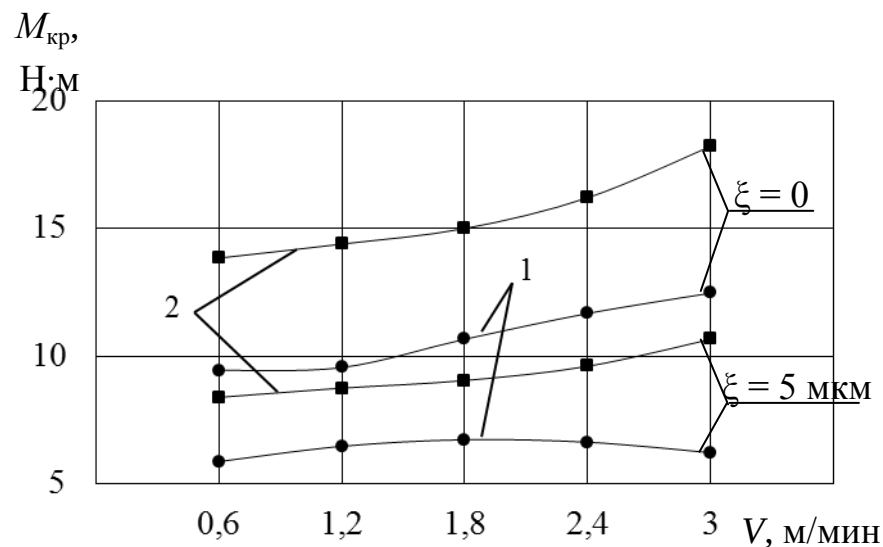
Рисунок 3.10 - Влияние V и ξ на $M_{кр}$ при обработке сплава BT9 метчиком $M8 \times 1,25$ (ТС – сульфифрезол)



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.11 - Влияние V и ξ на $M_{кр}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком $M8 \times 1,25$

Сравнение результатов работы первого и последнего метчиков из комплекта (рисунок 3.12) показывает, что эффект снижения $M_{кр.}$ от наложения ультразвуковых колебаний больше при работе последним метчиком. При сравнении результатов работы метчиков с износостойким покрытием TiN и без него видно, что метчики с покрытием позволяют достичь несколько больший эффект снижения $M_{кр.}$, особенно после обработки значительного количества отверстий.



1 – 1-ый метчик из комплекта; 2 – 3-ий метчик из комплекта

Рисунок 3.12 - Влияние V и ξ на $M_{кр.}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком M8×1,25 (ТС – олеиновая кислота)

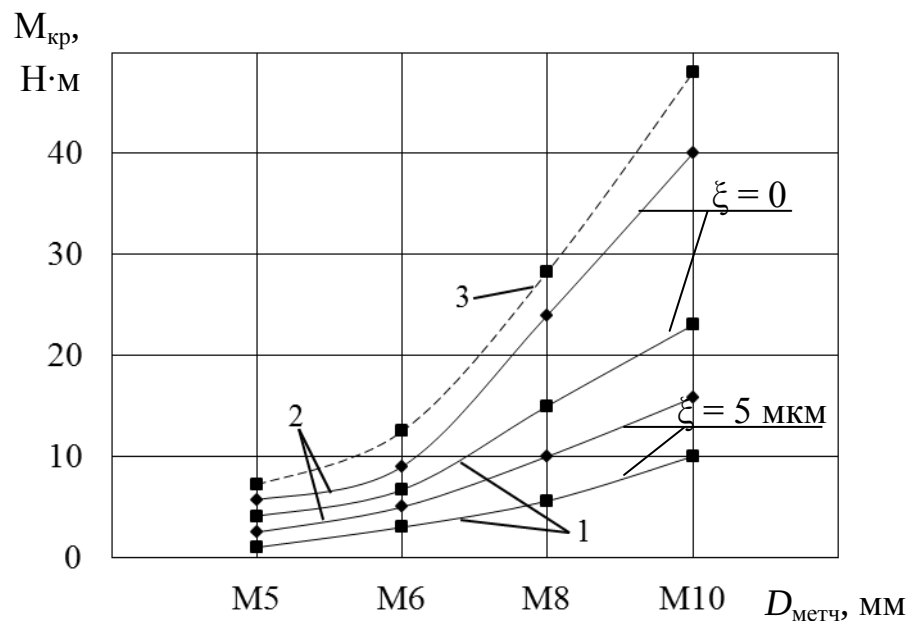
Снижение крутящего момента при наложении на метчик ультразвуковых колебаний объясняется рядом факторов. Это снижение сопротивления пластической деформации, за счет активизации дислокаций и их размножения в ультразвуковом поле, уменьшения коэффициента трения, изменения векторов сил на режущих поверхностях инструмента, активацией технологической среды и др.

В результате нанесения износостойких покрытий изменяются физико-механические характеристики рабочих поверхностей метчика: износостойкость, теплостойкость, микротвердость и др. Последние оказывают влияние на

стойкость инструмента, а также силы резания и крутящий момент.

При обычной обработке увеличение $M_{кр}$ связано, в частности, с наростообразованием и последующим защемлением метчика. При наложении ультразвуковых колебаний указанные явления или исчезают полностью или проявляются в значительно меньшей степени.

Из графиков на рисунке 3.13 видно, что с увеличением диаметра метчика $M_{кр}$ возрастает, причем более интенсивно при обычной обработке.



1 – 1-ый метчик; 2 – 3-ий метчик; 3 – $M_{кр}$ разрушения метчика

Рисунок 3.13 - Влияние типоразмера метчика на $M_{кр}$ при обработке сплава ХН68ВМТЮК (ТС – сульфифрезол)

При ультразвуковой обработке сразу последим метчиком из комплекта видно, что в отличие от обычной обработки значения $M_{кр}$ не достигают предельных значений, при которых происходит разрушение метчика и поэтому становится возможным обработка одним метчиком. Однако, при этом значительно снижается стойкость метчиков, особенно при обработке глухих резьб.

Метчики с покрытием имеют большую стойкость и их можно использовать для обработки сразу полнопрофильным метчиком. Для повышения стойкости и

снижения крутящего момента можно отверстия под резьбу выполнять с более жестким допуском в пределах верхнего поля допуска.

На рисунке 3.14 приведены результаты исследования влияния диаметра отверстия под резьбу на $M_{кр}$ резания. Увеличение диаметра отверстия позволяет снизить крутящий момент на 20÷30%.

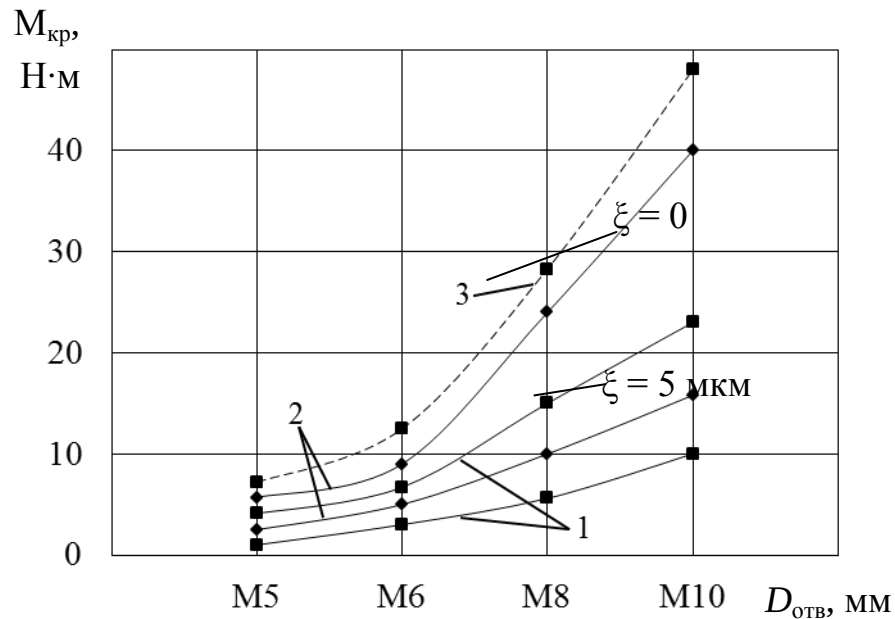
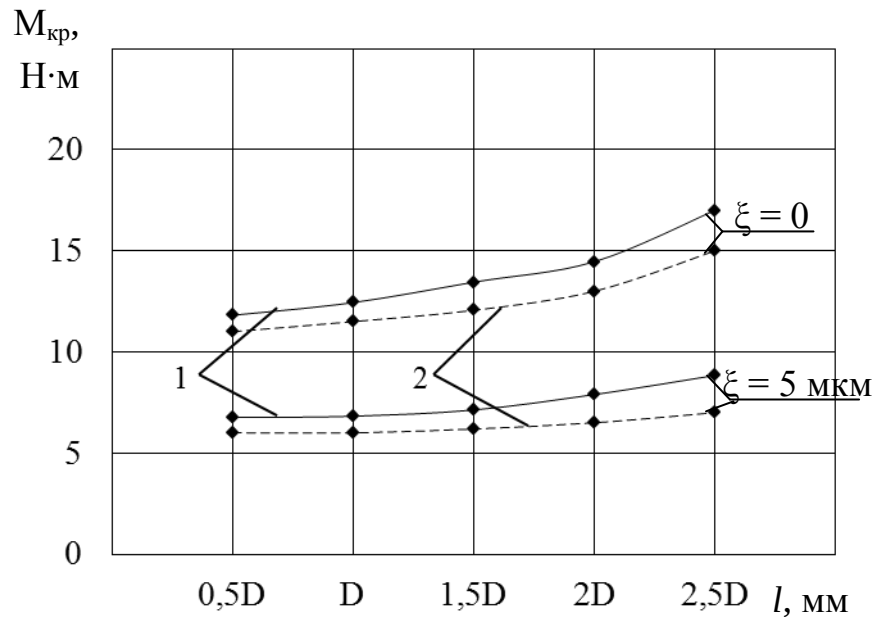


Рисунок 3.14 - Влияние диаметра отверстия на $M_{кр}$ при нарезании резьбы М8×1,25 третьим метчиком в сплаве ВТ9 (ТС – сульфифрезол)

Необходимо также отметить, что значительное влияние на $M_{кр}$ оказывает глубина отверстия, особенно при нарезании глухих резьб метчиком полного профиля. В этом случае необходимо принять меры для удаления стружки или увеличить глубину отверстия под резьбу.

На рисунке 3.15 представлены результаты исследований влияния глубины отверстия при нарезании резьбы в сплаве ХН68ВМТЮК для резьбы М8. Как видно из представленных зависимостей, с увеличением глубины нарезаемой резьбы увеличивается и крутящий момент, причем более интенсивно при обычной обработке.

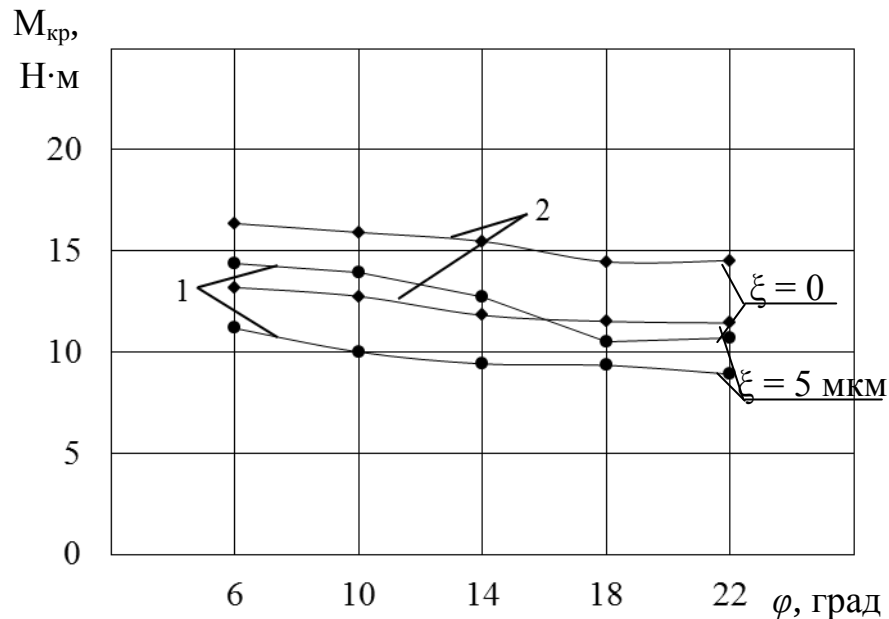


1 – 3-ий метчик без покрытия TiN; 2 – 3-ий метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.15 - Влияние глубины нарезаемой резьбы на $M_{кр}$ при обработке сплава ХН68ВМТЮК полнопрофильным метчиком М8×1,25

Увеличение крутящего момента связано с защемлением калибрующей части метчика, поэтому обычное нарезание резьб на большую глубину, особенно в вязких материалах, связано с большими трудностями. Как видно из приведенных графиков, наложение ультразвуковых колебаний приводит к незначительному увеличению крутящего момента с увеличением глубины нарезаемой резьбы. Рост $M_{кр}$ при обработке метчиками с износостойкими покрытиями происходит менее интенсивно по сравнению с обычными метчиками, причем в большей степени влияние ультразвука проявляется при нарезании резьб на большую глубину ($l > 2,5D$).

На рисунке 3.16 приведены результаты исследования зависимости $M_{кр}$ и угла заборного конуса φ при ультразвуковом и обычном нарезании резьб М10 и М8 в сплаве ХН68ВМТЮК метчиками полного профиля.



1 – полнопрофильный метчик М8; 2 – полнопрофильный метчик М10

Рисунок 3.16 - Влияние угла заборного конуса φ на $M_{кр}$ при обработке сплава ХН68ВМТЮК (ТС-сульфофрезол)

Из графиков видно, что с увеличением угла φ $M_{кр}$ несколько уменьшается. Однако, одновременно уменьшается и длина рабочей части метчика и, следовательно, нагрузка на отдельный зуб возрастает. Как уже указывалось, наложение ультразвуковых колебаний позволяет значительно уменьшить $M_{кр}$, поэтому, становится возможным производить обработку метчиками с меньшей режущей частью, что является особенно важным для обработки глухих резьб.

В процессе исследований было также установлено, что $M_{кр}$ у метчиков с покрытием при обработке увеличивается значительно в меньшей степени, чем у метчиков без покрытия.

Следует отметить то, что при воздействии ультразвуковых колебаний в начальный момент реверсирования метчика значения крутящего момента значительно меньше (в 2 – 4 раза) по сравнению с обработкой без ультразвука (рисунок 3.17). Как отмечалось, это приводит к сколу зубьев метчика, что предопределило необходимость специальных исследований влияния различных факторов на крутящий момент при вывинчивании метчика ($M_{кр. выв.}$).

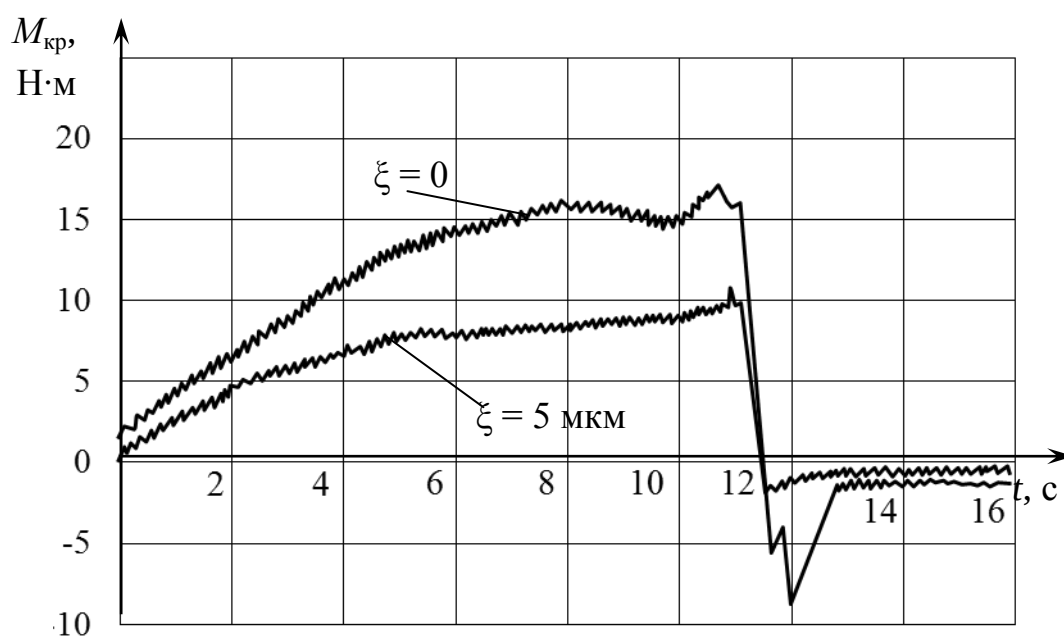


Рисунок 3.17 - Осциллограмма $M_{кр}$ при нарезании резьбы М8 в титановом сплаве ВТ9

На рисунке 3.18 приведены результаты исследования влияния заднего угла α на $M_{кр \text{ выв.}}$. Из приведенных графиков видно, что с уменьшением заднего угла α также уменьшается и $M_{кр \text{ выв.}}$. При ультразвуковом резании с осевыми колебаниями метчика кинематический задний угол меньше, чем при обычной обработке [87, 88], что оказывает положительное влияние на стойкость инструмента.

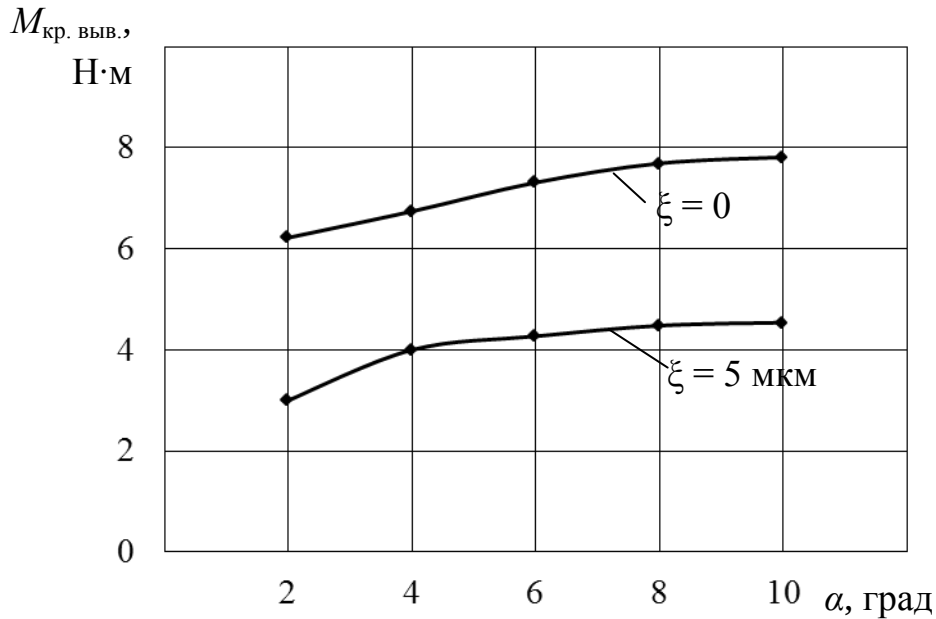


Рисунок 3.18 - Влияние заднего угла α на $M_{кр.выв.}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком М8 (ТС-сульфофрезол)

На рисунке 3.19 приведены результаты влияния угла заборного конуса метчика φ на $M_{кр.выв.}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком М8. На данном рисунке также приведены результаты изменения силы $P_{см}$, действующей на отдельный зуб метчика при вывинчивании. Значения $P_{см}$ определялись по следующей формуле [89]

$$P_{см} = 3,7 \frac{tg\varphi \cdot M_{кр. выв.}}{d_{ср.} \cdot Z}, \quad (3.9)$$

где φ - угол заборного конуса, град;

$M_{кр.выв.}$ - значения крутящего момента при вывинчивании, нм;

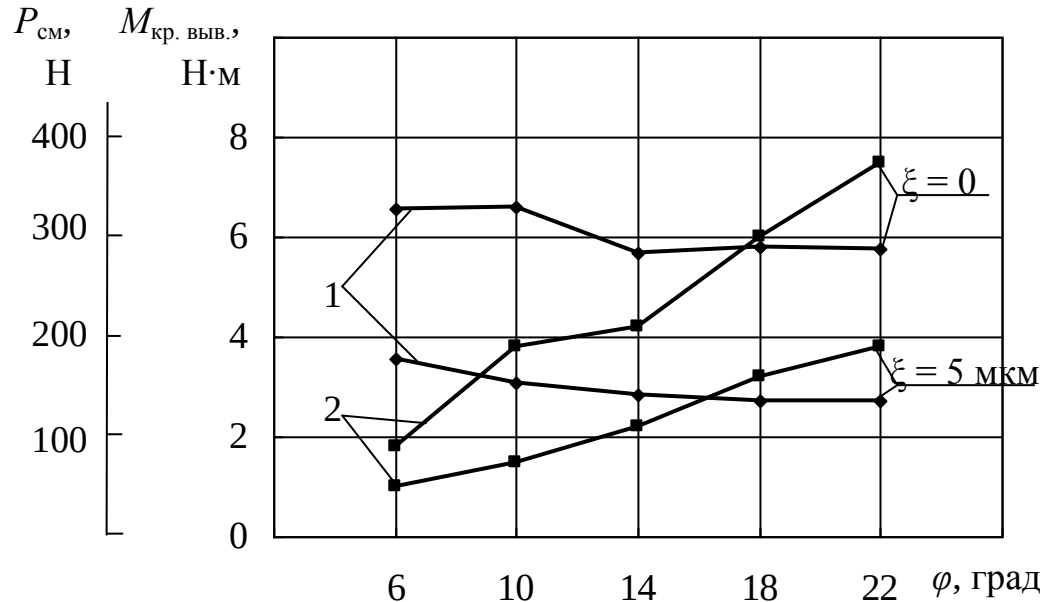
$d_{ср.}$ - средний диаметр метчика, м;

Z - число перьев метчика.

Анализируя приведенные на рисунке 3.19 данные, можно сделать следующие выводы.

При увеличении угла φ несколько уменьшается $M_{кр.выв.}$, однако, одновременно значительно увеличивается сила $P_{см}$ и возрастает вероятность скола

зубьев. Наложение на метчик ультразвуковых колебаний приводит к уменьшению $M_{кр.выб.}$ и, соответственно, $P_{см}$.

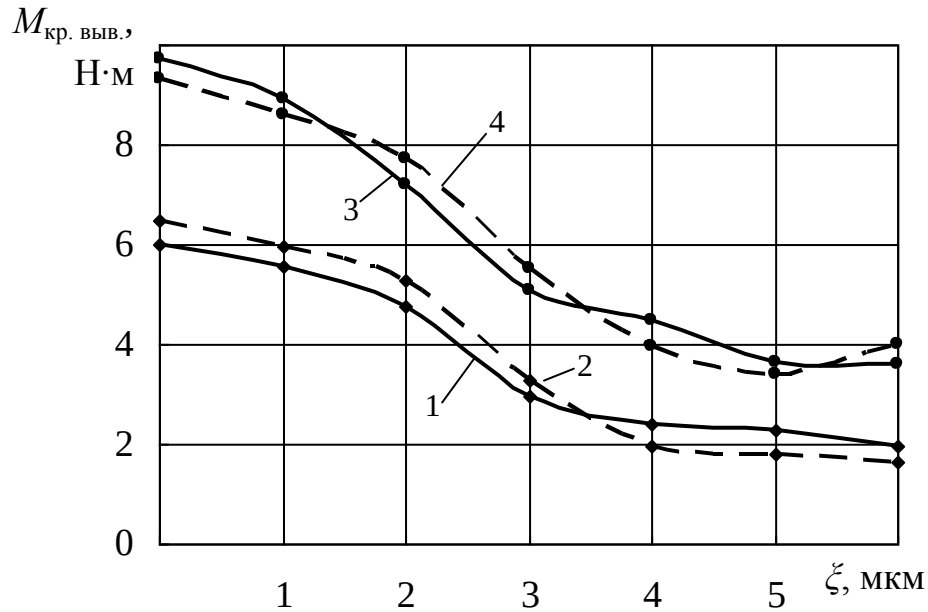


1 – $M_{кр.выб.}$; 2 – $P_{см}$

Рисунок 3.19 - Влияние угла резущей части метчика φ на $M_{кр.выб.}$ и силу $P_{см}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком М8

На рисунке 3.20 приведены результаты исследования влияния амплитуды колебаний ξ на $M_{кр.выб.}$ при обработке сплава ВТ9 комплектом метчиков М8х1,25 и метчиками с покрытием TiN.

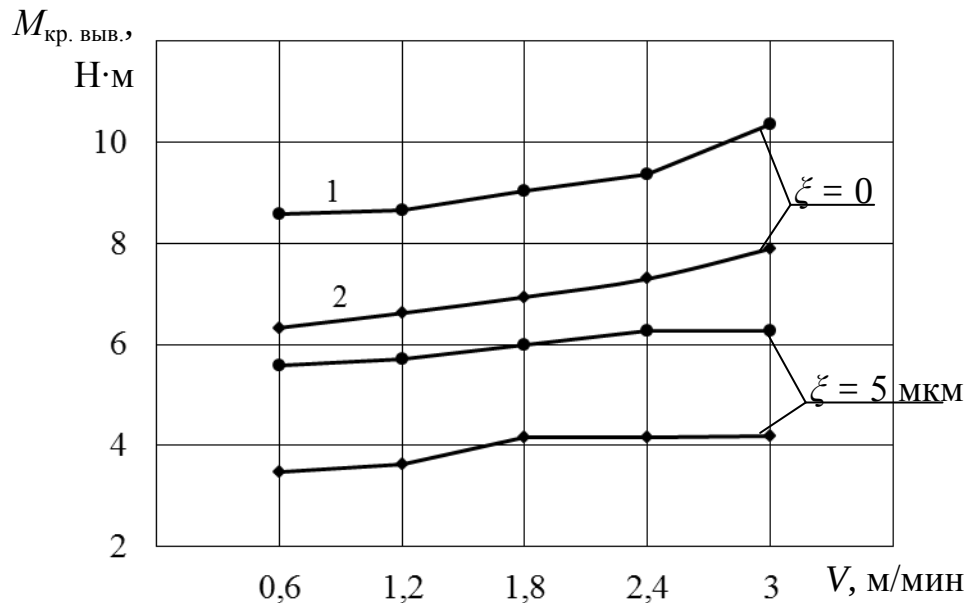
Из приведенных графиков видно, что увеличение амплитуды ультразвуковых колебаний до $\xi = 5$ мкм приводит к снижению $M_{кр.выб.}$. Покрытие метчиков нитридом титана не оказывает существенного влияния на значения $M_{кр.выб.}$.



1 – 1-ый метчик; 2 – 1-ый метчик с покрытием TiN; 3 – 3-ий метчик;
4 – 3-ий метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.20 - Влияние амплитуды колебаний на $M_{кр.выв.}$ при обработке сплава ВТ9 метчиком М8×1,25 (ТС – сульфрезол)

На рисунке 3.21 представлены результаты исследования влияния на $M_{кр.выв.}$ скорости резания V при нарезании резьбы М8 в сплаве Х12Н22ТЗМР обычным метчиком и метчиком с разным окружным шагом перьев. Из приведенных зависимостей видно, что увеличение скорости резания приводит к увеличению $M_{кр.выв.}$. При работе метчиком с разным окружным шагом значение $M_{кр.выв.}$ на 20-40% меньше, чем при работе обычным метчиком. Наложение ультразвуковых колебаний приводит к снижению $M_{кр.выв.}$ в обоих случаях для всех диапазонов скоростей. Таким образом, для нарезания резьб в глухих отверстиях можно рекомендовать метчики при работе которыми, срезание корней стружек происходит поочередно каждым зубом метчика.



1 – обычный метчик; 2 – метчик с разным окружным шагом перьев

Рисунок 3.21 - Влияние скорости резания на $M_{кр. выв.}$ при обработке сплава X12H22T3MP метчиком M8×1,25 (ТС – сульфифрезол)

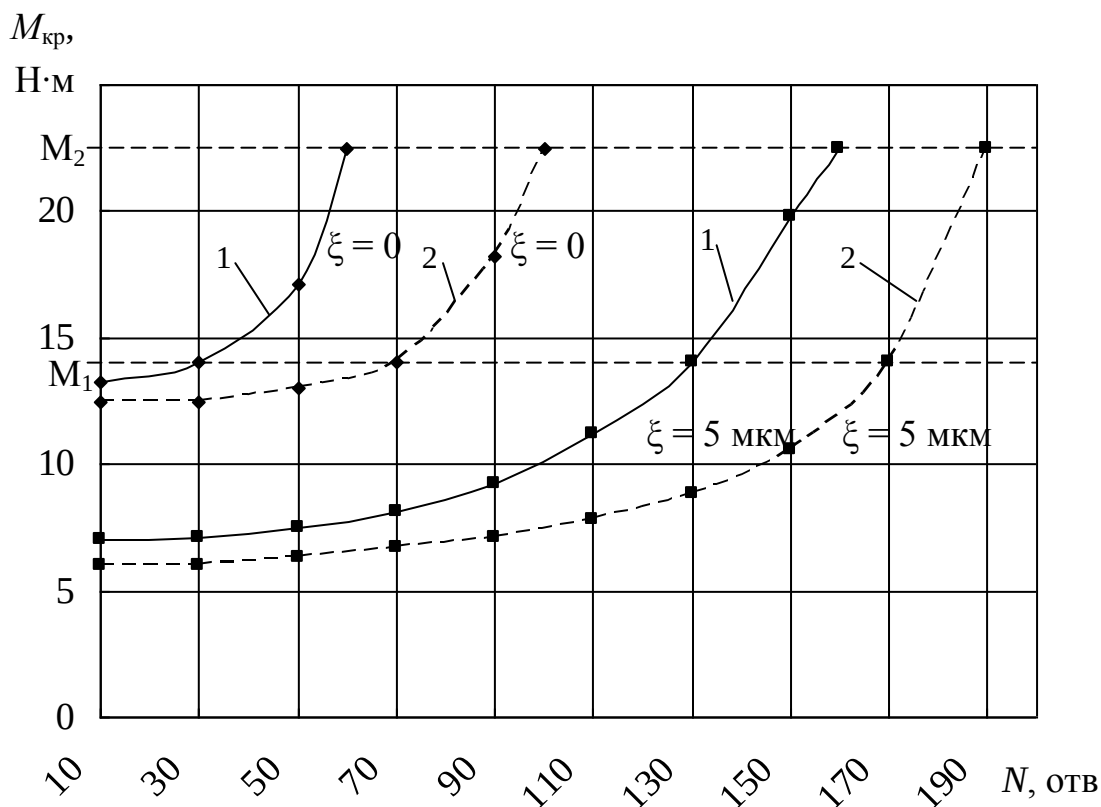
3.3 Исследование влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на работоспособность метчиков при нарезании резьбы в труднообрабатываемых материалах

Исследования работоспособности метчиков проводились как на специальных образцах, так и на реальных деталях. Как правило, отверстия под резьбу подготавливали сверлением с последующим развертыванием или зенкерованием. Особое внимание было уделено компенсации несоосности метчика и отверстия, а также компенсации несовпадения подачи метчика с шагом резьбы. Для этой цели были разработаны и изготовлены специальные ультразвуковые устройства, а также была изготовлена различная оснастка (кондукторы, поворотные столы для изделия, быстрозажимной пневмопатрон для накидных гаек и т.д.).

Для удобства проведения исследований проводили сравнительную оценку работоспособности метчиков при нарезании резьбы как с ультразвуком, так и без ультразвуковых колебаний. Критерием предельного износа был принят

предельный крутящий момент резания, допускаемый прочностью метчика. Наличие в ультразвуковом устройстве предохранительной муфты позволило исключить возможные поломки метчиков.

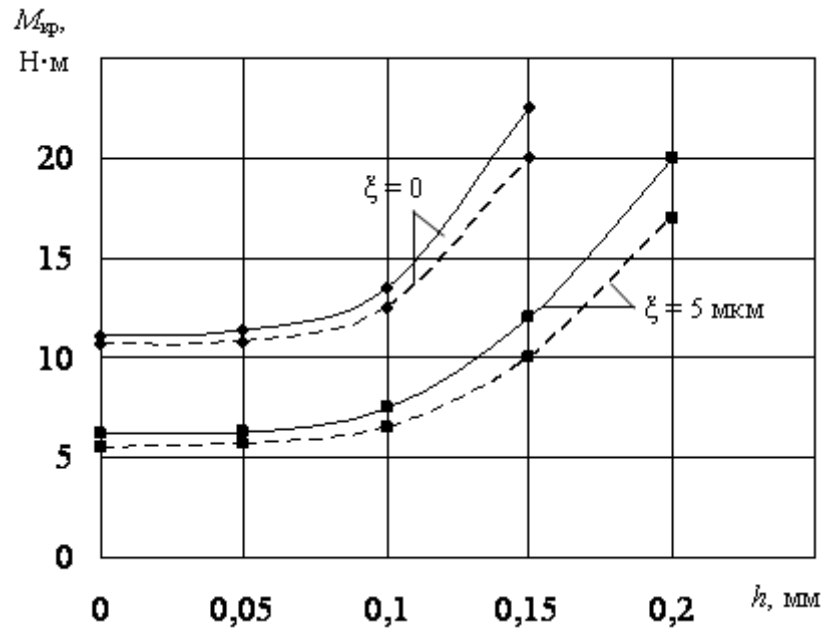
Из представленных на рисунке 3.22 данных следует, что введение в зону резания энергии ультразвука приводит к существенному повышению периода стойкости метчика. Нанесение на метчик износостойкого покрытия из нитрида титана позволило дополнительно повысить период стойкости как при обработке с ультразвуковыми колебаниями, так и без ультразвуковых колебаний. Из приведённых зависимостей также видно, что по мере износа режущих зубьев метчика момент крутящий резания увеличивается постепенно, а после определённых значений происходит его резкий рост до предельных значений, определяемых прочностью метчика. При этом наблюдались выкрашивания и сколы на режущих зубьях метчика. Так как выкрашивания и сколы приводят к резкому уменьшению работоспособности метчика (количество переточек значительно уменьшается), то предельное допускаемое значение крутящего момента резания были приняты с учётом исключения выкрашивания режущих кромок. Опытным путём было установлено, $M_{кр. доп.} = (0,6 - 0,7) M_{кр. разр.}$. Следовательно, предохранительную муфту необходимо настраивать на значения $0,6 M_{кр. разр.}$, обеспечивая тем самым оптимальные условия эксплуатации (с точки зрения поломки) метчиков.



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN; M_1 – крутящий момент, при котором происходит скол зубьев метчика; M_2 – крутящий момент, при котором происходит объемное разрушение метчика

Рисунок 3.22 - Изменение $M_{кр}$ в зависимости от обработанных отверстий N при нарезании резьбы М8 в сплаве ХН68ВМТЮК метчиками с покрытием TiN и без покрытия, ТС-сульфофрезол

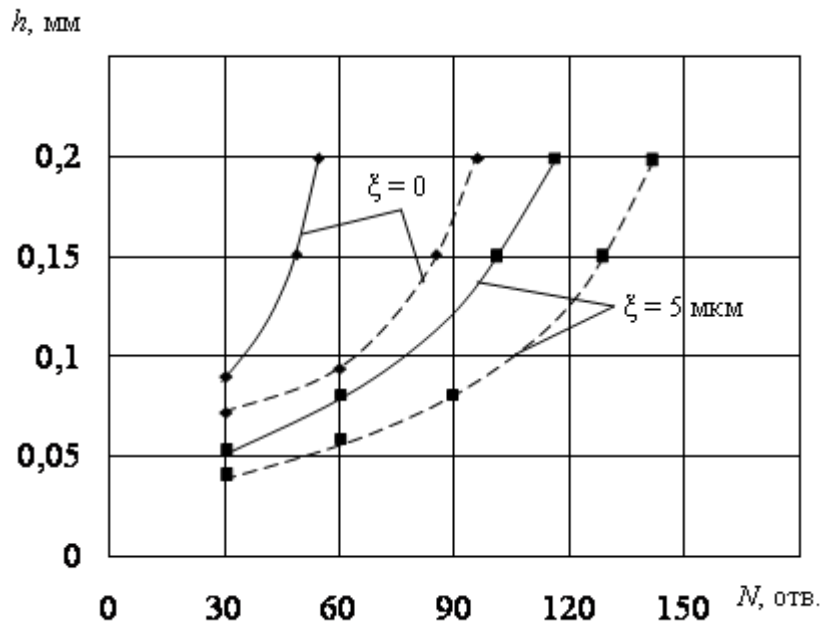
На рисунке 3.23 приведены результаты $M_{кр}$ метчика в зависимости от величины износа h по задней поверхности зуба метчика.



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.23 - Влияние износа метчика на $M_{кр}$ при обработке сплава X12H22T3MP

На рисунке 3.24 приведены результаты влияния на величину износа h по задней поверхности зуба метчика количества обработанных отверстий N (резьба М8х1,25; $V = 1,8$ м/мин, СОЖ - касторовое масло). Анализируя приведенные на рисунках зависимости, можно сделать следующие выводы. При ультразвуковой обработке повышение крутящего момента до предельных значений происходит при значительно большем износе зубьев метчика, при этом при обработке метчиком с покрытием значительного изменения в характере роста крутящего момента не обнаружено.



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.24 - Зависимость износа метчика от количества обработанных отверстий (материал X12H22T3MP)

Однако, если учесть, что допустимый износ h при обработке метчиком с покрытием наступает значительно позднее, чем при обработке обычным метчиком, то наиболее предпочтительной является ультразвуковая обработка метчиками с износостойкими покрытиями.

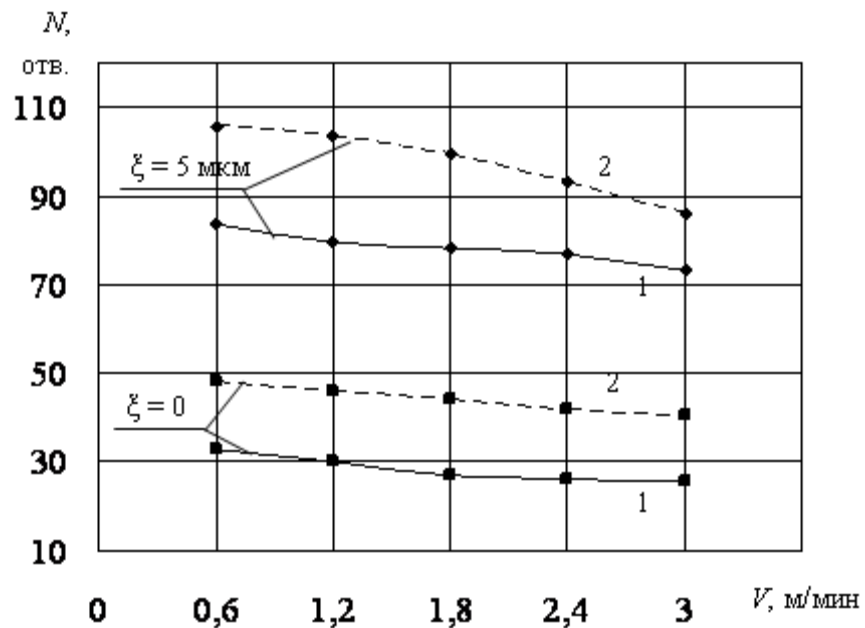
На рисунке 3.25 приведены исследования стойкости метчиков в зависимости от скорости резания V при обработке сплава X12H22T3MP метчиком M8.

Из приведенных графиков видно, что увеличение скорости приводит к снижению работоспособности метчиков.

Наиболее высокой стойкостью обладают метчики с покрытием при сообщении им оптимальных ультразвуковых колебаний. В этом случае количество обработанных отверстий в 3-4 раза больше, чем при обычной обработке метчиком без износостойкого покрытия.

Повышение работоспособности метчиков в данном случае связано с уменьшением сил резания, действующих на рабочих поверхностях инструмента,

отсутствием нароста и защемления метчика, активацией технологической среды и рядом других факторов.



1 – метчик без покрытия TiN; 2 – метчик с покрытием TiN

Рисунок 3.25 - Влияние скорости резания на стойкость метчика М8 при обработке сплава Х12Н22Т3МР, ТС-сульфофрезол

Кроме того, применение покрытий позволяет значительно повысить физико-механические характеристики рабочих поверхностей инструмента особенно твердость и износостойкость, что позволяет дополнительно повысить стойкость метчиков на 20-40%.

На рисунке 3.26 приведены результаты исследования влияния величины амплитуды ультразвуковых колебаний на стойкость метчиков различных типоразмеров. Из представленных данных видно, что значения оптимальной амплитуды колебаний для метчиков М3 и М12 различны. Эта закономерность не является случайной, т.к. с точки зрения снижения крутящего момента амплитуда колебаний должна быть максимальной и ограничивающим фактором в данном случае является прочность зубьев метчика. Так как прочность зубьев у различных

типоразмеров метчиков различна, то и значения оптимальной амплитуды колебаний также неодинаковы и должны выбираться с учетом типоразмера метчика.

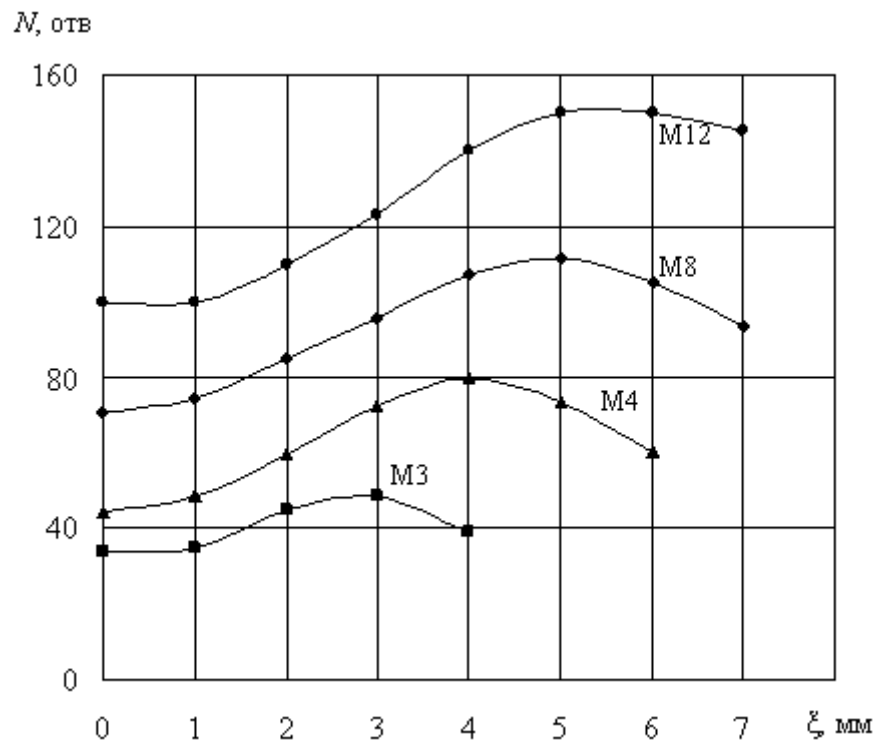
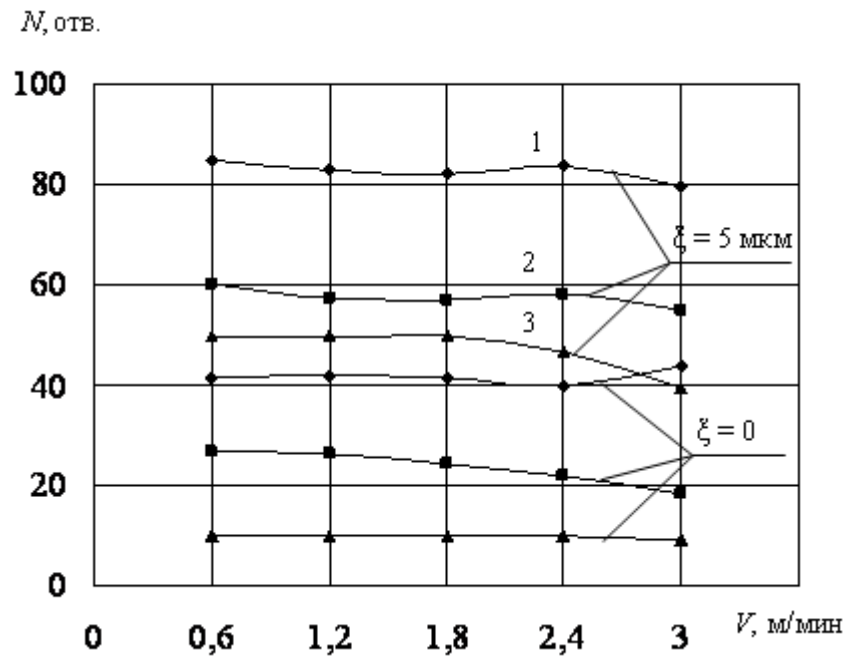


Рисунок 3.26. Влияние амплитуды колебаний на стойкость метчиков (материал X12H22T3MP, $V = 1,2$ м/мин, ТС-сульфофрезол)

Так, например, для метчиков M3-M6 следует принять амплитуду колебаний не 5 мкм, как для метчиков M8-M12, а несколько меньше — 3-4 мкм.

На рисунке 3.27 приведены исследования стойкости метчиков M6 (первого, второго и третьего) при различных режимах обработки. Следует отметить, что обработка производилась сразу первым, или сразу вторым и третьим метчиком. Из приведенных данных видно, что при обработке сразу последним метчиком из комплекта работоспособность инструмента резко снижается. Применять нарезание резьб сразу полнопрофильным метчиком возможно только в случае ультразвуковой обработки, хотя в данном случае стойкость по сравнению с первым метчиком значительно ниже.



1 – 1-ый метчик; 2 – 2-ой метчик; 3 – 3-ий метчик

Рисунок 3.27 - Влияние скорости резания V на стойкость при обработке комплектом метчиков М6 (сплав 26Х2ГСНВМБР, ТС – олеиновая кислота)

3.4 Влияние ультразвуковых колебаний на точность резьбы

Для современного развития технологии машиностроения характерны непрерывные повышения требований к точности, особенно, при изготовлении ответственных деталей. Для этого оптимизируют технологический процесс, режимы резания, а также применяют специальное оборудование. Как было отмечено в первой главе введение в зону резания ультразвуковых колебаний оказывает существенное влияние на физические показатели процесса, от которых зависит также и точность обработки. В частности, при нарезании резьбы наблюдается снижение рассеяния среднего диаметра резьбы и уменьшение погрешности шага и угла профиля резьбы. Например, при нарезании резьб малого диаметра в труднообрабатываемых материалах имеет место значительная деформация метчика от действия скручивающих и изгибающих нагрузок, что

приводит к увеличению погрешности обработки. Введение в зону резания ультразвуковых колебаний позволяет в значительной степени уменьшить возникающие деформации и соответственно, связанные с этим изменения производящего среднего диаметра метчика и траектории его движения. Оценку точности внутренних резьб проводили специальными резьбовыми калибрами.

Сравнительную оценку влияния ультразвуковых колебаний на точность резьбы более удобно провести при нарезании наружных резьб. В данной работе определялись отклонения среднего диаметра резьбы, шага резьбы и угла профиля резьбы.

Наружная резьба М5-М12 нарезалась резьбовым резцом на образцах из титанового сплава ВТЗ-1 с тангенциальными и радиальными ультразвуковыми колебаниями. В связи с тем, что наиболее часто наружные резьбы нарезаются круглыми плашками, то были проведены исследования при нарезании резьб круглыми плашками с наложением осевых колебаний. Также осуществлялось нарезание резьбы без ультразвука.

Измерение точности резьбы осуществлялось дифференцированным методом.

При дифференцированном контроле отдельно измеряется точность каждого элемента резьбового профиля.

При дифференцированном контроле резьбы измерялся её средний диаметр, шаг, а также угол профиля. Эти элементы резьбы измерялись различными методами. Для измерения среднего диаметра наружной резьбы использовался вертикальный длинномер ИЗВ-1 и проволочки по ГОСТ 2475-88.

Шаг резьбы и угол профиля резьбы измеряли на микроскопе БМИ – 1.

Измерение точности резьбы осуществлялось следующим образом.

Сначала производили измерение точности отклонения угла наклона боковой стороны резьбы. В окуляре микроскопа БМИ-1 совмещали линии сетки, имеющие угол 60° , сначала с правой стороной профиля резьбы, а затем с левой стороной резьбового профиля (рисунок 3.28). Измерение угла проводилось через один

виток резьбы.

По определённым отклонениям определялись средние значения для каждой стороны профиля резьбы.

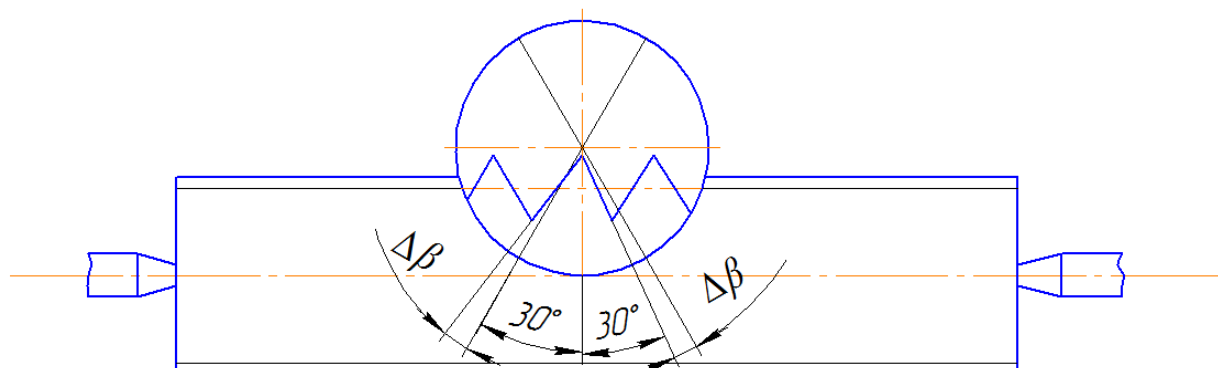


Рисунок 3.28 - Измерение точности отклонения угла наклона боковой стороны резьбы

Таблица 3.1 - Отклонение угла наклона боковой стороны резьбы $\Delta\beta_{\gamma m}$, мин

Резьба	M5	M6	M8	M10	M12
нарезанная без ультразвуковых колебаний	25	28	31	35	40
с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями	9	15	19	23	25
с осевыми ультразвуковыми колебаниями	14	18	23	28	30
с радиальными ультразвуковыми колебаниями	19	22	26	30	36

Анализ приведенных данных показал, что максимальное отклонение получено в случае нарезания без ультразвуковых колебаний, а с ультразвуковыми колебаниями минимальное отклонение наблюдалось при применении тангенциальных колебаний. Максимальное отклонение получено при применении радиальных колебаний.

После измерения отклонения угла наклона боковой стороны резьбы были проведены измерения накопленного отклонения шага резьбы.

Измерения точности изготовления шага резьбы представлены на рисунке 3.29. Отклонения погрешности шага резьбы определяли на длине свинчивания по ГОСТ 16093-81. Отклонения определялись по разности отсчётов на заданном участке резьбового профиля (рисунок 3.30). В таблице 3.2 приведены результаты измерений.

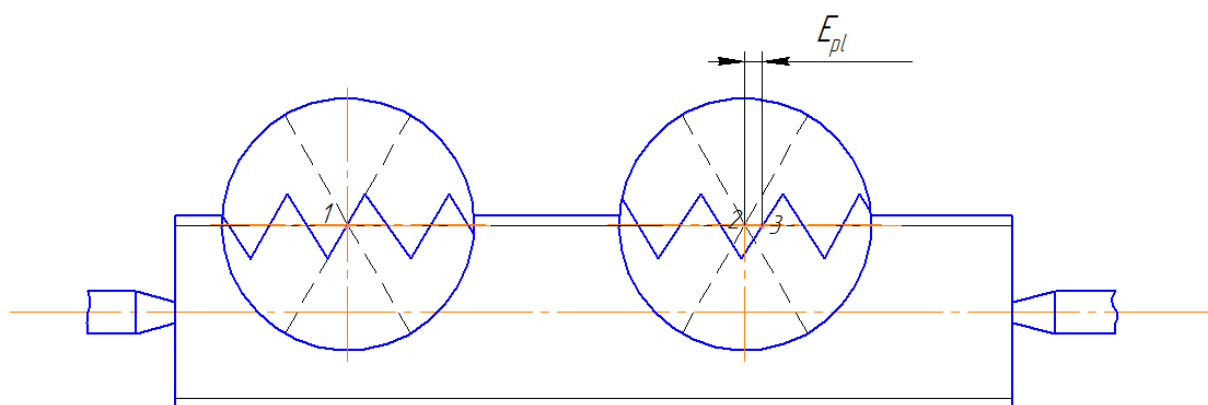


Рисунок 3.29 - Измерение накопленного отклонения шага резьбы

Таблица 3.2 - Максимальные значения накопленного отклонения шага резьбы

 $E_{pl\max}$, мм

Резьба	M5	M6	M8	M10	M12
нарезанная без ультразвуковых колебаний	0,027	0,030	0,036	0,040	0,045
с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями	0,008	0,010	0,012	0,015	0,019
с осевыми ультразвуковыми колебаниями	0,013	0,015	0,018	0,021	0,025
с радиальными ультразвуковыми колебаниями	0,017	0,021	0,026	0,029	0,034

Анализ приведенных данных показал, что минимальное отклонение накопленного шага резьбы получено при обработке с тангенциальными колебаниями, а максимальное при обработке без ультразвука.

Измерение среднего диаметра резьбы проводилось методом трёх проволок. При этом значения действительной величины среднего диаметра определяли по результатам измерения размера M (рисунок 3.30), связанного с искомой величиной d_{2r} зависимостью:

$$d_{2r} = M_m - 3d_n + 0.866P, \quad (3.10)$$

где M_m - среднее арифметическое значение размера M , мм;

d_n - наивыгоднейший диаметр проволок (ГОСТ 2475-88), мм.

Средней диаметр определялся в трех точках на длине свинчивания. Результаты измерения приведены в таблице 3.3. Приведенный средний диаметр резьбы рассчитывался по формуле:

$$d_{2np} = d_{2r} - f_p + f_\alpha, \quad (3.11)$$

где f_p - диаметральная компенсация отклонения шага резьбы, мм;

f_α - диаметральная компенсация отклонения угла наклона боковой стороны резьбы, мм.

Диаметральные компенсации определялись по формулам:

$$f_p = 1,732 E_{pl\max}; \quad (3.12)$$

$$f_\alpha = 0,36 P \cdot \Delta\beta_{\gamma m}, \quad (3.13)$$

где $E_{pl\max}$ - максимальные накопленного отклонения шага резьбы (табл. 3.2), мкм;

$\Delta\beta_{\gamma m}$ - средние арифметическое значение отклонений угла наклона боковой стороны резьбы (см. табл. 3.1) $\Delta\beta_{\gamma m}$, мин.

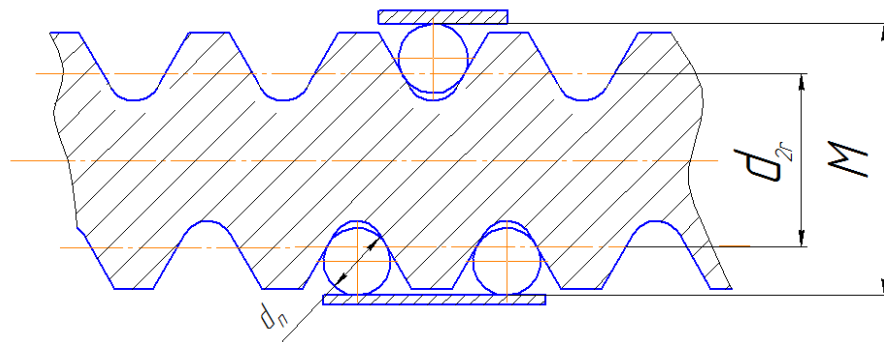


Рисунок 3.30 - Измерение среднего диаметра резьбы методом трех проволок

Таблица 3.3 - Значения действительной величины среднего диаметра d_{2r} , мм

Резьба	M5	M6	M8	M10	M12
нарезанная без ультразвуковых колебаний	4,266	5,326	7,396	8,902	11,487
с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями	3,385	4,479	6,551	8,820	10,665
с осевыми ультразвуковыми колебаниями	3,413	4,482	6,524	8,842	10,680
с радиальными ультразвуковыми колебаниями	3,563	4,627	6,577	8,874	10,721

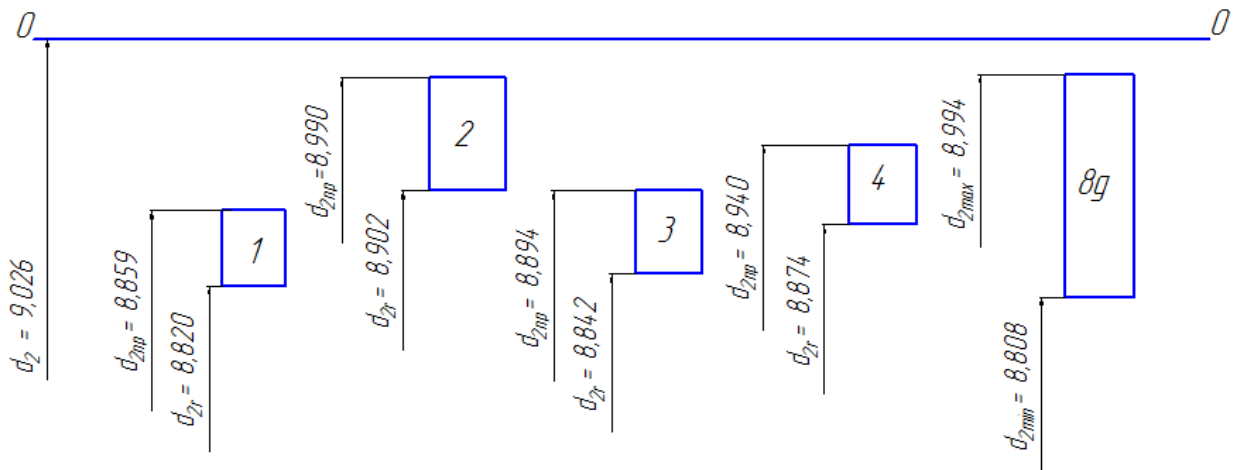
Данные резьбовые детали соответствуют восьмой степени точности, удовлетворяют условиям свинчиваемости и точности:

$$d_{2np} \leq d_{r \max}; \quad (3.14)$$

$$d_{2r} \geq d_{r \min}, \quad (3.15)$$

где $d_{r \max}$ и $d_{r \min}$ - наибольший и наименьший допускаемые предельные размеры среднего диаметра резьбы болта (ГОСТ 16093-81).

По полученным значениям d_{2r} , d_{2np} построили схему полей допусков, например, для резьбы M10 (рисунок 3.31).



1 - резание с ультразвуковыми тангенциальными колебаниями;
 2 - резание без ультразвуковых колебаний; 3 - резание с осевыми
 ультразвуковыми колебаниями; 4 - резание с радиальными ультразвуковыми
 колебаниями

Рисунок 3.31 - Схема полей допусков для резьбы М10,
 степень точности – 8g

В результате проведенных исследований установлено, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний различного направления позволяет повысить точность нарезаемых резьб. Наибольший эффект проявляется при обработке с тангенциальными колебаниями, а наименьший при обработке с радиальными колебаниями.

3.5 Влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость обработанной поверхности

Одним из основных показателей качества обработанной поверхности является её шероховатость. Поскольку соединение резьбовых деталей производится по боковым сторонам профиля, то определяющее значение имеет шероховатость по этим поверхностям. Сложность изучения микропрофиля поверхности по боковым сторонам профиля резьбы обусловлена сложным

пространственным расположением этих поверхностей, а так же малой протяженностью их в радиальном направлении по отношению к оси детали, что не позволяет использовать «щуповые» средства измерения. В связи с чем измерение микропрофиля проводилось оптическим методом на двойном микроскопе Линника. Для установки исследуемого сечения в горизонтальной плоскости использовалась специальная оснастка, позволяющая скомпенсировать угол профиля и угол наклона винтовой спирали резьбы. Схема измерения представлена на рисунке 3.32.

Для исключения «затемнения» исследуемого профиля соседний виток резьбы срезался. Средняя высота микронеровностей оценивалась по параметру шероховатости R_z , как среднее арифметическое из измерений в 3-х равноотстоящих сечениях на длине винтового профиля резьбового образца.

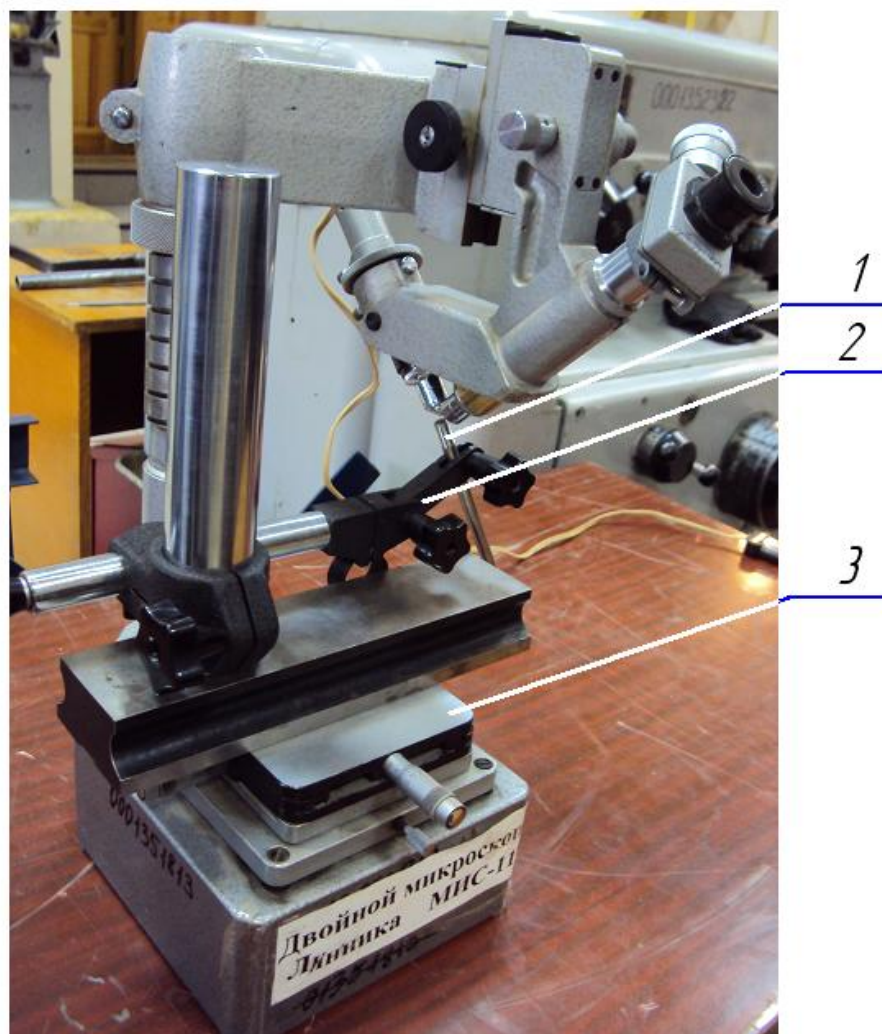
Исследование проводилось на образцах из титанового сплава ВТ3-1 с резьбой М8 нарезанной резьбовым резцом с твердосплавной пластиной ВК8 на токарном станке 1К62. Резьба нарезалась за три прохода с глубиной резания $t_1 = 0,27$ мм; $t_2 = 0,2$ мм; $t_3 = 0,2$ мм; скорость резания $V = 1,2$ м/мин. При этом осуществлялось наложение на резец тангенциальных, осевых и радиальных ультразвуковых колебаний.

Поскольку длина участка измерения была меньше стандартных величин (0,8; 2,5 мм) по ГОСТ 2789-73, то оценка шероховатости проводилась в пределах всей длины светового сечения поверхности бокового профиля по формуле:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{p_i} - \sum_{i=1}^5 y_{v_i} \right), \quad (3.16)$$

где y_{p_i} - высота i -го наибольшего выступа;

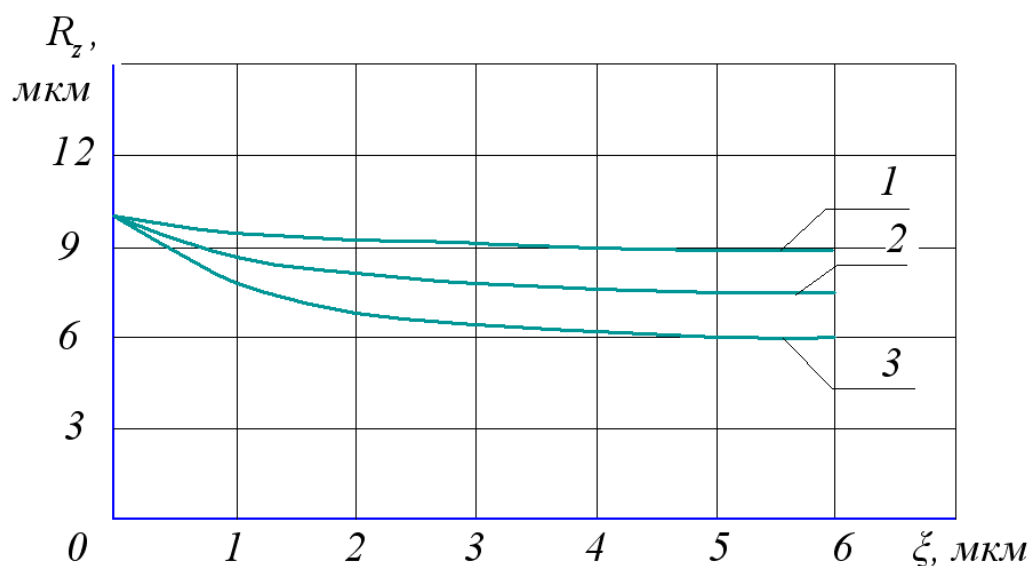
y_{v_i} - глубина i -ой наибольшей впадины.



1 – резьбовой образец; 2 – приспособление для установки образца под необходимым углом; 3 – измерительный стол микроскопа

Рисунок 3.32 - Измерение шероховатости поверхности на двойном микроскопе МИС-11

Зависимости влияния амплитуды и направления вынужденных ультразвуковых колебаний на высоту микронеровностей представлены на рисунке 3.33.



1 - резание с радиальными ультразвуковыми колебаниями; 2 – резание с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 3 – резание с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.33 - Изменение параметра шероховатости R_z в зависимости от величины амплитуды колебаний ξ (обрабатываемый материал ВТЗ-1)

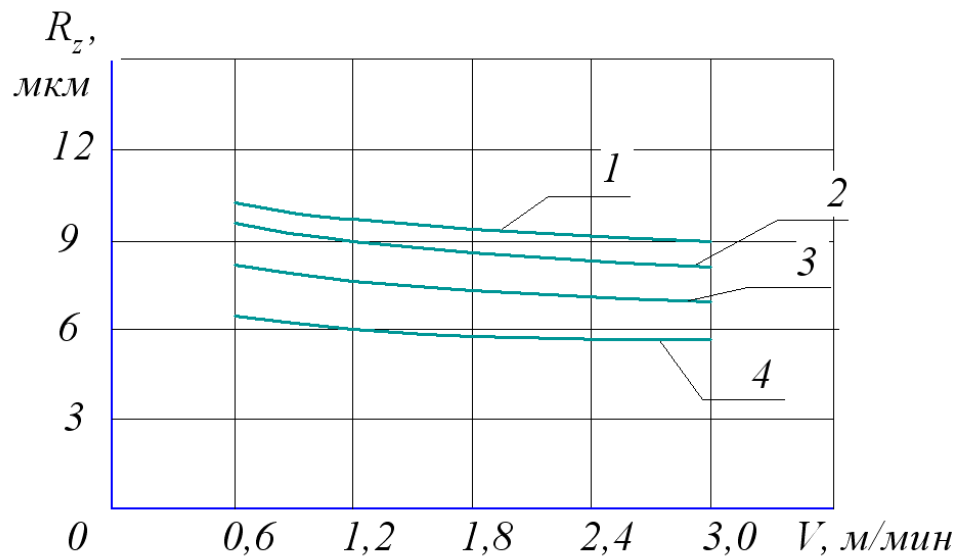
Рассмотрение представленных на рисунке 3.33 зависимостей показывает, что наилучшие результаты достигнуты при наложении на инструмент тангенциальных колебаний. В этом случае наблюдается уменьшение высоты микронеровностей почти в 1,5 раза, по сравнению с обработкой при наложении радиальных колебаний.

При обработке с тангенциальными колебаниями установившаяся высота микронеровностей равных 6 мкм формируется при амплитуде колебаний порядка 5 мкм, а при радиальных колебаниях 9 мкм – при амплитуде колебаний порядка 4 мкм. Очевидно, что для всех трех вариантов наложения ультразвуковых колебаний заметно снижение шероховатости обработанной поверхности, по сравнению с обработкой без наложения ультразвуковых колебаний $\xi = 0$ (см. рисунок 3.33).

Известно, что на высоту неровностей обработанной поверхности влияют режимные параметры и износ инструмента. Поскольку подача обусловлена шагом

нарезаемой резьбы, а формирование её профиля производится на калибрующих проходах, т.е. практически при постоянной глубине резания, то наиболее интересным для изучения является влияние скорости резания и износа по задней поверхности резца на высоту микропрофиля поверхности.

Экспериментальные результаты указанных зависимостей представлены на рисунках 3.34 и 3.35.



1 – резание без ультразвуковых колебаний; 2 – резание с радиальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – резание с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – резание с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями

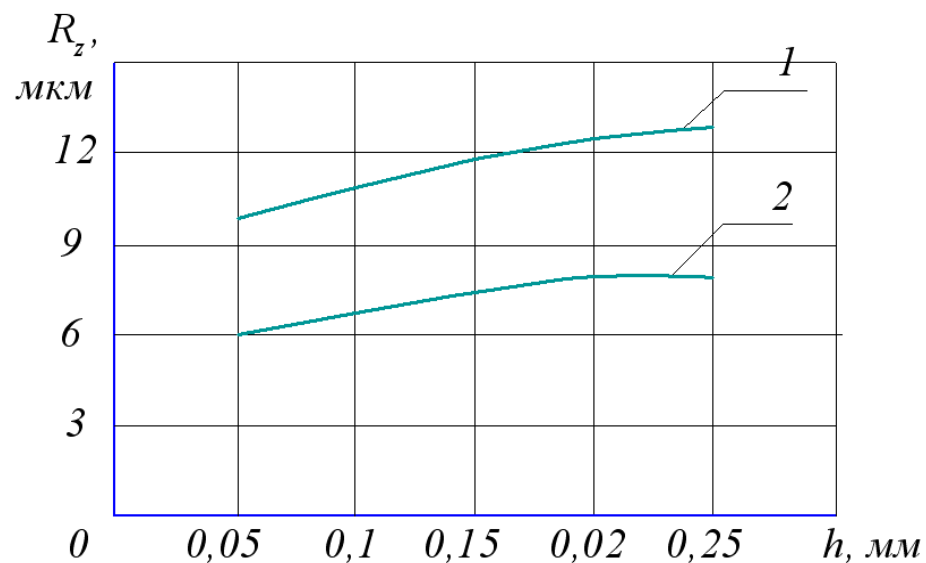
Рисунок 3.34 - Изменение параметра шероховатости R_z в зависимости от скорости резания V (обрабатываемый материал ВТЗ-1)

с амплитудой $\xi = 5 \text{ мкм}$

Из анализа представленных данных видно, что при нарезании резьбы с наложением ультразвуковых колебаний шероховатость поверхности меньше, чем при обработке без колебаний. Изменение же скорости резания с 0,6 до 3 м/мин приводит к снижению высоты микронеровностей приблизительно на 10 – 15 %. Отсутствие изменений шероховатости поверхности для первого случая обусловлено, очевидно малым влиянием изменения скорости резания в суммарной скорости относительного перемещения обрабатываемой поверхности

и режущей кромки инструмента. Лучшие результаты получены также при наложении на инструмент осевых и тангенциальных ультразвуковых колебаний.

Изучение зависимостей шероховатости обработанной поверхности от износа по задним граням (рисунок 3.35) приводит к традиционному выводу о том, что шероховатость увеличивается с увеличением износа резца, но при этом высота неровностей при ультразвуковом резании на всем диапазоне износа резца остается меньше приблизительно на 4-5 мкм.



1 – резание без ультразвуковых колебаний; 2 - резание с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.35 - Изменение параметра шероховатости R_z в зависимости от износа по задней поверхности h , амплитуда $\xi = 5$ мкм, скорость $V = 1,2$ м/мин

Таким образом, можно сделать следующее заключение:

- наложение ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы уменьшает шероховатость боковой поверхности профиля приблизительно на 30% по сравнению с резанием без ультразвуковых колебаний;
- наилучшие результаты достигнуты при наложении тангенциальных ультразвуковых колебаний.

3.6 Влияние ультразвуковых колебаний на деформационное упрочнение поверхностного слоя резьбового профиля

Исследование влияния ультразвука на деформационное упрочнение проводили на резьбовых образцах из титанового сплава ВТ 16, изготовленных с различными технологическими параметрами.

На калиброванных прутках из титанового сплава ВТ16 нарезалась резьба М6. Нарезание наружной резьбы с тангенциальными или радиальными ультразвуковыми колебаниями осуществлялось на токарном станке резьбовым резцом с твёрдосплавной пластиной ВК8 при помощи ультразвукового устройства, приведённого в 5 главе (режимы обработки: $V = 0,8$ м/мин; $S = 1$ мм/об.; $t = 0,2$ мм при окончательном проходе; резонансная частота $f_r = 19860$ Гц; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм). Нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями осуществляли круглыми плашками из быстрорежущей стали Р6М5 при помощи специального ультразвукового устройства, также приведённого в 5 главе (режимы обработки: $V = 0,8$ м/мин; резонансная частота $f_r = 19860$ Гц; амплитуда ультразвуковых колебаний $\xi = 5$ мкм; подача совпадала с шагом нарезаемой резьбы, так как конструкция устройства позволяет осуществлять обработку по методу «самозатягивания», что исключает возможную погрешность шага резьбы инструмента и принудительной подачи станка). Для сравнительной оценки также осуществлялось нарезание резьбы без введения в зону резания ультразвуковых колебаний, при этом остальные режимы резания оставались без изменения.

Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды при нагрузке 0,981Н и выдержке 5 с. Образцы разрезались на электроэрозионном станке с дальнейшей их полировкой для исключения появления дополнительного упрочнения в процессе подготовки. Микротвердость измеряли в точках, показанных на рисунке 3.36, в средней части резьбы шпильки в четырех направлениях:

А-А – во впадине резьбы;

Б-Б – от вершины резьбы;

В-В – перпендикулярно к середине боковой поверхности;

Г-Г – параллельно боковой стороне профиля резьбы.

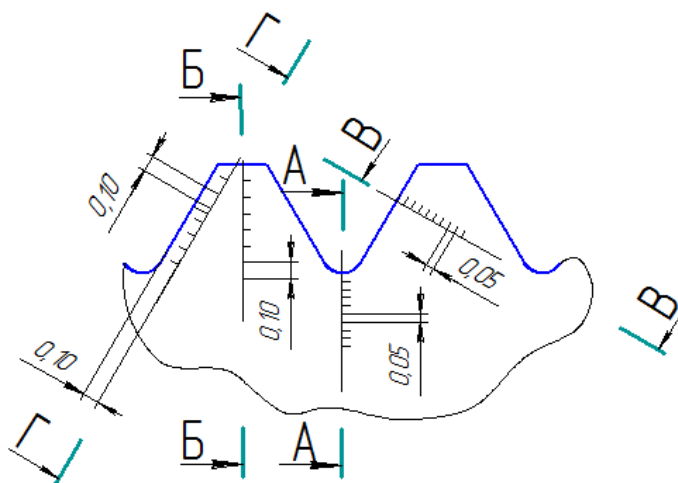
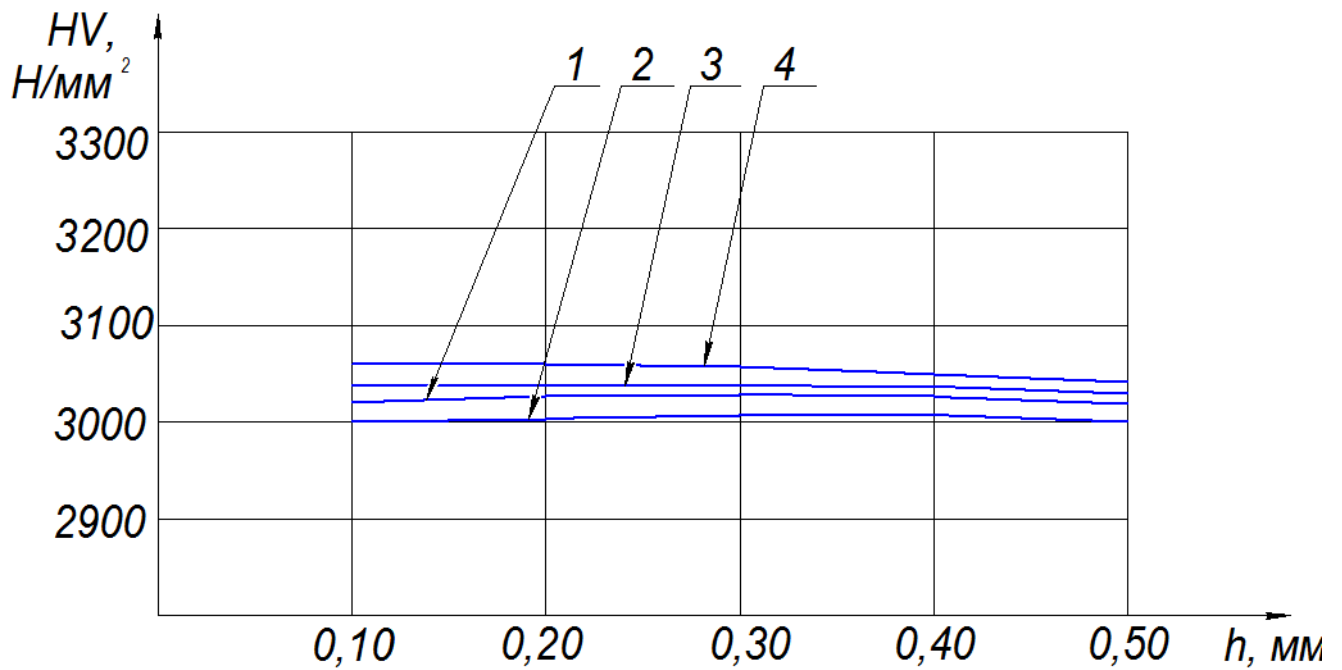


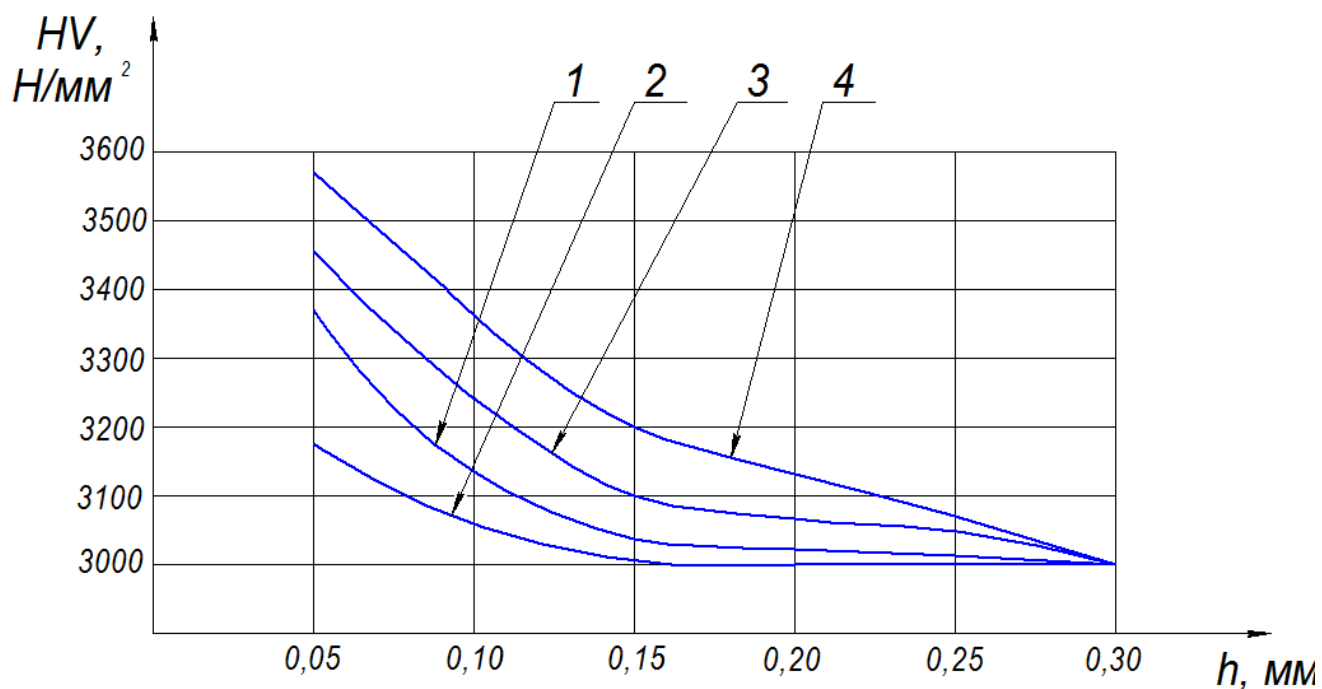
Рисунок 3.36 - Схема измерения микротвердости на профиле резьбы

На рисунках 3.37 - 3.43 приведены результаты измерения микротвердости титановых шпилек М6×1 в зависимости от различных режимов ультразвуковой обработки.



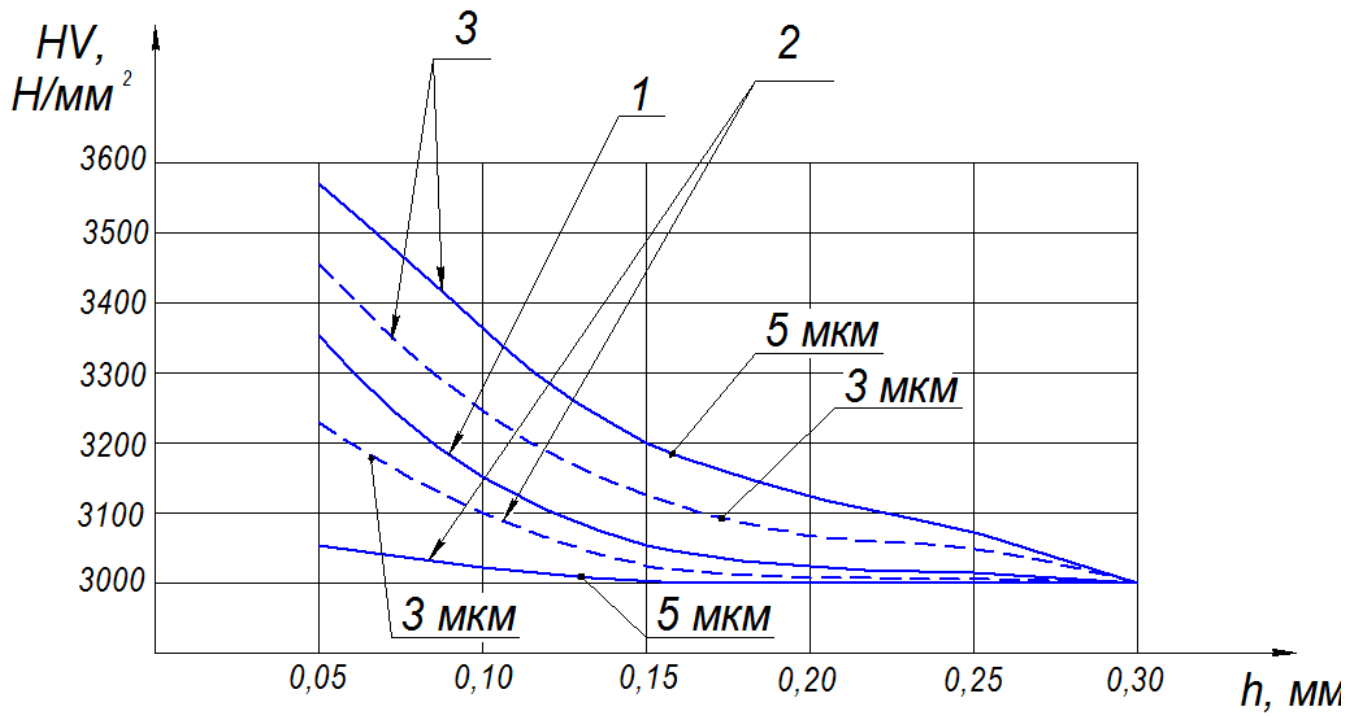
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.37 – Влияние направления ультразвуковых колебаний на микротвердость вершины профиля резьбы (по Б-Б)



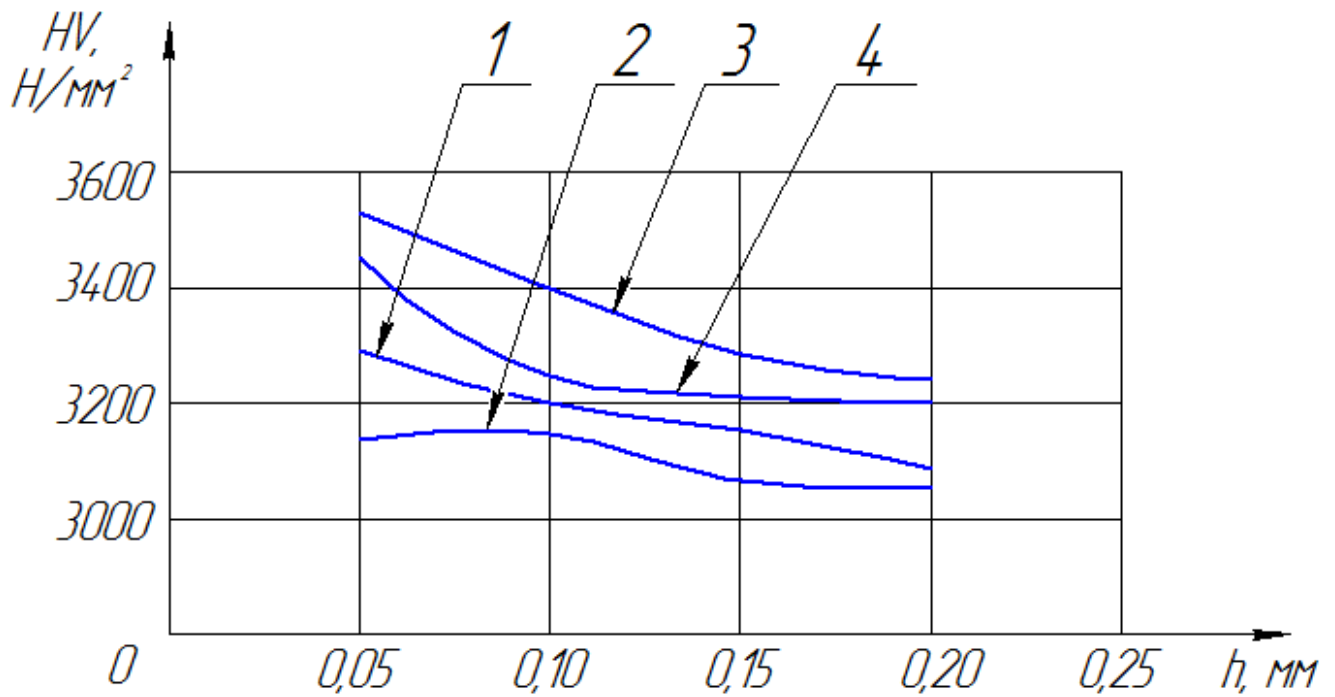
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.38 - Влияние направления ультразвуковых колебаний на микротвердость во впадине резьбы (по А-А)



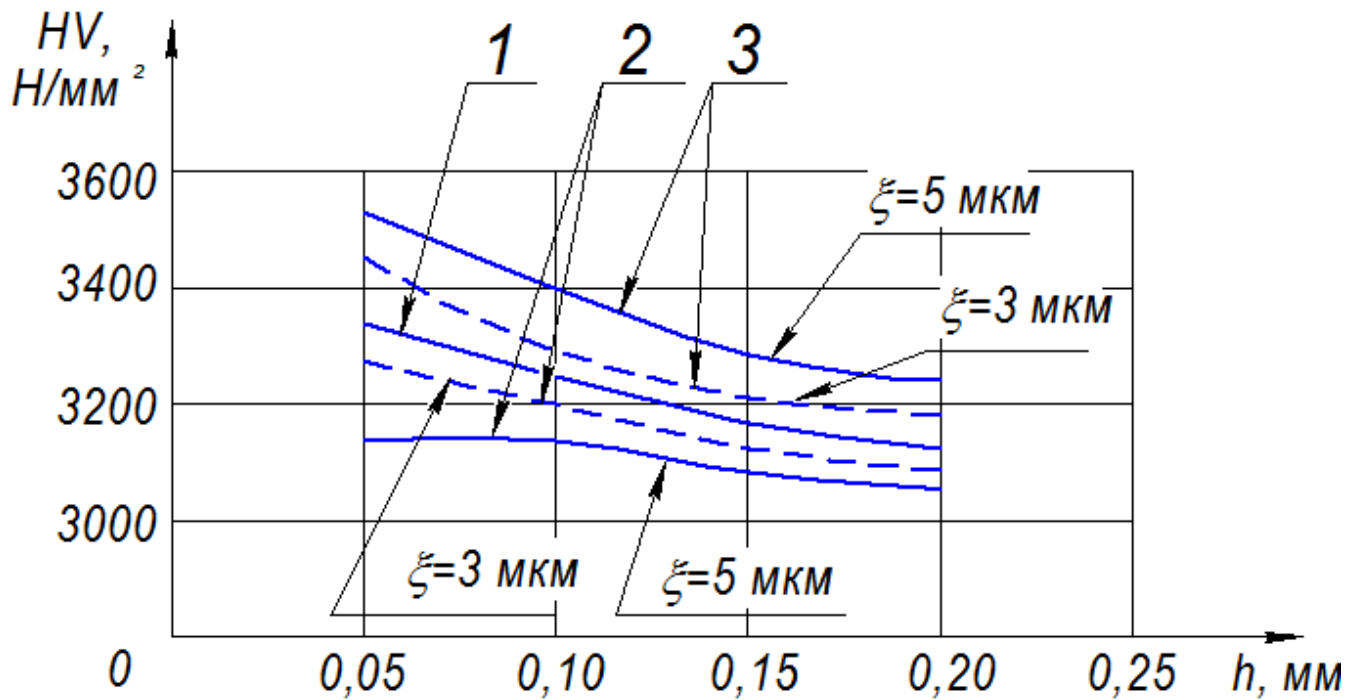
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.39 - Влияние амплитуды колебаний ξ на микротвердость во впадине резьбы (по А-А)



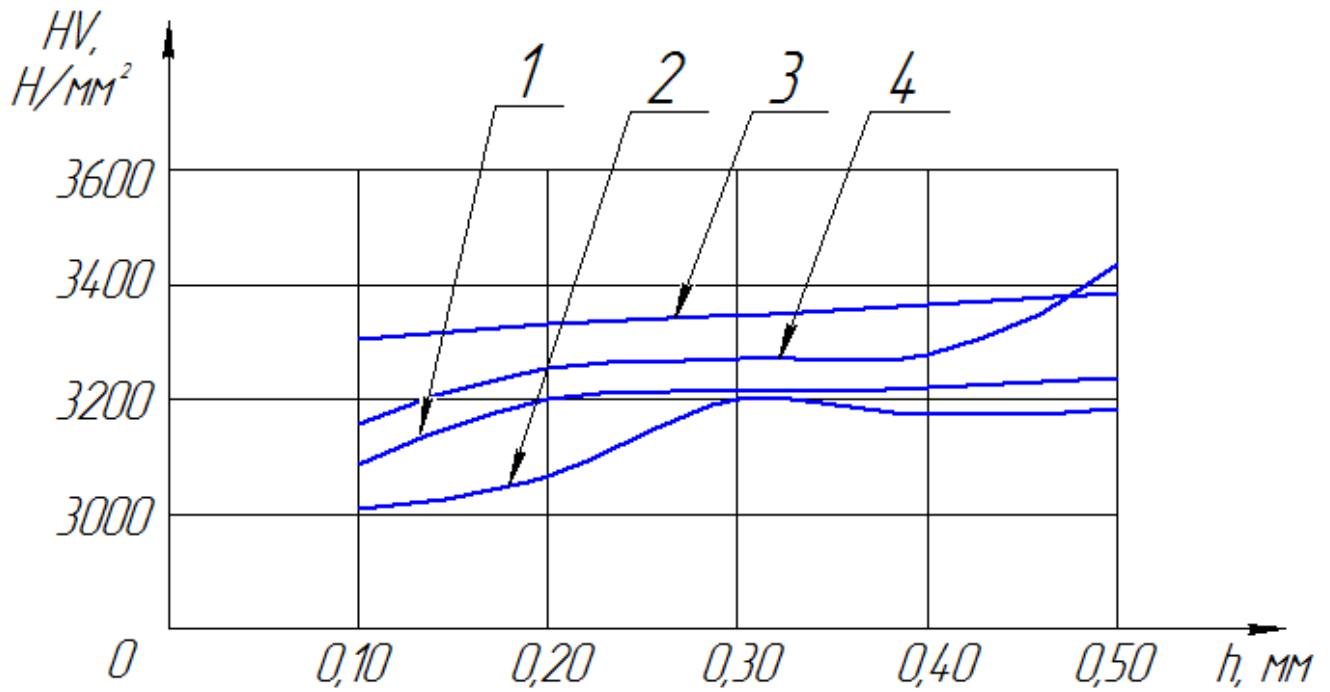
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.40 - Влияние направления ультразвуковых колебаний на микротвердость боковой поверхности резьбы (по В-В)



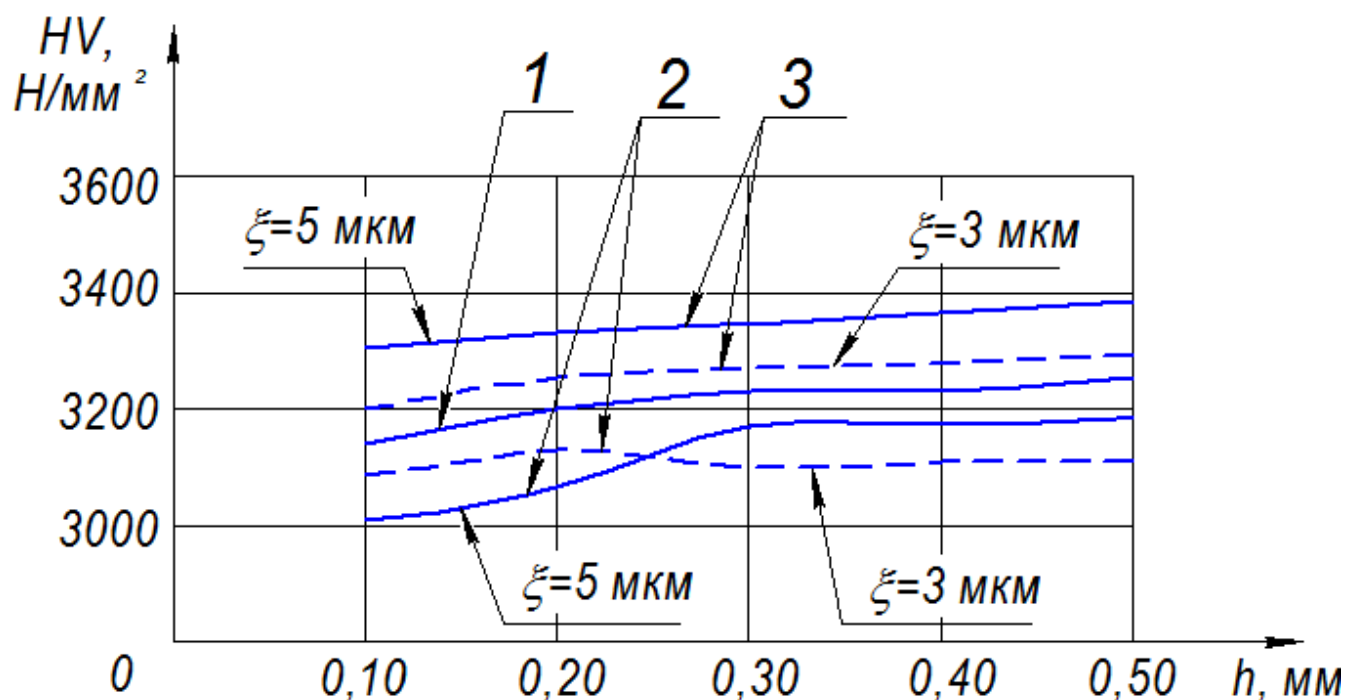
1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

Рисунок 3.41 - Влияние амплитуды колебаний ξ на микротвердость боковой поверхности резьбы (по В-В)



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.42 - Влияние направления ультразвуковых колебаний на микротвердость боковой поверхности резьбы (по Г-Г)



1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 3.43 - Влияние амплитуды колебаний ξ на микротвердость боковой поверхности резьбы (по Г-Г)

Из представленных данных следует, что при нарезании резьбы ультразвуковыми колебаниями в радиальном направлении происходит значительное увеличение микротвердости как на боковой поверхности резьбы, так и в её впадине, что обусловлено упрочняющим эффектом от ударно-циклического воздействия режущего инструмента. При введении в зону резания ультразвуковых колебаний в тангенциальном направлении наблюдалось уменьшение микротвердости по всей обрабатываемой резьбовой поверхности, что по-видимому в основном связано с уменьшением сил резания. При обработке с

ультразвуковыми колебаниями в осевом направлении микротвердость увеличилась на боковой поверхности резьбы и также связано с упрочняющим эффектом от ударного воздействия инструмента.

Таким образом, увеличение микротвёрдости имеет место при сообщении инструменту осевых и радиальных колебаний, а при тангенциальных колебаниях происходит снижение микротвёрдости.

Выводы по главе

1. На основе анализа технологических особенностей процесса нарезания внутренних резьб в глухих отверстиях разработаны специальные конструкции метчиков.

2. В результате проведённых исследований установлено, что при нарезании внутренних резьб метчиками наложение ультразвуковых колебаний приводит к уменьшению крутящего момента резания в 1,3 – 1,8 раза, а работоспособность инструмента при этом повышается в 3 – 5 раз.

3. Установлено, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний позволяет повысить точность нарезания резьб в пределах одной степени.

4. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на шероховатость боковой поверхности профиля резьбы показало, что при тангенциальных колебаниях шероховатость поверхности уменьшается на 20 – 30%.

5. В результате исследования влияния ультразвуковых колебаний на деформационное упрочнение поверхности резьбового профиля установлено, что при тангенциальных колебаниях имеет место уменьшение деформационного упрочнения, а при обработке с радиальными колебаниями степень деформационного упрочнения увеличивается.

Глава 4 Сравнительная оценка влияния технологических параметров ультразвукового воздействия на сопротивление усталости резьбовых деталей

Работоспособность резьбовых соединений зависит от значительного числа факторов. К ним относятся: проектирование резьбовых деталей, их изготовление, сборка и условия эксплуатации. Если при эксплуатации резьбовые соединения не испытывают переменных нагрузок то и разрушения резьбовых деталей не происходит. При эксплуатации в условиях переменных нагрузок могут иметь место поломки резьбовых деталей. При этом разрушение имеет усталостный характер и происходит по впадине резьбы, так как она является концентратором напряжений. Поэтому, в данном случае одним из наиболее важных этапов является технология изготовления резьбовой поверхности детали. Так как разрушение во впадине резьбы начинается с образования усталостной трещины, развитие которой зависит от остаточных напряжений, сформированных в поверхностном слое, то повысить работоспособность возможно за счёт получения значительных сжимающих остаточных напряжений. В результате проведенных исследований было установлено, что различные параметры ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы оказывают и различное влияние на формирование остаточных напряжений. Поэтому желательно оценить влияние полученных остаточных напряжений при различных условиях обработки на сопротивление усталости резьбовых деталей. Оценку сопротивления усталости резьбовых деталей наиболее удобно провести по одному из параметров предела выносливости – предельной амплитуде цикла напряжений, так как она учитывает напряжения от усилия затяжки резьбового соединения.

Определение предельной амплитуды цикла напряжений было проведено по специальной методике [103], позволяющей провести сравнительную оценку расчётным путём без проведения длительных и дорогостоящих испытаний на сопротивление усталости резьбовых деталей.

4.1 Определение предельной амплитуды цикла резьбовых деталей в условиях переменных нагрузок

4.1.1 Методика определения предельной амплитуды цикла напряжений резьбовых деталей при асимметричном цикле со средними растягивающими напряжениями от усилия затяжки

При различных видах механической обработки конструкционных сплавов и сталей в поверхностном слое изделия (глубиной до 0,3 мм) обычно в результате действия сил резания формируются сжимающие остаточные напряжения в осевом и окружном направлениях. При этом на поверхности и близко к ней значения остаточных напряжений близки к нулю или незначительны. Однако, даже в этом случае сопротивление усталости может значительно увеличиваться, так как огромное значение имеет распределение остаточных напряжений по всей глубине упрочненного слоя (обычно до 0,2 мм.) При проведении исследования влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости было установлено, что при переменных напряжениях близких по значению к пределу выносливости, в резьбовых деталях образуются усталостные трещины. При этом усталостные трещины всегда образуются во впадинах резьбы, так как она является концентратором напряжений (рисунок 4.1) .

При проведении исследования было обращено внимание на то, что резьбовые детали сохраняют свою работоспособность при наличии усталостных трещин. Следовательно, останавливают развитие усталостной трещины сжимающие остаточные напряжения, которые перераспределяются и достигают своих максимальных значений на дне усталостной трещины (рисунок 4.2).

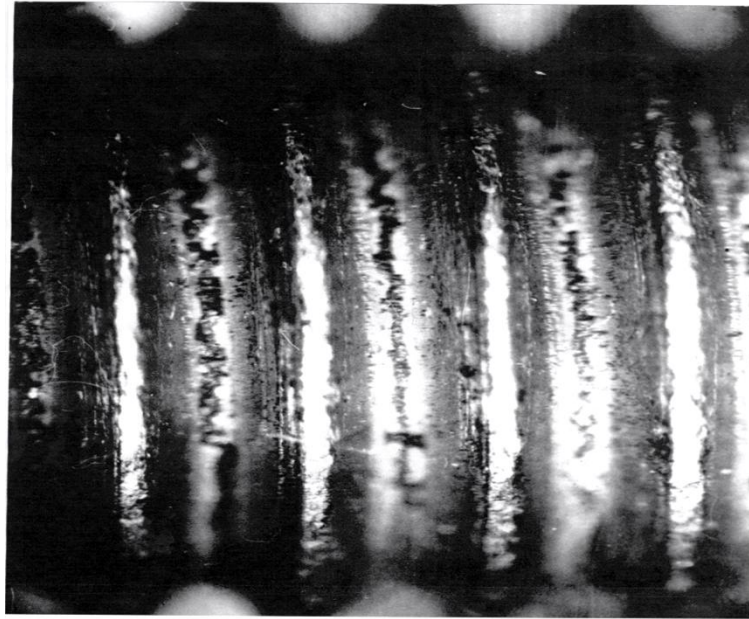


Рисунок 4.1 – Резьбовой образец с усталостными трещинами во впадинах резьбы

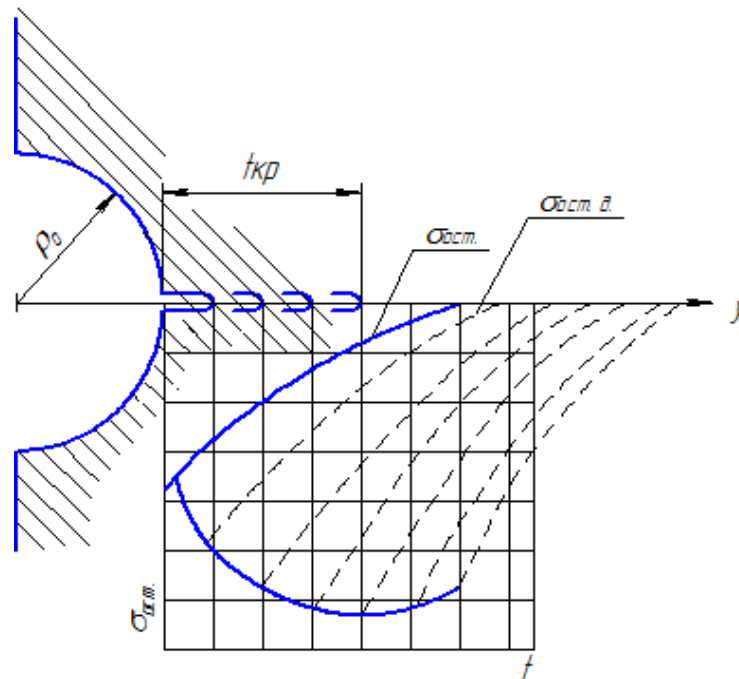
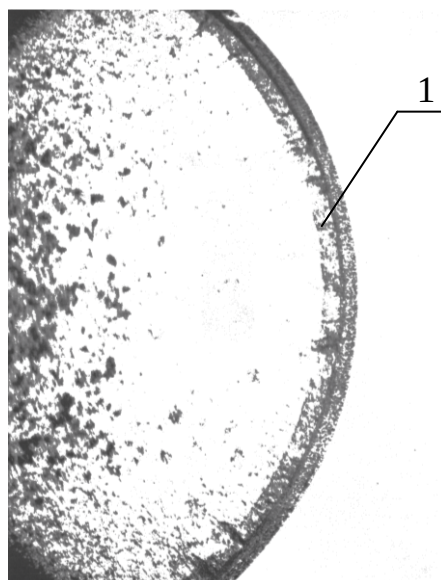


Рисунок 4.2 - Распределение остаточных напряжений на дне трещины

Данный факт подтверждается фотографией излома резьбового образца, который был доведен до разрушения после проведения испытаний на сопротивление усталости. На рисунке 4.3 четко видна нераспространяющаяся усталостная трещина.



1 – усталостная трещина

Рисунок 4.3 – Излом резьбового образца с нераспространяющейся усталостной трещиной

В связи с тем, что резьбовые детали при работе подвергаются действию растягивающих напряжений от усилия затяжки, то установление зависимости влияния полученных остаточных напряжений и напряжений от усилия затяжки резьбового соединения на предельную амплитуду цикла напряжений является крайне актуальным, так как позволит в значительной степени сократить длительные и дорогостоящие испытания резьбовых образцов на сопротивление усталости.

При работе резьбового соединения в условиях переменных нагрузок резьбовые детали подвергаются следующему воздействию. От усилия затяжки в резьбе возникают остаточные напряжения, при этом на них накладывается переменная составляющая от действия рабочих напряжений. Таким образом,

имеет место асимметричный цикл со средними растягивающими напряжениями. Если рассматривать остаточные напряжения на макроскопическом уровне, то в соответствии с теорией упругости происходит сложение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и рабочих σ_p напряжений (рисунок 4.4).

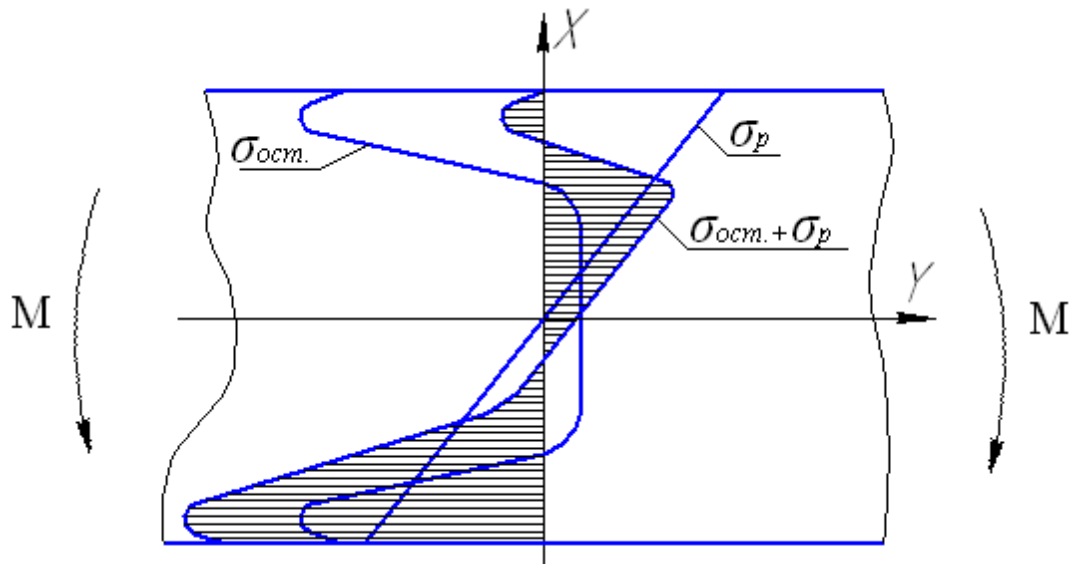


Рисунок 4.4 - Сложение остаточных $\sigma_{ост}$ и рабочих σ_p напряжений

Благоприятное действие сжимающих остаточных напряжений проявляется следующим образом. При сопротивлении усталости остаточные напряжения воздействуют также как и статическое напряжение от приложения внешней силы, поэтому влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости можно оценить при помощи диаграмм Гудуана или Хейга, в которых учитывают средние напряжения цикла через полные средние напряжения. При этом по оси σ_a откладывается предел выносливости материала при симметричном цикле σ_{-1} , а по оси σ_m – сопротивление разрыву материала S_K (рисунок 4.5).

На основании ранее изложенного, с помощью специальной методики [103] была проведена сравнительная оценка влияния полученных остаточных напряжений во впадинах резьбовых образцов на предельную амплитуду цикла напряжений, позволяющая установить взаимосвязь предложенного

технологического воздействия ультразвука при нарезании резьбы на эксплуатационные характеристики резьбового соединения.

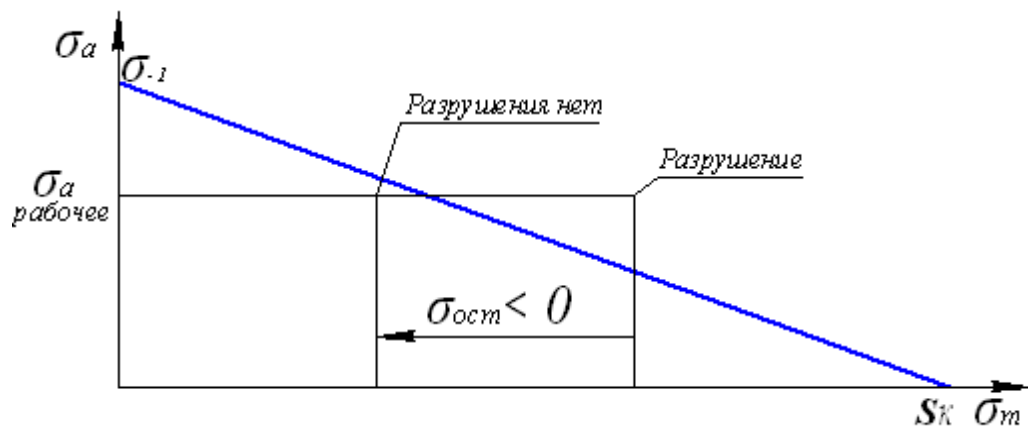


Рисунок 4.5 - Диаграмма Хейга для оценки сопротивления усталости с учётом остаточных напряжений

Предельная амплитуда цикла напряжений σ_a с учётом действующих остаточных напряжений и напряжений от усилия затяжки может быть выражена следующим образом:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi(\sigma_{\text{ост}} + \sigma_m), \quad (4.1)$$

где σ_{-1} - предел выносливости материала образца при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия;

ψ - коэффициент, учитывающий условия работы (нагружения) детали;

σ_m - среднее растягивающее напряжение от усилия затяжки резьбового соединения;

$\sigma_{\text{ост}}$ - остаточные напряжения, сформированные в поверхностном слое изделия.

Следует отметить, что для определения предельной амплитуды цикла напряжений для реальной детали по ранее приведённой зависимости необходимо определить какие значения остаточных напряжений нужно принимать в расчетах (средние, максимальные, эквивалентные или другие), выбрать значение коэффициента ψ для данного случая нагружения, а также при построении

диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений учесть материал детали, масштабный фактор и концентрацию напряжений во впадинах резьбы.

С учетом вышеизложенного методика построения диаграммы предельной амплитуды цикла напряжений выглядит следующим образом. Для определения влияния остаточных напряжений действующих в наиболее нагруженном сечении (во впадине резьбы) за основу принята видоизмененная диаграмма Ганна (рисунок 4.6.), достоинством которой является то, что она учитывает не только сопротивление усталости, но и текучесть материала детали (образца).

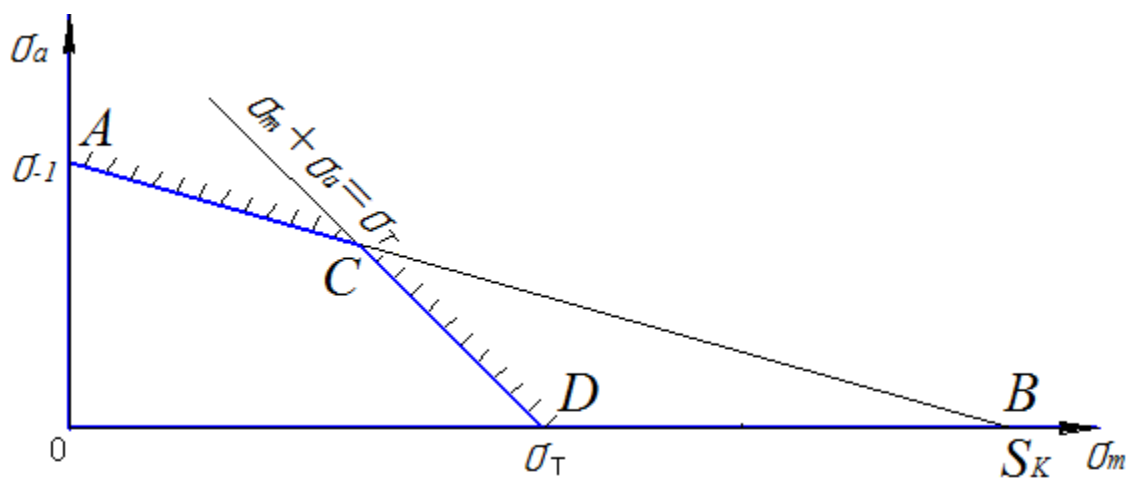


Рисунок 4.6 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений с учётом текучести материала

При этом по оси σ_a откладывается предел выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия $\sigma_{-1} = OA$, а по оси σ_m откладывается значение сопротивления разрыву материала $S_K = OB$. Затем на оси σ_m находится точка предела текучести данного материала $\sigma_T = OD$ и проводится прямая под углом 45 градусов к оси σ_a и определяется точка С пересечения с прямой АВ. Полученная диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений АСD для материала резьбовой детали не учитывает действие остаточных напряжений и концентрацию напряжений.

При работе резьбового соединения в условиях переменных нагрузок во впадине резьбы действуют напряжения, приведённые на рисунке 4.7.

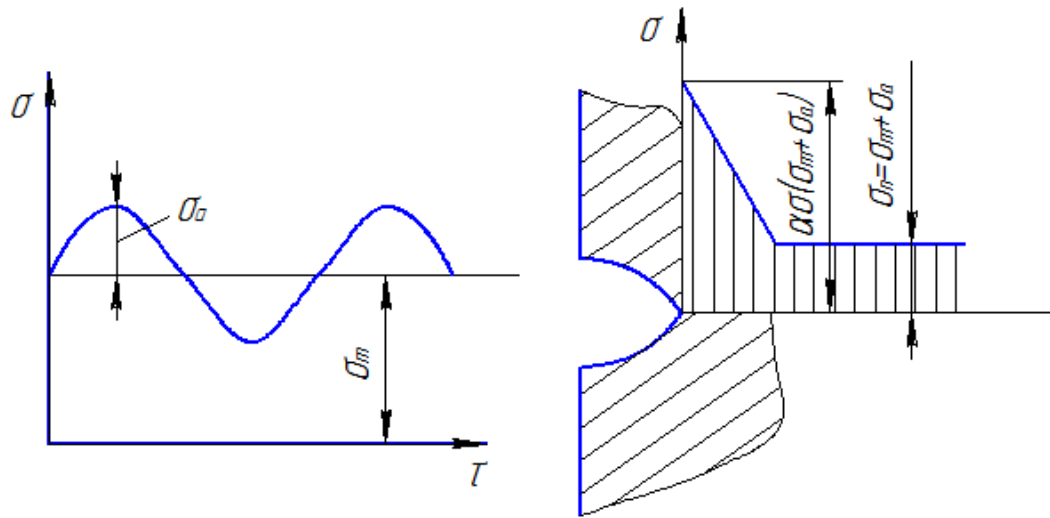


Рисунок 4.7 - Напряжения, действующие во впадине резьбы, являющейся концентратором напряжений.

Наличие концентратора уменьшает значение предела выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия σ_{-1} в K_σ раз (K_σ - эффективный коэффициент концентрации напряжений) и, следовательно, по оси σ_a откладывается отрезок $\sigma_{-1}/K_\sigma = OA_1$. По оси σ_m откладывается отрезок $OB_1 = S_k/\alpha_\sigma$ (α_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений) и строится прямая A_1B_1 . Аналогично по оси σ_m откладывается отрезок $OD_1 = \sigma_T/\alpha_\sigma$, далее из точки D_1 под углом 45 градусов строится прямая D_1C_1 , ограничивающая работу резьбовой детали по текучести. Далее определяем точку C_1 пересечения линий A_1B_1 и D_1C_1 . Теперь диаграмма A_1C_1KD учитывает влияние концентратора напряжения (рисунок 4.8).

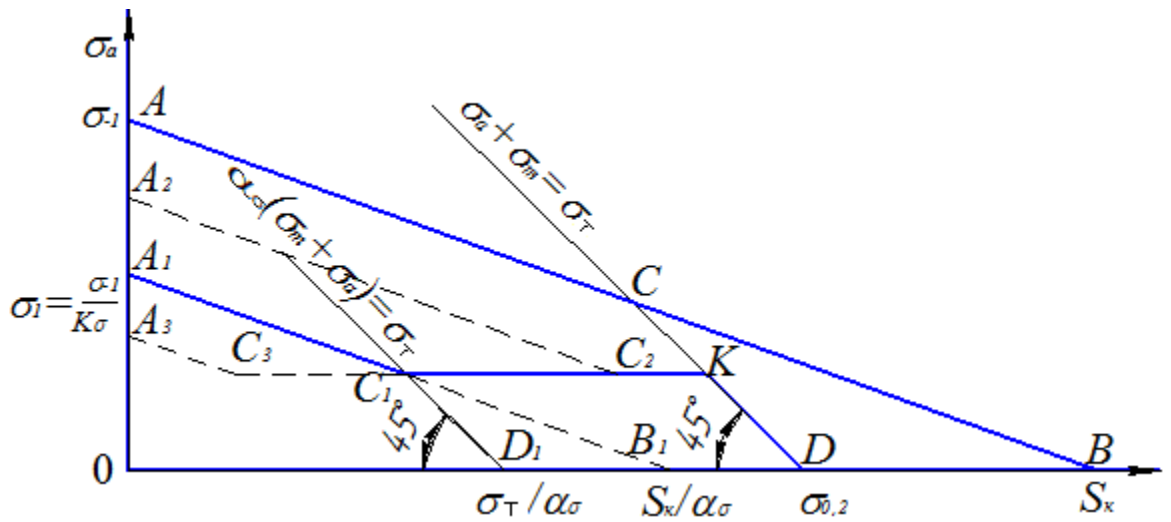


Рисунок 4.8 – Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений с учётом действия концентрации напряжений и остаточных напряжений во впадине резьбы

Коэффициенты концентрации напряжений K_σ и α_σ можно определить через следующие зависимости:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} K_\sigma + \frac{\sigma_m}{S_K} K_\sigma = 1, \quad (4.2)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_T} \alpha_\sigma + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \alpha_\sigma = 1. \quad (4.3)$$

Так как начало локальной текучести начинается в точке C_1 (во впадине резьбы, являющейся наиболее нагруженным сечением резьбового образца), то напряжение при котором начинается локальная текучесть можно определить следующим образом:

$$\sigma_m^T = \frac{S_K (\sigma_T - \sigma_{-1} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma})}{\alpha_\sigma (S_K - \sigma_{-1})}. \quad (4.4)$$

По полученной диаграмме видно, что на отрезке C_1K с увеличением среднего напряжения σ_m (от точки C_1 до точки K) предельная амплитуда цикла напряжений не изменяется. Уменьшение предельной амплитуды цикла

начинается в точке K на отрезке KD после достижения предела текучести материала по всему опасному сечению детали.

На последнем этапе строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжения с учётом остаточных напряжений, действующих в опасном сечении - во впадине резьбы. Очевидно, что сжимающие остаточные напряжения увеличивают предельную амплитуду цикла напряжений и прямую A_1C_1 необходимо переместить параллельно вверх. В результате получим диаграмму A_2C_2KD , учитывающую действие остаточных сжимающих напряжений. Для учета действия растягивающих остаточных напряжений прямую A_1C_1 необходимо переместить параллельно вниз до пересечения с прямой C_1K учитывающую локальную текучесть. При этом диаграмма A_3C_3KD будет учитывать действие растягивающих остаточных напряжений.

Очевидно, что увеличение предельной амплитуды цикла напряжений на величину максимальных сжимающих напряжений неправомерно, так как распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя неравномерно. Поэтому было принято решение принять при расчете средне-интегральные остаточные напряжения.

По полученным значениям остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы была проведена сравнительная оценка (по специальной методике, разработанной С.И. Ивановым и В.Ф. Павловым) влияния ультразвукового воздействия на предельную амплитуду цикла напряжений.

Приращение предельной амплитуды цикла напряжений $\Delta\sigma_{Ra}$ за счёт остаточных напряжений во впадинах резьбы при среднем напряжении σ_m определяется зависимостью

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)} |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4.5)$$

где $\bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)}$ – коэффициент влияния упрочнения на предельную амплитуду по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений при среднем напряжении σ_m ;

$\bar{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральные остаточные напряжения, вычисляемые по формуле

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{res}}(\beta)}{\sqrt{1-\beta^2}} d\beta, \quad (4.6)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{res}}(\beta)$ – значение полученных остаточных напряжений во впадине резьбы, которые определяются следующим образом:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{res}}(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta}^{\text{res}} - \sigma_z^{\text{res}})^2 + (\sigma_z^{\text{res}} - \sigma_r^{\text{res}})^2 + (\sigma_r^{\text{res}} - \sigma_{\theta}^{\text{res}})^2}; \quad (4.7)$$

$\beta = y/t_{\text{кр}}$ – относительное расстояние от поверхности впадин резьбы до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\text{кр}}$;

$t_{\text{кр}}$ – глубина нераспространяющейся усталостной трещины, которая определяется зависимостью $t_{\text{кр}} = 0,216d$ (d – диаметр образца по впадине резьбы).

Коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)}$ при $\sigma_T > \sigma_m^T$ вычисляется по формуле

$$\bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)} = \bar{\Psi}_{\sigma} - \left(\frac{\sigma_{-1}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_{\kappa} |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|} \right), \quad (4.8)$$

где $\bar{\Psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду цикла напряжений при симметричном цикле нагружения;

S_{κ} – сопротивление разрыву материала;

σ_m^T – среднее напряжение цикла, при котором начинается локальная текучесть, определяемое по зависимости

$$\sigma_m^T = \frac{S_{\kappa} \left(\sigma_T - \sigma_{-1} \frac{\alpha_{\sigma}}{K_{\sigma}} \right)}{\alpha_{\sigma} (S_{\kappa} - \sigma_{-1})}, \quad (4.9)$$

где K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений и α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений, которые можно определить по справочным данным.

Результаты оценки влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей, изготовленных с введением в зону резания различных по направлению ультразвуковых колебаний, представлены в следующем разделе.

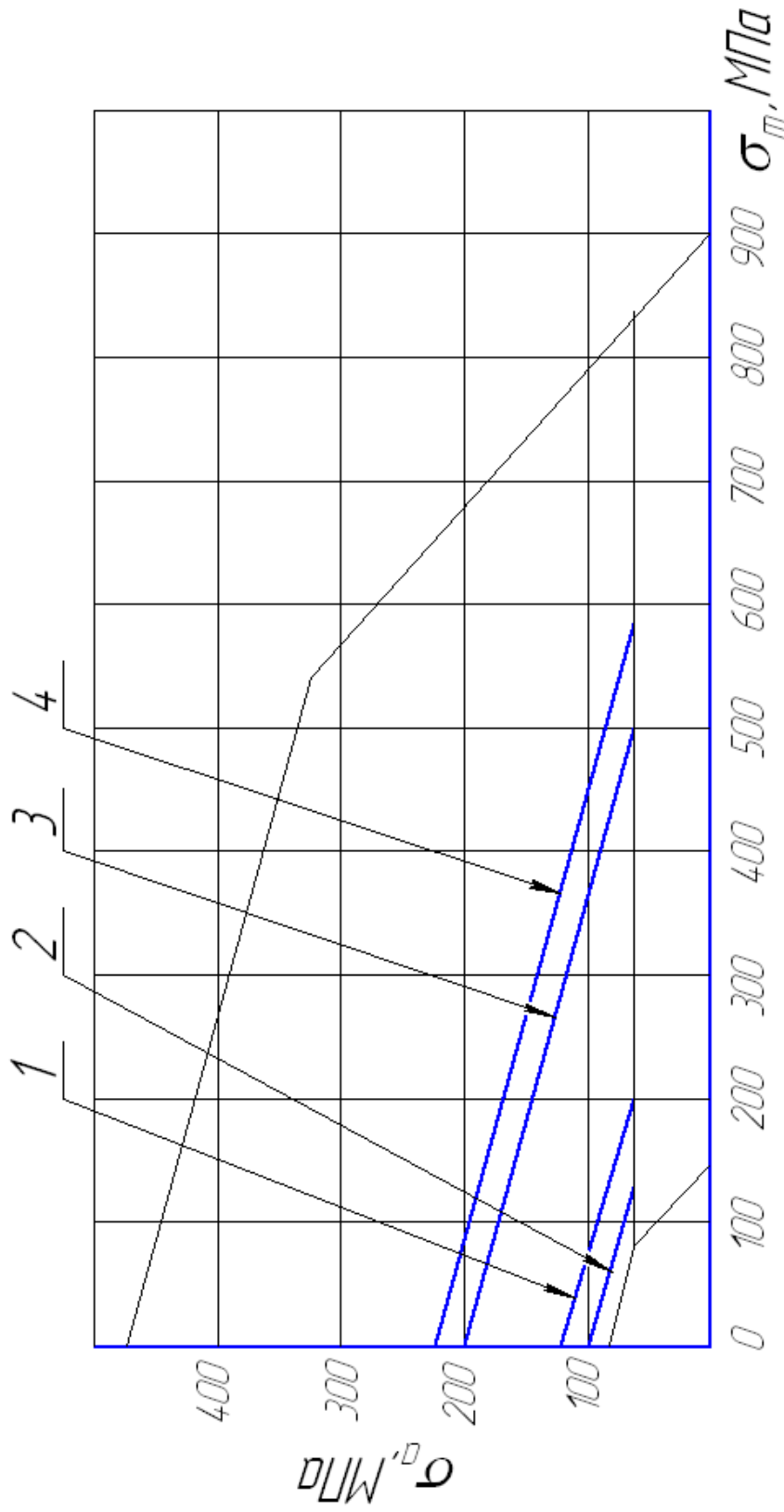
4.1.2 Результаты исследования влияния технологических параметров ультразвукового воздействия на предельную амплитуду цикла напряжений резьбовых деталей

Для прогнозирования работоспособности резьбовых деталей изготовленных с введением в зону резания ультразвуковых колебаний были построены, по приведенной методике, диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений. Для резьбовых образцов с нарезанной резьбой М5, М6, М8 из исследуемых материалов (рисунки 4.9-4.13). При построении диаграмм использовались механические характеристики обрабатываемых материалов приведённые в таблице 1. Для нагруженных резьб М5, М6, М8 радиус впадин составляет 0,15-0,20 мм, $\alpha_\sigma = 6,2$, $K_\sigma = 6$, коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду цикла напряжений $\bar{\Psi}_\sigma = 0,11$. Проведенный анализ диаграмм показал, что имеет место увеличение предельной амплитуды цикла напряжений за счет полученных при нарезании резьбы сжимающих остаточных напряжений. Минимальное повышение предельной амплитуды цикла напряжений наблюдается при обработке с наложением на инструмент тангенциальных ультразвуковых колебаний, а максимальное при наложении радиальных ультразвуковых колебаний. Так же близкие значения дает использование осевых ультразвуковых колебаний. При нарезании резьбы без ультразвукового воздействия предельная амплитуда имеет значения несколько большие по сравнению с применением тангенциальных ультразвуковых колебаний.

Например, при нарезании резьбы М5 на заготовках из титанового сплава ВТ3-1 получили следующие значения предельной амплитуды цикла напряжений (см. рисунок 4.9).

Без учета напряжения от усилия затяжки (при $\sigma_m = 0$) предельная амплитуда цикла напряжений σ_a имеет следующие значения:

$\sigma_a = 100$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;



1 – нарезание резьбы без ультразвука; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 4.9 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых образцов (резьба М5, обрабатываемый материал титановый сплав ВТ 3-1)

$\sigma_a = 115$ МПа – при нарезании резьбы без ультразвука;

$\sigma_a = 195$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 205$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При напряжениях от усилия затяжки резьбового соединения $\sigma_m = 100$ МПа предельная амплитуда цикла напряжений имеет следующие значения:

$\sigma_a = 85$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 100$ МПа – при нарезании резьбы без ультразвука;

$\sigma_a = 178$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 188$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При напряжениях $\sigma_m = 200$ МПа предельная амплитуда уменьшается до следующих значений:

$\sigma_a = 80$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 80$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 48$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 58$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

Следует отметить, что при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями и без применения ультразвука предельная амплитуда цикла имеет уже минимальные значения и благоприятное воздействие сжимающих остаточных напряжений на работоспособность не проявляется. Однако, при обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями повышение работоспособности имеет место до значений $\sigma_m = 500$ МПа, а при применении

радиальных ультразвуковых колебаний до значений $\sigma_m=560$ МПа. При напряжениях $\sigma_m=300$ МПа получили следующие значения предельных амплитуд цикла напряжений:

$\sigma_a=80$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a=80$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a=120$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a=130$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

Следует отметить, что для резьб М5, М6, М8 средние напряжения от усилия затяжки обычно не превышают значений 200 МПа, поэтому при обработке с осевыми или радиальными ультразвуковыми колебаниями имеет место значительное увеличение работоспособности по критерию предельной амплитуды цикла напряжений почти в 2 раза.

При нарезании резьбы М6 на заготовках из титанового сплава ВТ9 получили следующие значения предельной амплитуды цикла напряжений (рисунок 4.10).

При $\sigma_m=0$:

$\sigma_a=110$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

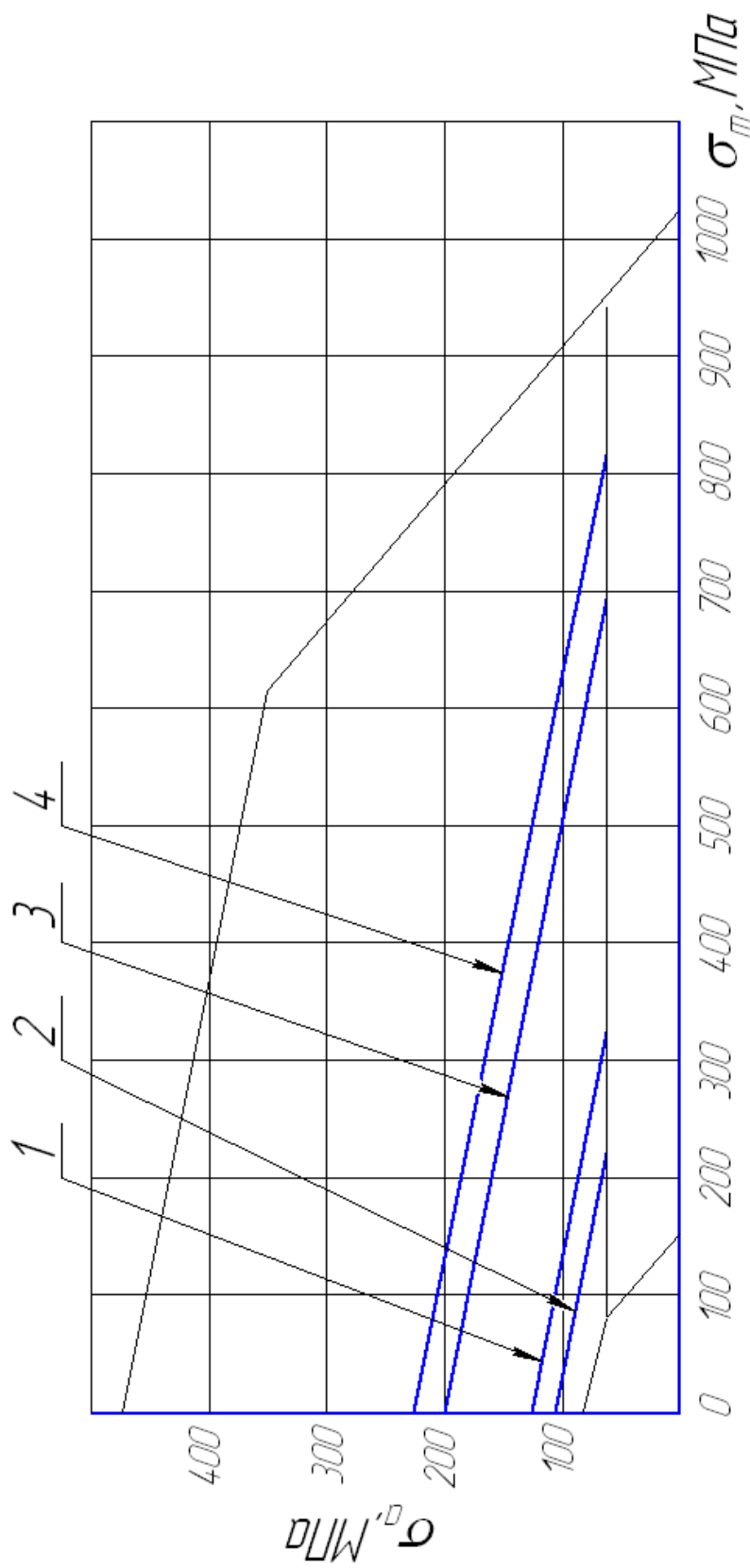
$\sigma_a=115$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a=200$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a=215$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m=100$:

$\sigma_a=98$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;



1 – нарезание резьбы без ультразвука; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 4.10 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых образцов (резьба М6, обрабатываемый материал титановый сплав ВТ 9)

$\sigma_a = 103$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 188$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 203$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m = 200$:

$\sigma_a = 90$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 95$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 180$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 195$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При нарезании резьбы М8 на заготовках из титанового сплава ВТ16 получили следующие значения предельной амплитуды цикла напряжений (рисунок 4.11).

При $\sigma_m = 0$:

$\sigma_a = 100$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 110$ МПа – при нарезании без ультразвука;

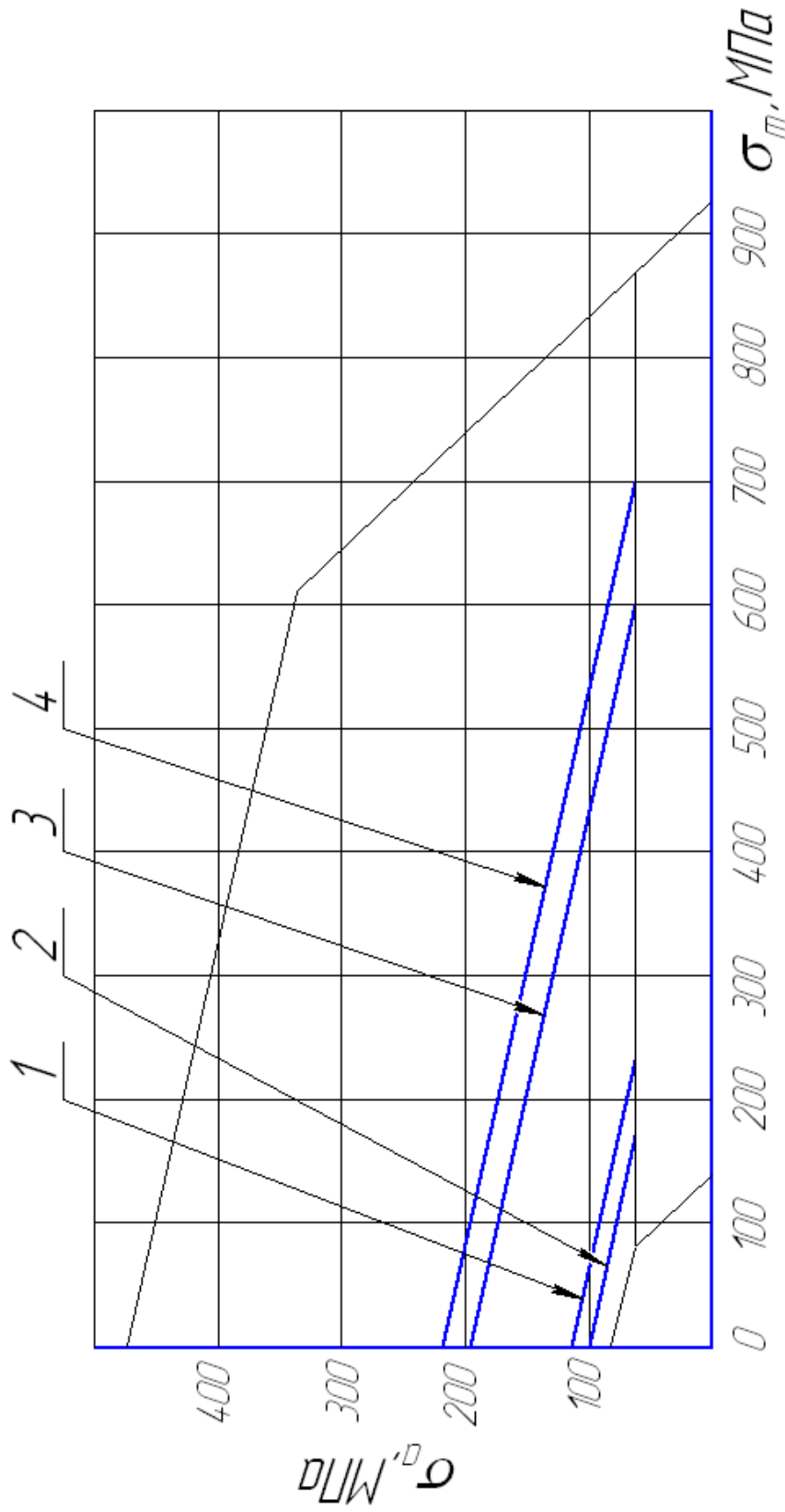
$\sigma_a = 200$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 208$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m = 100$:

$\sigma_a = 90$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 100$ МПа – при нарезании без ультразвука;



1 – нарезание резьбы без ультразвука; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 4.11 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых образцов (резьба М8, обрабатываемый материал титановый сплав ВТ 16)

$\sigma_a=190$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a =198$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m=200$:

$\sigma_a = 80$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a=90$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a= 180$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a =188$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При нарезании резьбы М6 на заготовках из нержавеющей стали 12Х18Н9Т получили следующие значения предельной амплитуды цикла напряжений (рисунок 4.12).

При $\sigma_m=0$:

$\sigma_a = 50$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 60$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a=98$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

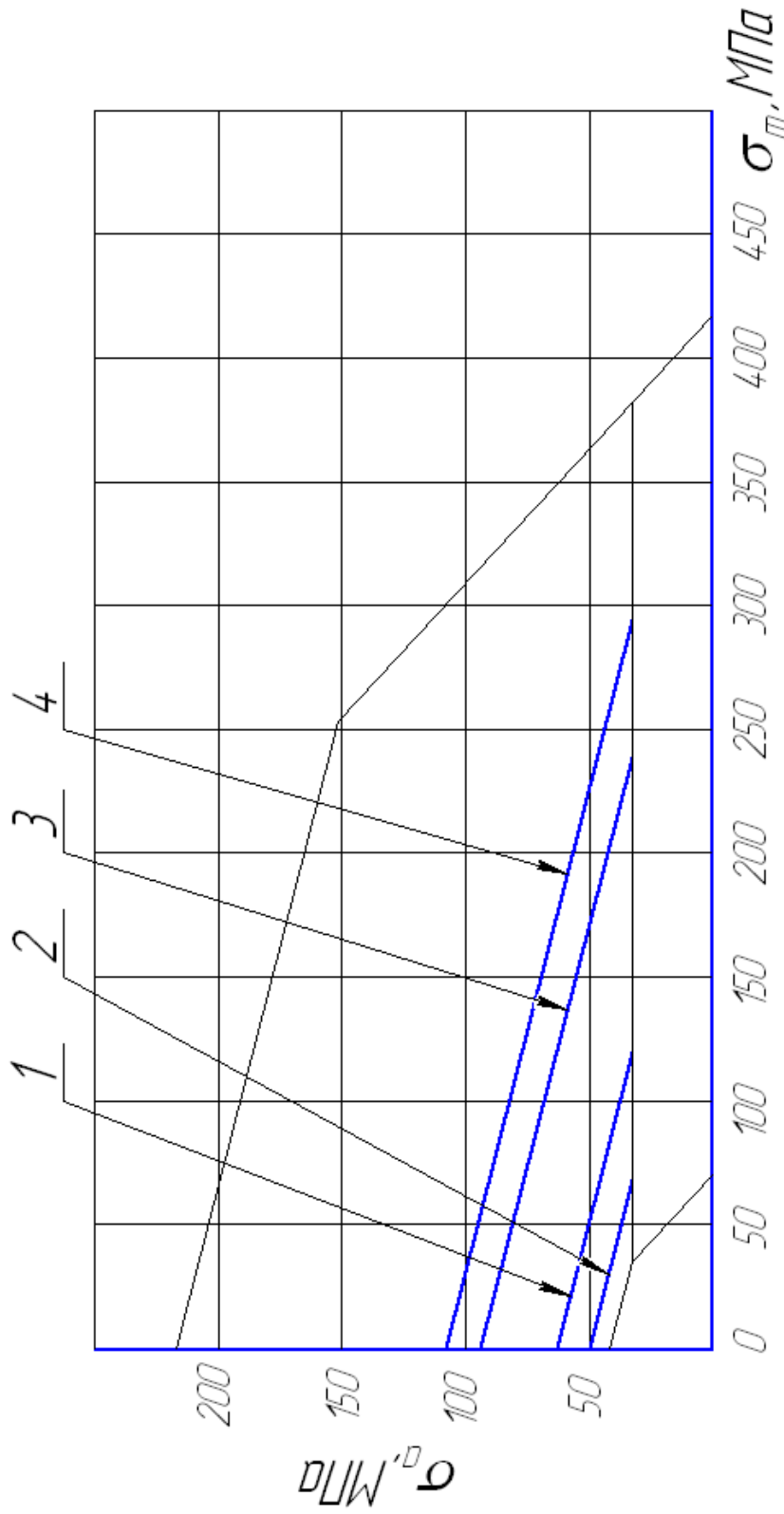
$\sigma_a = 106$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m=100$:

$\sigma_a = 33$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a=43$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a=81$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;



1 – нарезание резьбы без ультразвука; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 4.12 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых образцов (резьба М6, обрабатываемый материал нержавеющая сталь 12Х18Н9Т)

$\sigma_a = 89$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При $\sigma_m = 200$:

$\sigma_a = 33$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 33$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 55$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 63$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

При нарезании резьбы М8 на заготовках из высокопрочной стали 30ХГСА получили следующие значения предельной амплитуды цикла напряжений (рисунок 4.13).

При $\sigma_m = 0$:

$\sigma_a = 100$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 107$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 190$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 200$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

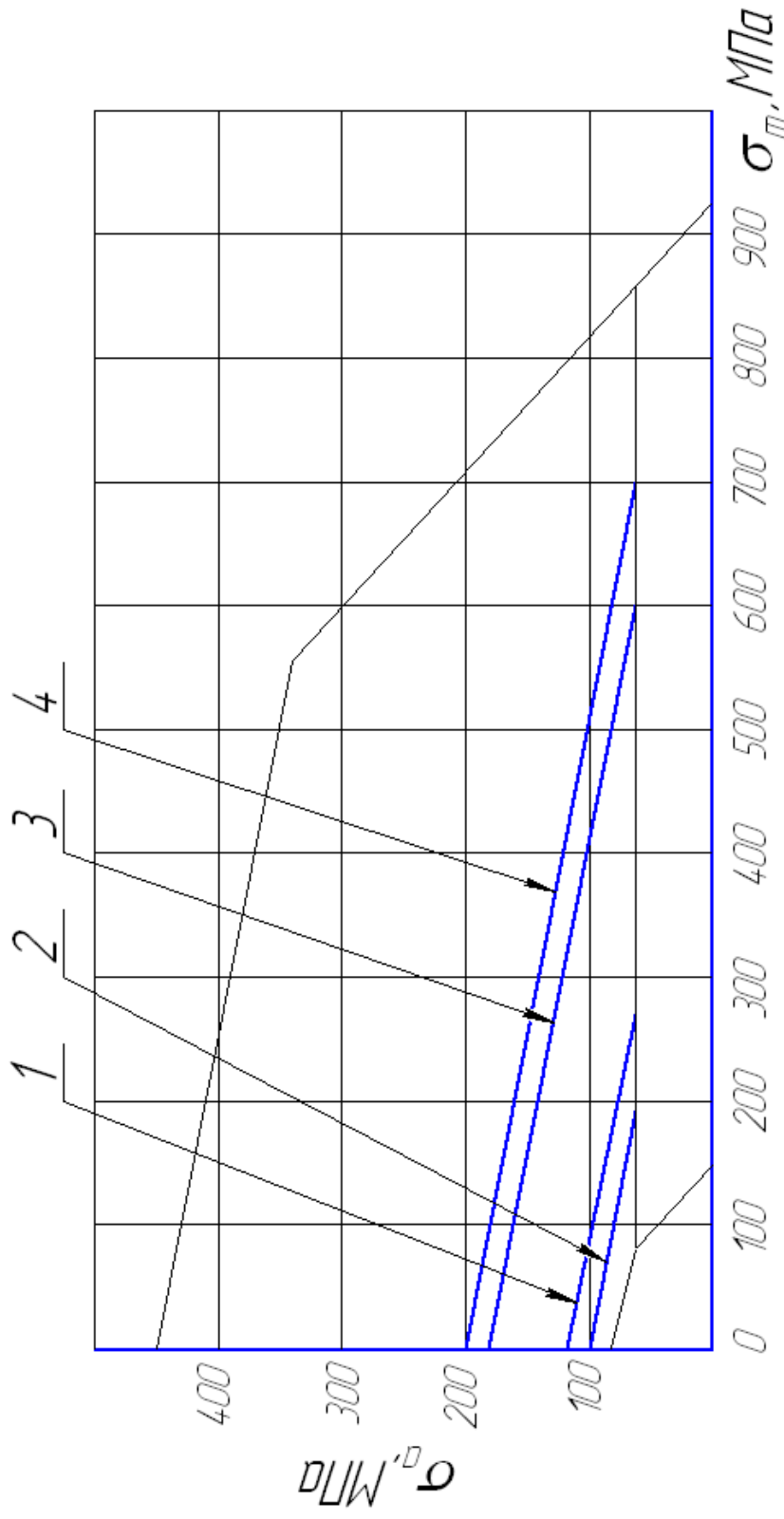
При $\sigma_m = 100$:

$\sigma_a = 90$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 97$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 180$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 190$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.



1 – нарезание резьбы без ультразвука; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание с радиальными ультразвуковыми колебаниями

Рисунок 4.13 - Диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений резьбовых образцов (резьба М8, обрабатываемый материал высокопрочная сталь 30 ХГСА)

При $\sigma_m = 200$:

$\sigma_a = 75$ МПа – при нарезании резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 82$ МПа – при нарезании без ультразвука;

$\sigma_a = 165$ МПа – при нарезании резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями;

$\sigma_a = 175$ МПа – при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями.

Таким образом, технологическое воздействие ультразвука при нарезании резьбы оказывает значительное влияние на сопротивление усталости резьбовых соединений, так как предельная амплитуда цикла напряжений в зависимости от условий обработки изменяется значительно (почти в 2 раза).

Выводы по главе

1. В результате проведенных исследований установлено, что предельная амплитуда цикла напряжений резьбовых образцов в зависимости от параметров ультразвукового воздействия изменяется следующим образом:

- при тангенциальных ультразвуковых колебаниях с амплитудой 5 мкм предельная амплитуда цикла напряжений уменьшается на 10-20% по сравнению с обработкой без ультразвука;

- при осевых ультразвуковых колебаниях с амплитудой 5 мкм предельная амплитуда цикла напряжений увеличивается на 60-70% по сравнению с обработкой без ультразвука;

- при радиальных ультразвуковых колебаниях с амплитудой 5 мкм предельная амплитуда цикла напряжений увеличивается на 70-80% по сравнению с обработкой без ультразвука.

2. Для повышения предела выносливости резьбовых деталей необходимо при окончательной обработке применять радиальные или осевые ультразвуковые колебания с амплитудой около 5 мкм.

3. Установлена аналитическая взаимосвязь остаточных напряжений, сформированных во впадинах резьбы с амплитудными напряжениями, возникающими при эксплуатации резьбовых деталей, позволяющая выбрать оптимальный вариант обработки, при котором предельная амплитуда цикла напряжений резьбовых деталей повышается в 1,3 – 1,8 раз.

Глава 5 Практическое применение результатов теоретических и экспериментальных исследований и внедрение процесса ультразвукового резьбонарезания

На основе выполненных теоретико-экспериментальных исследований были разработаны прогрессивные технологические процессы и специальное оборудование для реализации процесса нарезания резьбы с введением в зону резания энергии ультразвука. Разработан оригинальный способ нарезания резьб с ультразвуковыми колебаниями в глухих отверстиях (а.с. №1284419) позволяющий повысить качество резьбы. С учётом выявленных особенностей влияния ультразвуковых колебаний на резьбовую поверхность предложен способ получения резьбы (патент РФ №2404031), позволяющий повысить работоспособность резьбовых деталей по предельной амплитуде цикла за счёт получения максимальных сжимающих напряжений.

Для реализации процесса нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями была разработана гамма специальных ультразвуковых устройств. В разработанных устройствах также реализованы технические решения, признанные изобретениями.

5.1 Специальное оборудование и новые способы для нарезания внутренних и наружных резьб с ультразвуковыми колебаниями

Исследования влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на процесс резьбонарезания проводились при помощи специально разработанных и изготовленных ультразвуковых устройств. Данные устройства могут устанавливаться на любой универсальный токарный или сверлильный станок. Для уменьшения габаритов и массы, предлагаемые устройства выполнены с пьезокерамическими преобразователями. Кроме того, по сравнению с магнитострикционными преобразователями, пьезокерамические преобразователи

не требуют водяного охлаждения, что также позволяет упростить конструкцию, уменьшить габариты, массу, исключить насосную станцию и повысить удобство при работе с данной установкой.

Ниже представлены четыре ультразвуковых устройства, которые использовались при проведении исследования. Следует отметить, что все разработанные устройства являются универсальными и могут использоваться как на вертикально-сверлильных, так и на токарных станках. Ультразвуковое устройство, приведённое на рисунке 5.1, содержит резбонарезной инструмент 1, который крепится в цанге 2, а зажим осуществляется накидной гайкой. Крепление инструмента осуществляется в пьезокерамическом преобразователе, состоящем из концентратора 3, пьезопластин 4, частотопонижающей накладки 5, которые стягиваются в пакет при помощи шпильки 9. Концентратор выполнен из титанового сплава ВТЗ-1, а шпилька из высокопрочной стали 30ХГСА. Электрические сигналы ультразвуковой частоты от генератора подаются на щёткодержатель 6, закреплённый на корпусе 7 при помощи конического хвостовика 8. Данное устройство может устанавливаться в специальную державку, которая закрепляется в резцедержателе универсального токарного станка.

С помощью данного ультразвукового устройства осуществлялось нарезание наружных резьб на образцах, изготовленных из исследуемых материалов с наложением на резьбовой резец тангенциальных или радиальных ультразвуковых колебаний.

Нарезание внутренних резьб метчиками в труднообрабатываемых материалах осуществлялось при помощи ультразвуковых устройств, разработанных совместно с к.т.н., доцентом А.Г. Турковым, приведённых на рисунках 5.2 - 5.5. На рисунках 5.2 - 5.3 представлено ультразвуковой устройством для нарезания наиболее распространённых резьб М5 - М14. Для реализации процесса нарезания резьбы с наложением на метчик ультразвуковых колебаний использован пьезокерамический преобразователь состоящий, из концентратора,

пьезопластин и частотопонижающей накладки. Метчик закрепляется в концентраторе при помощи цанги и накидной гайки, что обеспечивает достаточный акустический контакт инструмента и концентратора.

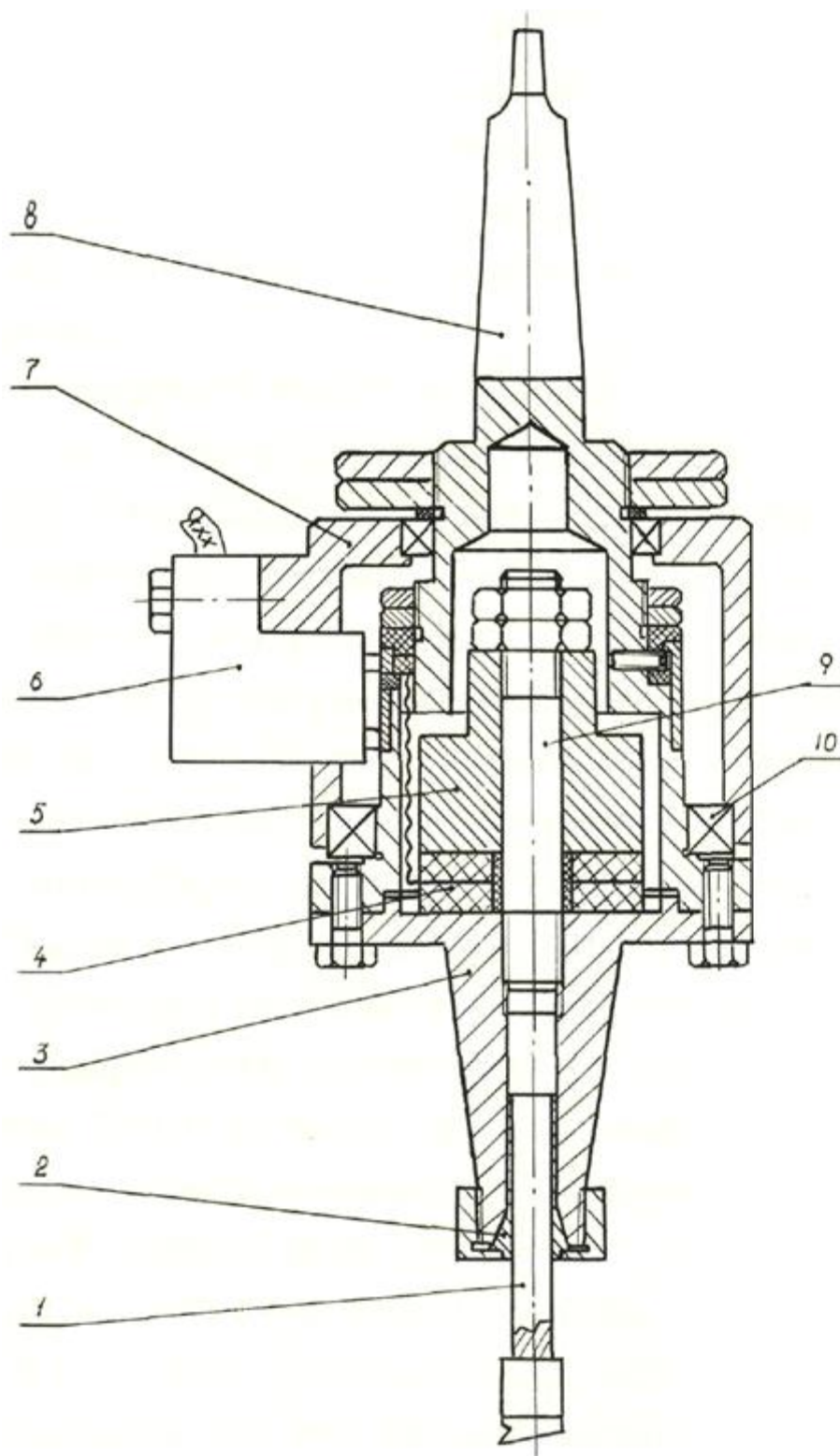


Рисунок 5.1 - Ультразвуковое устройство для нарезания резьб М3-М12

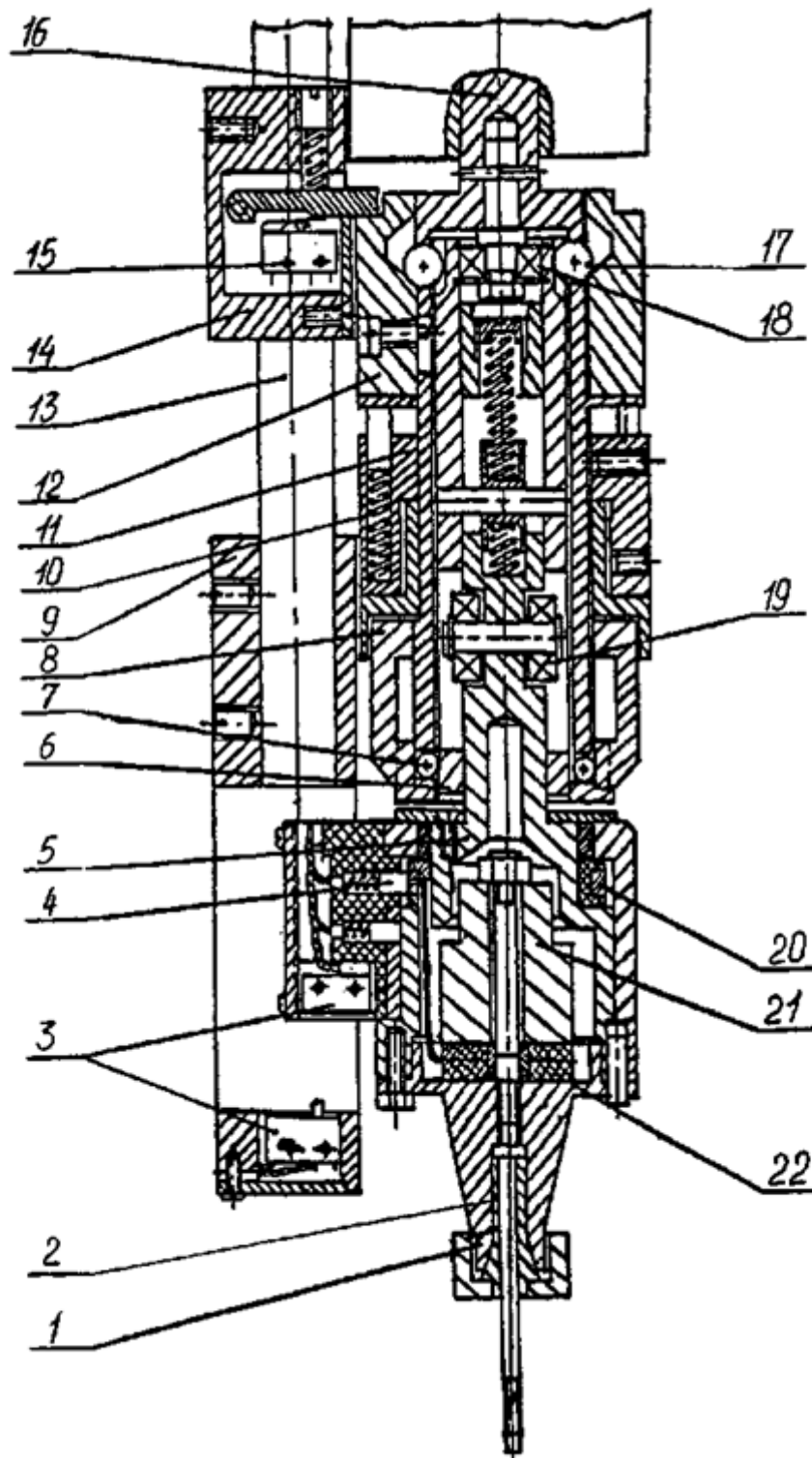


Рисунок 5.2 - Ультразвуковое резьбонарезное устройство
для резьб М5-М14

С учётом того, что при нарезании резьбы может иметь место несоосность метчика и обрабатываемого отверстия, то в ультразвуковом устройстве предусмотрена возможность отклонения ведущего вала за счёт сферического подшипника от продольной оси, что позволяет устранить появление изгибающего момента метчика при нарезании резьбы.

Для компенсации возможной погрешности шага нарезаемой резьбы (шага метчика) и продольной подачи станка предусмотрено телескопическое выдвижение ведомого вала вместе с пьезокерамическим преобразователем. Также данное устройство оснащено быстронастраиваемой предохранительной муфтой для исключения поломок метчиков. Для автоматизации процесса имеется настройка на необходимую глубину нарезания резьбы.

Фотография данного устройства приведена на рисунке 5.3.

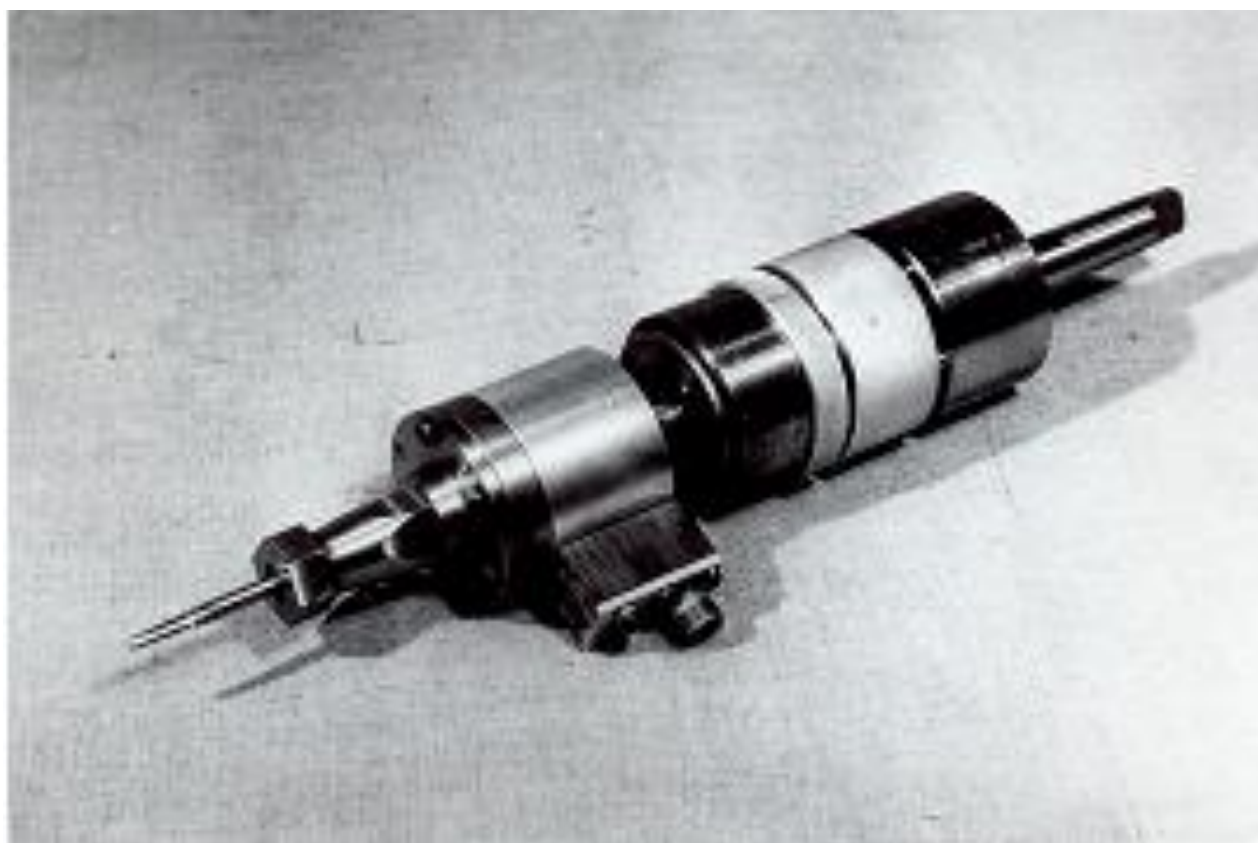


Рисунок 5.3 - Ультразвуковое резьбонарезное устройство
для резьб М5-М14

На рисунках 5.4 - 5.5 приведен общий вид ультразвукового устройства для нарезания внутренних резьб М2-М6.

Отличительной особенностью данного устройства является то, что корпус 7 не вращается и крепится к пиноле станка. Крутящий момент передаётся от шпинделя станка на ведущий вал 6. Основным конструктивным отличием данной ультразвуковой головки является применение электромагнитной муфты 4, позволяющей более удобно осуществлять настройку на требуемый крутящий момент, который зависит от прочности применяемого метчика. Кроме того, приведённое устройство имеет значительно меньшие габариты и массу.



Рисунок 5.4 - Ультразвуковое устройство для нарезания резьб М2-М6

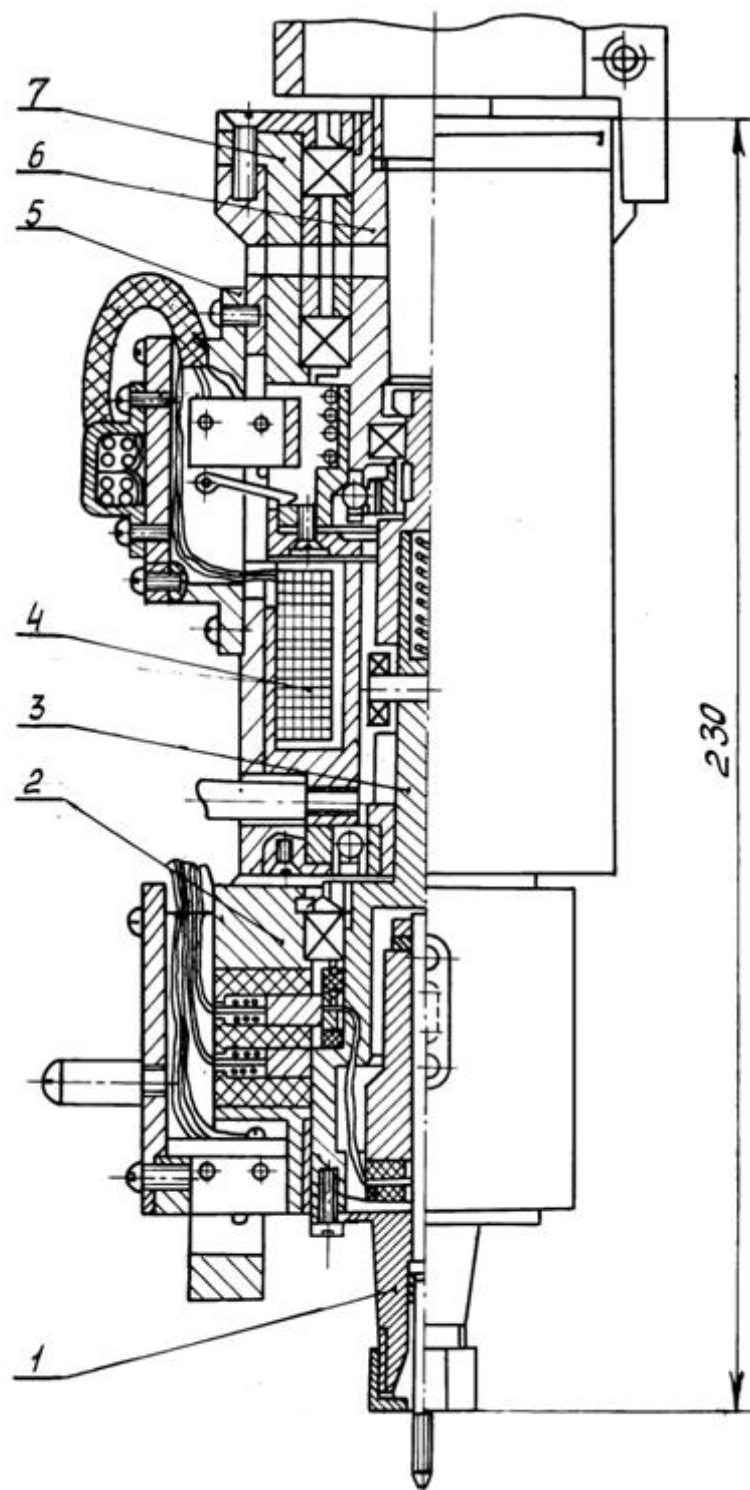


Рисунок 5.5 - Ультразвуковое устройство для нарезания резьб М2-М6

Ультразвуковое устройство для нарезания наружных резьб М4-М12 круглыми плашками с осевыми колебаниями представлено на рисунке 5.6. Приведенное ультразвуковое устройство содержит пьезокерамический преобразователь с установленной в гайке 1 резьбонарезной плашкой. Пьезокерамический преобразователь жёстко связан с валом 3, установленным с возможностью телескопического выдвижения в корпусе 7. Корпус 7 имеет конический хвостовик для установки устройства в заднюю бабку токарного станка. С целью исключения заклинивания вала 3, его телескопическое выдвижение осуществляется с помощью шарикоподшипников 13, установленных в продольных пазах корпуса 7 и жёстко связанных с валом 3. Данное устройство позволяет осуществлять нарезание резьбы по способу "самозатягивания", тем самым исключается погрешность подачи и шага нарезаемых резьб. Настройка на различные диаметры нарезаемых резьб осуществляется путём смены гайки 1 с установленной в ней резьбонарезной плашкой.

Нарезание резьбы при помощи данного устройства осуществляется следующим образом. В заднюю бабку токарного станка устанавливается ультразвуковое резьбонарезное устройство с закрепленной на концентраторе круглой плашкой из быстрорежущей стали Р6М5 соответствующего типоразмера. В шпиндель токарного станка устанавливается заготовка необходимого диаметра под нарезаемую резьбу. Затем с помощью ультразвукового генератора производится настройка ультразвукового устройства на резонансную частоту и измеряется амплитуда колебаний (в данном случае – осевых). Число оборотов шпинделя станка задается минимальным (30 - 70 об/мин), включается вращение шпинделя с установленной заготовкой, к которой подводится ультразвуковое резьбонарезное устройство и осуществляется нарезание резьбы с вынужденными ультразвуковыми колебаниями по методу «самозатягивания», при этом в зону резания подается технологическая среда. После нарезания необходимой длины резьбы включается реверс шпинделя станка.

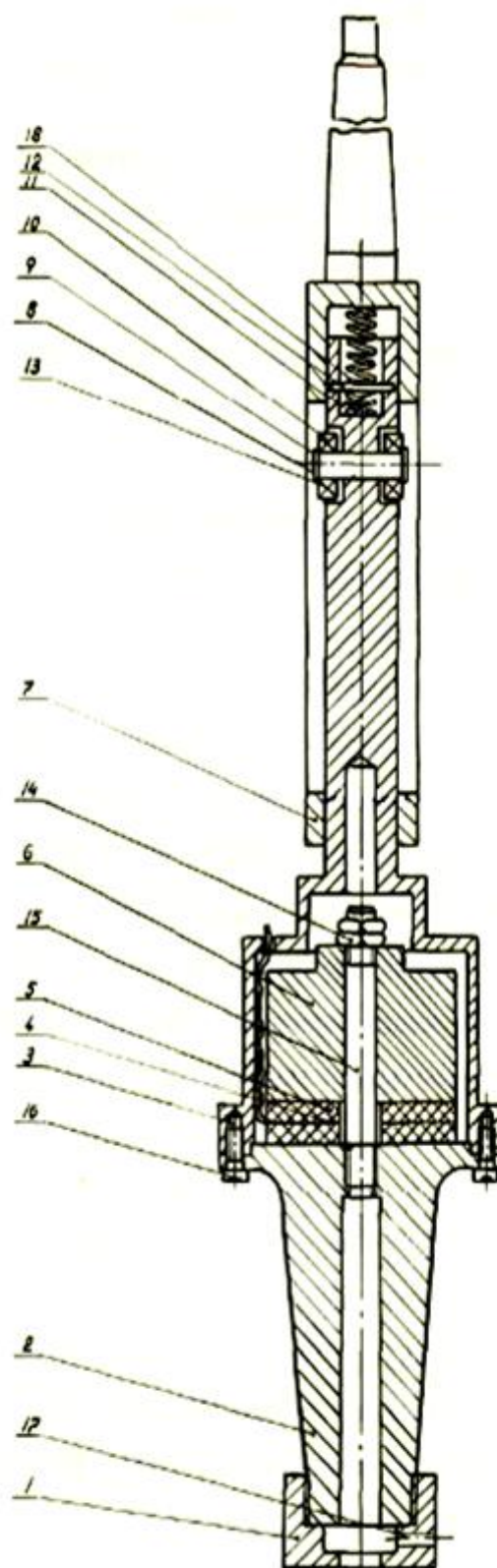


Рисунок 5.6 - Ультразвуковое устройство для нарезания резьб М4-М12
круглыми плашками

При помощи данных устройств проводилось нарезание резьб при различных ультразвуковых технологических параметрах и при сообщении резьбообразующему инструменту радиальных, осевых и тангенциальных колебаний. При проведении исследований инструменту сообщались ультразвуковые колебания с частотой $f = 18 \dots 22$ кГц. При этом также в процессе эксперимента варьировалась величина амплитуды ультразвуковых колебаний. Для сопоставления результатов исследования проводилось также нарезание резьб без сообщения инструменту ультразвуковых колебаний.

Кроме специально разработанных ультразвуковых устройств были также предложены новые способы нарезания внутренних (а.с. № 1784419) и наружных резьб (патент № 2404031).

Обычно нарезание резьбы с наложением на метчик ультразвуковых колебаний осуществляют двумя способами. В первом случае в процессе обработки ультразвуковые колебания не отключаются при обратном ходе метчика. Это приводит к лишним энергетическим затратам, нагреванию ультразвукового преобразователя, и кроме того, при вывинчивании метчика, колеблющегося с ультразвуковой частотой, может ухудшаться шероховатость рабочего профиля резьбы, особенно первых трех витков, так как по времени они больше всего подвержены воздействию ультразвуковых колебаний метчика. Во втором, наиболее часто используемом случае, ультразвуковые колебания отключают после рабочего хода метчика, т.е. при вывинчивании из отверстия.

При обработке сквозных отверстий данный способ дает хорошие результаты. Однако, при обработке глухих отверстий происходят сколы зубьев метчика. Преждевременный выход метчика из строя связан со срезанием зубьями метчика корней стружек, образованных последующими зубьями при рабочем ходе. Разрушение зубьев метчика также приводит к снижению качества резьбы.

Для исключения преждевременного выхода метчиков из строя и повышения качества резьбы при нарезании ее в глухих отверстиях был предложен новый способ.

Для этого при нарезании резьбы метчиком в глухом отверстии, при его вывинчивании колебания отключают, после поворота метчика на угол α , находящийся в диапазоне $360^\circ/z < \alpha < 360^\circ$, где z – число перьев метчика.

На представленной схеме (рисунок 5.7) Изображен блок управления 1, связанный с ультразвуковым генератором (УЗГ) 2 и пьезокерамическим преобразователем электрической энергии ультразвуковых колебаний в механическую 3.

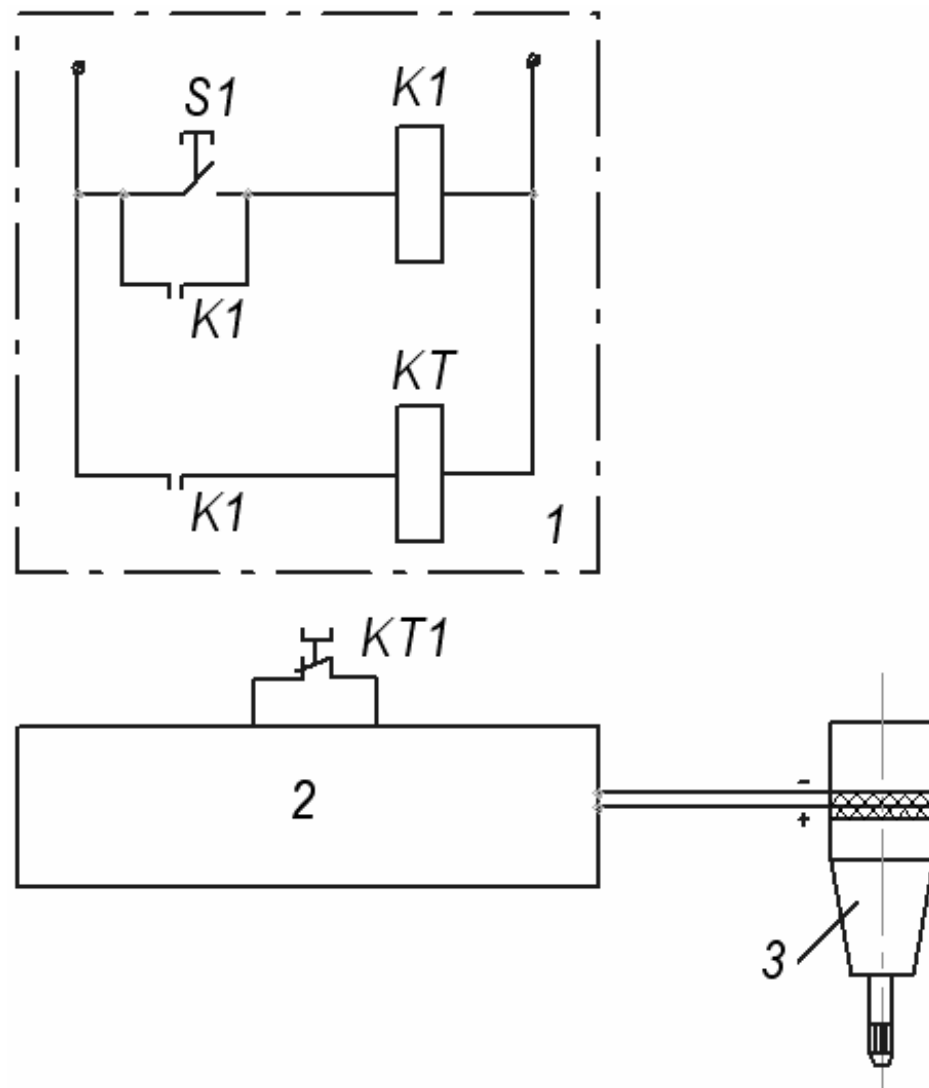


Рисунок 5.7 - Схема установки для реализации предложенного способа нарезания резьбы в глухих отверстиях

Предложенный способ реализуется следующим образом. Метчику со-

общают ультразвуковые колебания от ультразвукового генератора 2. При достижении метчиком заданной глубины обработки срабатывает выключатель $S1$. В этот момент включается реверс станка и метчику задают обратное вращение. При срабатывании выключателя $S1$ включается реле $K1$, которое включает реле времени KT . Через заданный интервал времени, установленный в цепи высокого напряжения ультразвукового генератора 2 реле времени $KT1$ отключает высокое напряжение, подаваемое на пьезокерамический преобразователь 3. Далее холостой ход - вывинчивание метчика осуществляют без наложения на него ультразвуковых колебаний. Зная количество оборотов метчика можно определить время, необходимое для поворота метчика на угол α . Например, для метчика с числом перьев $z = 3$ при $n = 45 \text{ об./мин}$ для поворота метчика на угол $\alpha = 360^\circ/z$ потребуется 0,44 секунды.

Важно, чтобы ультразвуковые колебания не отключились до момента срезания корней стружек метчиком, поэтому время отключения можно увеличить до поворота метчика на угол $\alpha = 360^\circ$, т.е. на один оборот.

Таким образом, применение предложенного способа нарезания резьбы с вынужденными ультразвуковыми колебаниями в глухих отверстиях позволяет практически исключить выкрашивание режущих кромок метчика, повысить его стойкость и качество нарезаемых резьб.

Также предложен новый способ ультразвукового нарезания наружных резьб для повышения работоспособности резьбовых деталей путём оптимизации параметров ультразвукового воздействия (патент РФ № 2404031).

Предложенный способ позволяет повысить работоспособность обрабатываемых заготовок за счёт технологического обеспечения в поверхностном слое профиля резьбы значительных сжимающих остаточных напряжений. Особенно важным является то, что напряжения сжатия формируются в концентраторе напряжений (во впадине резьбы), обеспечивая тем самым повышение предела выносливости резьбовой детали при её работе с переменными нагрузками.

Для частичной автоматизации процесса нарезания резьбы была разработана специальная установка, состоящая из станка 2Н125, ультразвукового генератора, ультразвукового устройства и пульта управления (рисунок 5.8).

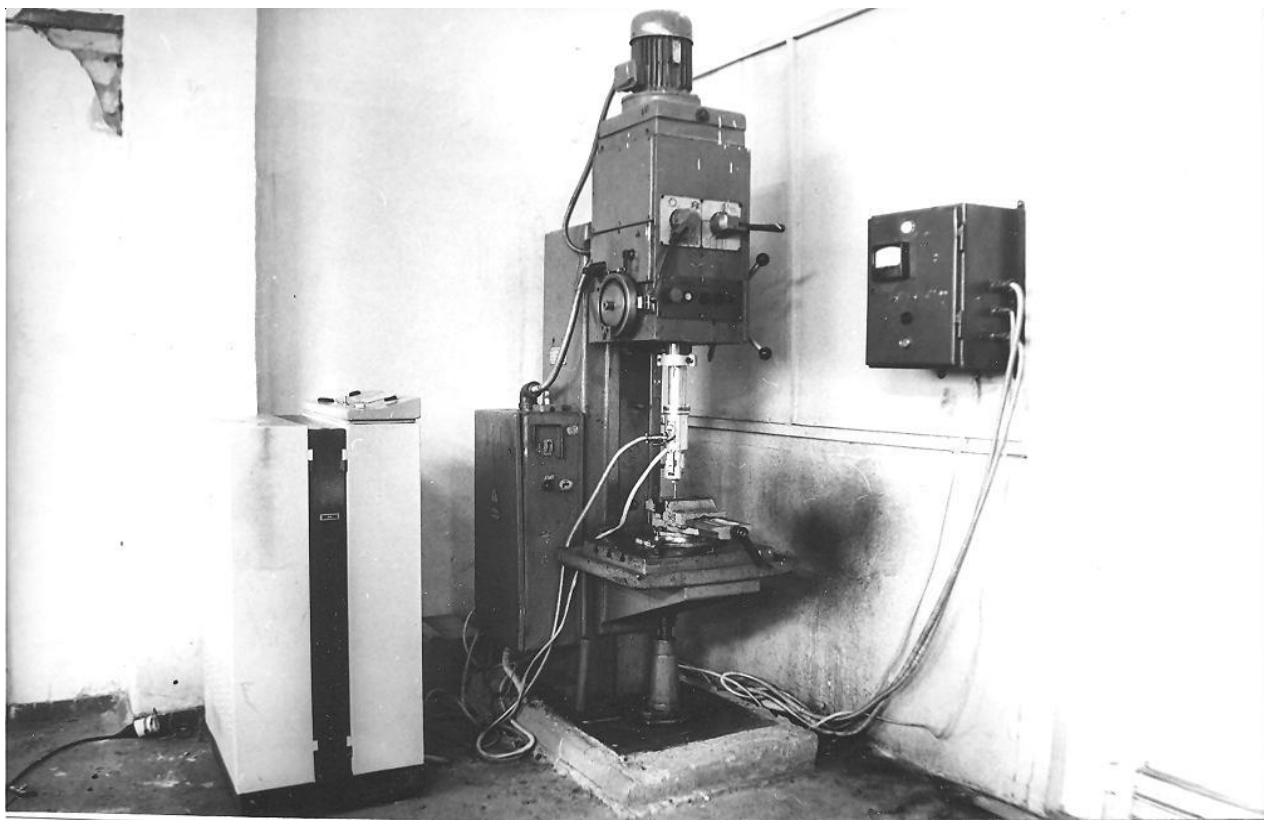


Рисунок 5.8 - Ультразвуковая установка для нарезания резьб М2 - М6

Нарезание резьбы осуществляется следующим образом. К установленной и закреплённой детали подводится ультразвуковое устройство, а затем при нажатии кнопки «Пуск» на пульте управления осуществляется вращение шпинделя станка и подаются электрические сигналы от ультразвукового генератора на ультразвуковое устройство. Далее процесс нарезания резьбы осуществляется в автономном режиме.

Применение ультразвуковых колебаний при нарезании внутренних и наружных резьб позволило:

- повысить производительность в 2 - 4 раза;
- увеличить предел выносливости наружных резьб за счёт сжимающих

остаточных напряжений;

- улучшить качество поверхности резьбы;
- повысить стойкость резьбообразующего инструмента в 3 - 5 раз.

Нарезание внутренних резьб метчиками и наружных резьб круглыми плашками рекомендуется осуществлять при следующих режимах: резонансная частота ультразвуковых колебаний $f_r = 18-22$ кГц (зависит от конструкции применяемого ультразвукового резьбонарезного устройства), амплитуда колебания $\xi = 5$ мкм, $V = 0,6 - 1,5$ м/мин, (подача обеспечивается конструкцией ультразвукового резьбонарезного устройства и совпадает с шагом нарезаемой резьбы), технологическая среда – сульфофрезол (возможно применение других технологических сред). Нарезание наружных резьб резцом с пластиной из твёрдого сплава ВК8 осуществлялось на токарном станке. При этом подача задавалась равной шагу нарезаемой резьбы. Нарезание резьбы осуществлялось в несколько переходов, при этом для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя на завершающем этапе толщина срезаемого слоя равна 0,2 мм. При нарезании резьбы резцом использовались тангенциальные или радиальные ультразвуковые колебания.

При этом для повышения работоспособность резьбовых деталей необходимо применять радиальные колебания, а для повышения работоспособности инструмента – тангенциальные (ультразвуковые параметры обработки: амплитуда колебания $\xi = 5$ мкм, скорость резания $V = 0,8 - 1,2$ м/мин). Так, например, нарезание резьбы М6 в титановом сплаве ВТ16 осуществлялось при следующих режимах: $f_r = 19760$ Гц, амплитуда колебания $\xi = 5$ мкм, скорость резания $V = 1$ м/мин, $t_1 = 0,34$ мм, $t_2 = 0,2$ мм, $S = 1$ мм/об.

В приложении диссертации представлены акты внедрения полученных результатов в ООО ПК «Продмаш», в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность СамГТУ.

Выводы по главе

1. Предложены новые (на уровне изобретений) способы (а.с. № 1784419, патент № 2404031) и специальные малогабаритные ультразвуковые устройства (а.с. № 1713764, № 177500), учитывающие особенности нарезания внутренних и наружных резьб и позволяющие повысить производительность обработки, период стойкости инструмента и качество поверхностного слоя.

2. Разработан комплекс конструкторско-технологических решений, позволяющий реализовать принципиально новый подход к планированию технологических воздействий ультразвуковых колебаний, выбору режимов и условий нарезания резьбы, заключающийся в обеспечении повышенного уровня эксплуатационных свойств резьбовых деталей за счёт управления процессом формирования остаточных напряжений в поверхностном слое.

3. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по эффективному использованию энергии ультразвуковых колебаний при нарезании внутренних и наружных резьб в заготовках из труднообрабатываемых материалов. Опытнo-промышленная проверка ультразвукового способа нарезания резьбы была проведена в ОАО «Волгабурмаш». Результаты работы внедрены в учебный процесс и научную деятельность ФГБОУ ВПО «СамГТУ», а также в ООО ПК «Продмаш».

Основные выводы по работе

По результатам проведённых исследований сделаны следующие выводы:

1. В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая проблема по повышению эффективности обработки и качества поверхностного слоя при нарезании резьбы с ультразвуковыми колебаниями в заготовках из труднообрабатываемых материалов: титановых и никелевых сплавов, высокопрочных и нержавеющей сталей.
2. Раскрыт и математически описан механизм влияния ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы, являющихся концентраторами напряжений. Установлены условия интенсификации процесса образования остаточных напряжений сжатия путём воздействия различными по направлению ультразвуковыми колебаниями и получены аналитические зависимости расчёта напряжённо-деформированного состояния во впадинах резьбы.
3. Для установления напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя во впадинах резьбы, разработана методика экспериментального определения осевых остаточных напряжений.
4. На основе анализа процесса нарезания резьбы разработана феноменологическая модель, позволяющая определить влияние крутящего момента резания при обработке с ультразвуковыми колебаниями на формирование остаточных напряжений в тангенциальном и осевом направлениях.
5. Проведены экспериментальные исследования влияния режимов и направления ультразвуковых колебаний при обработке резьбовой поверхности заготовок из труднообрабатываемых материалов и показана эффективность воздействия ультразвукового поля на остаточные напряжения, деформационное упрочнение, шероховатость обработанной поверхности и точность резьбового профиля. Установлено, что при обработке радиальными или осевыми

ультразвуковыми колебаниями в поверхностном слое происходит увеличение остаточных сжимающих напряжений в 1,5 – 2 раза и деформационного упрочнения на 20 – 30%. Применение тангенциальных ультразвуковых колебаний приводит к уменьшению сжимающих остаточных напряжений и деформационного упрочнения, снижению шероховатости резьбовой поверхности, повышению точности обработки.

6. Показана и обоснована эффективность ультразвуковой интенсификации процесса нарезания резьбы в труднообрабатываемых материалах. Установлено, что использование ультразвуковых колебательных воздействий при нарезании внутренних резьб метчиками уменьшает крутящий момент резания в 1,3 – 1,8 раз и повышает работоспособность инструмента в 3 – 5 раз.

7. Установлена аналитическая взаимосвязь остаточных напряжений, сформированных во впадинах резьбы с амплитудными напряжениями, возникающими при эксплуатации резьбовых деталей, позволяющая выбрать оптимальный вариант обработки, при котором предельная амплитуда цикла напряжений резьбовых деталей повышается в 1,3 – 1,8 раз.

8. Созданы методики количественной оценки уровня остаточных напряжений, позволяющие разработать новые конструкции ультразвуковых резьбонарезных устройств. Предложены новые (на уровне изобретений) способы (а.с. № 1784419, патент № 2404031) и специальные малогабаритные ультразвуковые устройства (а.с. № 1713764, № 177500), учитывающие особенности нарезания внутренних и наружных резьб и позволяющие повысить производительность обработки, период стойкости инструмента и качество поверхностного слоя.

9. Разработан комплекс конструкторско-технологических решений, позволяющий реализовать принципиально новый подход к планированию технологических воздействий ультразвуковых колебаний, выбору режимов и условий нарезания резьбы, заключающийся в обеспечении повышенного уровня

эксплуатационных свойств резьбовых деталей за счёт управления процессом формирования остаточных напряжений в поверхностном слое.

10. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по эффективному использованию энергии ультразвуковых колебаний при нарезании внутренних и наружных резьб в заготовках из труднообрабатываемых материалов. Опытнo-промышленная проверка ультразвукового способа нарезания резьбы была проведена в ОАО «Волгабурмаш». Результаты работы внедрены в учебный процесс и научную деятельность ФГБОУ ВПО «СамГТУ», а также в ООО ПК «Продмаш».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, О.В. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / О.В. Абрамов, И.Г. Хорбенко, Ш. Швегла; под ред. О.В. Абрамова. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Абрамов, В.О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении: монография [текст] / В. О. Абрамов [и др.]. - М.: Янус-К, 2006 (Люберцы (Моск.обл.)) – 687 с.
3. Агапов, С.И. Определение оптимальной амплитуды ультразвуковых колебаний при обработке труднообрабатываемых поверхностей [текст] / С.И. Агапов, А.С. Ананьев, О.Г. Лукша, Д.Е. Парецкий // Прогрессивные технологии в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1999. – Вып. 2. – С. 5-9.
4. Агапов, С.И. Определение деформационного упрочнения при ультразвуковом развертывании [текст] / С.И. Агапов, О.Г. Лукша // Прогрессивные методы и технологии получения и обработки конструкционных материалов и покрытий: Тез. докл. междунар. традиц. науч.-техн. конф. / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 1999. – С. 34-36.
5. Агапов, С.И. Повышение стойкости инструмента при ультразвуковой обработке деталей [текст] / С.И. Агапов, Д.Е. Парецкий, Н.А. Федянова // Машиностроитель. – 2003. – №5. – С. 36-37.
6. Агапов, С.И. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука [текст] / С.И. Агапов, В.В. Головкин // Самара: «Изд-во СНЦ», 2010. – 134 с.
7. Агапов, С.И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука / С.И. Агапов, Ю.И. Сидякин. - Волгоград: ВолгГТУ, 2010. - 148 с.
8. Агранат, Б.А. Ультразвуковая технология [текст] / Б.А. Агранат, В.И. Баширов, Ю.И. Китайгородский - М.: Машиностроение, 1974. – 564 с.

9. Амитан, Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки [Электронный ресурс]: Подгот. по печ. изд. 1988 г. / Г.А. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под ред. В.А. Волосатова. - Электр. дан. и прогр. - Самара, [2005]. - 1 электр. опт. диск (CD-ROM).

10. Асташев, В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания / В.К. Асташев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1992. - №3. - С.81-86.

11. Асташев, В.К. Свойства поверхностных слоев, наноструктурированных в результате авторезонансного ультразвукового течения / В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, В.Н. Перевезенцев, Л.В. Колик, Н.А. Андрианов // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2011. - № 5. - С.68-72.

12. А.с. 1713764 СССР, МКИ5 В 23 G 1/46. Патрон для нарезания резьбы метчиком / Веретенников В.Е., Нерубай М.С., Фролов А.А., Манченко А.Я., Ягунов М.А., Турков А. Г. В.В. Головкин (СССР). – № 4713227; заявл. 29.05.89; опубл. 23.02.92, Бюл. № 7. – 3 с. : ил.

13. А.с. 1773500 СССР, МКИ5 В 06 В 3/00. Устройство для ультразвуковой обработки материалов / А.В. Макаров, В.В. Головкин (СССР). – № 4807748/10; заявл. 02.04.90; опубл. 07.11.92, Бюл. № 41. – 2 с. : ил.

14. А.с. 1784419 СССР, МКИ5 В 23 G 5/06. Способ нарезания резьбы метчиком / Нерубай М.С., Турков А. Г., Емельянов В.В., В.В. Головкин (СССР). – № 4733429/08; заявл. 29.08.89; опубл. 30.12.92, Бюл. № 48. – 2 с. : ил.

15. Базаров, Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов [текст] / Б.М. Базаров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

16. Бекренев Н.В. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров, Д.В. Трофимов. - Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. - 208 с.

17. Бекренев Н.В. Влияние частоты и направления ультразвуковых колебаний на эффективность сверления труднообрабатываемых материалов / Н.В. Бекренев, А.П. Петровский // Вестник СГТУ, - № 1 (52), 2011.- С. 36-40.

18. Безнедельный, А.И. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А.И. Безнедельный, В.Б. Асанов, В.П. Гилета // Обработка металлов. - 2012. - № 4. - С.19-22. Березин, С.Я. Ультразвук в процессах резбообразования и сборки [текст] / С.Я. Березин. - Чита: ЧитГУ, 2009. - 166 с.

19. Березин, С.Я. Влияние ультразвука на технологические параметры сборки соединений с крепежно-резбообразующими деталями / С.Я. Березин, И.М. Кулеш // Сборка в машиностр., приборостр. - 2011. - № 7. - С. 15-20.

20. Биргер, И.А. Резьбовые соединения [текст] / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.

21. Бишутин, С.Г. Инженерия поверхностей деталей машин, подвергаемых механической обработке / С.Г. Бишутин, О.Н. Федонин // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. - 2007. - N 1. - С.7-12.

22. Боровин, Ю.М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Боровин Ю.М. – М., 2005. – 20 с.

23. Бражников, Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов: монография [текст] / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, А. И. Бражников. - М.: Теплотехник, 2008. – 255 с.

24. Браславец, А.В. Интенсификация процесса пластического деформирования металлов за счет наложения ультразвуковых колебаний [текст] / А.В. Браславец, Н.Ф. Савченко // Тезисы докладов конференции «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». - Харьков: ХПИ. - 1990. - С.11.

25. Бржозовский, Б.М. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов: учеб. пособие [текст] / Б.М. Бржозовский [и др.]. - Саратов: СГТУ, 2006 (Саратов). - 207 с.

26. Васильков, Д.В. Обеспечение стабильности качества поверхностного слоя изделий при механической обработке на основе алгоритмов автоматизированного проектирования / Д.В. Васильков, А.Г. Ташевский, А.А. Лыченков // Металлообработка. - 2007. - № 6. - С.8-11, 50.

27. Вероман, В.Ю. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / В.Ю. Вероман, А.Б. Аренков. – М.: Машиностроение, 1971. – 167 с.

28. Виноградова, Н.В. Определение параметров качества поверхностного слоя деталей после механической обработки с учетом дислокационных и структурно-фазовых превращений: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.02.08 / Н.В.Виноградова; [Место защиты: Рыбин. гос. авиац.-технол. акад.]. - Рыбинск, 2011. - 16 с.

29. Волосатов, В.А. Ультразвуковая обработка [текст] / В.А. Волосатов. – Л.: Лениздат, 1973. – 248 с.

30. Гаврилова, Т.М. Взаимосвязь скорости деформации и структуры поверхностного слоя при ультразвуковом упрочнении / Т.М. Гаврилова, В.Ф. Пегашкин // Технология машиностроения.- 2010. - № 10. - С.39-43.

31. Ганиев, М.М. Влияние ультразвуковой виброударной механической обработки на геометрические характеристики поверхности / М.М. Ганиев, И.К. Вагапов, А.С. Шинкарев //Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. - 2012. – № 1. - С.49-52.

32. Гельфанд, М.Л. Сборка резьбовых соединений [текст] / М.Л. Гельфанд, Я.И. Ципенюк, О.К. Кузнецов. - М.: Машиностроение, 1978. - 108 с.

33. Головкин, В.В. Повышение эффективности нарезания резьб в деталях автомобилей путём применения ультразвука [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // VIII Российская науч.-практ. конф. «Прогрессивные технологии в транспортных системах» [труды]. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т., 2007. – С.91-94.

34. Головкин, В.В. Применение ультразвуковых технологии в автомобилестроении [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Региональная научно-техническая конференция «Автопром в России: стратегия развития сборочных заводов. Конкурентоспособность российских компонентов» [труды]. – Тольятти, 2007. – С. 141.

35. Головкин, В.В. Повышение работоспособности метчиков путём применения ультразвука при нарезании резьб в глухих отверстиях [текст] / В.В. Головкин // Известия Волг. гос. техн. ун-та, межвуз. сб. науч. статей. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2007. - №3- №4 (30). - С. 18-20.

36. Головкин, В.В. Технологическое обеспечение качества резьбовых деталей путем применения ультразвука [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // 6 междунар. науч.-техн. конференция «Проблема качества машин и их конкурентоспособность» [материалы]. – Брянск: БГТУ, 2008. – С. 289-290.

37. Головкин, В.В. Определение напряжённно-деформированного поверхностного слоя при нарезании резьб малого диаметра с учетом влияния ультразвука [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Пятая Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» [труды]. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т., 2008. - С. 107-111.

38. Головкин, В.В. Нарезание резьб с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Машиностроительные технологии». - М.: МГТУ им. Баумана, 2009. - С.37-39.

39. Головкин, В.В. Исследования остаточных напряжений при ультразвуковом резьбонарезании [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Известия Волг. гос. техн. ун-та. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - 2008. - №9 (47) (Вып. №4). - С. 13-15.

40. Головкин, В.В. Оптимизация технологических параметров при ультразвуковом резбонарезании [текст] / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2009. - №1 (23). – С. 111-119.

41. Головкин, В.В. Анализ напряжённо-деформированного состояния в упрочненном слое при нарезании резьб с использованием ультразвуковой обработки [текст] / В.В. Головкин, Смыслов В.А., О.В. Ромашкина, А.А. Агафонов [текст] // Шестая Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». - Самара: Самар. гос. тех. ун-т., 2009. - С. 82-89.

42. Головкин, В.В. Исследование работоспособности метчиков при нарезании резьб с применением ультразвуковых колебаний [текст] // В.В. Головкин, В.Н. Трусов // Вестник Самарского госуд. аэрокосм. универ-та. – 2009. - №2(38). – С. 30-35.

43. Головкин, В.В. Формирование поверхностного слоя при ультразвуковом резбонарезании / В.В. Головкин, О.В. Ромашкина // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. Сер. Машиностроение. – Вып. 16. - 2010. - № 29 (205). – С. 71-75.

44. Головкин, В.В. Исследование влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на крутящий момент при нарезании резьбы метчиком [текст] / В.В. Головкин, М.В. Дружинина, В.Н. Трусов // Известия Волг. гос. техн. ун-та, межвуз. сб. науч. ст. №13(86), Волг. гос. техн. ун-та, 2011, (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении, Вып.№7). - С.108-110.

45. Головкин, В.В. Модернизация настольно-сверлильного станка для нарезания резьб с применением ультразвука [текст] / В.В. Головкин, Ю.П. Бурочкин, М.В. Дружинина // Известия тульского гос. ун-та. Технические науки. - Вып. 4. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - С.3-9.

46. Головкин, В.В. Нарезание резьбы метчиками в глухих отверстиях деталей из труднообрабатываемый материалов с применением ультразвуковых колебаний [текст] / В.В. Головкин, М.В. Дружинина // Известия тульского гос. ун-та. Технические науки. - Вып. 6.- Ч.1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 57-64.

47. Головкин, В.В. Управление технологическими параметрами процесса нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями в целях повышения эксплуатационных характеристик резьбовых деталей / В.В. Головкин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014 г. - № 6. – С. 30-34.

48. Голямина, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина [и др.]; отв. ред. И.П. Голямина. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с., илл.

49. Горбунов, А.А. Нарезание резьбы с воздействием ультразвука [текст] / А.А. Горбунов // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1974. - №4. - С.8-12.

50. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин [текст] / А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 1975. - 233 с.

51. Дальский, А.М. Достижения и перспективы в управлении качеством поверхностного слоя / А.М. Дальский // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. - 2004. - N 1. - С.15-19.

52. Добрынин, С.А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник [текст] / С.А. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

53. Допеков, А.В. Ультразвуковые электротехнические установки [текст] / А.В. Допеков, О.К. Келлер, Г.С. Кротин. – Л.: Энергоиздат, 1982 – 268 с.

54. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации [текст] / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. - М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.

55. Джагунов, Р.Г. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике [текст] / Р.Г. Джагунов, А.А. Ерофеев. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

56. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия [текст] / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

57. Дьяков, И.Ф. Ультразвуковое упрочнение поверхностей деталей машин [текст] / И.Ф. Дьяков // Автоматизация и современные технологии. - 2012. - № 8. - С. 35-39.

58. Дунин, Н.А. Влияние поверхностного слоя деталей на эксплуатационные свойства изделий: учебное пособие / Н.А. Дунин. - Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2006. - 114 с.

59. Еренков, О.Ю. Совершенствование технологии механической обработки заготовок из полимерных материалов / О.Ю. Еренков, А.Г. Ивахненко // Физ. и химия обраб. матер. - 2007. - № 1. - С.88-93.

60. Жерпеков, В.С. Влияние остаточных напряжений во впадине резьбы болтов на попытку разрушения резьбовых соединений [текст] / В.С. Жерпеков, В.А. Севенко, И.Н. Будилов // Вестник машиностроения. – 1990. - №6. - С.20-25.

61. Зубова, Т.Б. Влияние свойств поверхностного слоя на усталостную прочность сложнофасонных деталей ГТД после их механической обработки в условиях нестационарности процесса / Т.Б. Зубова // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. научных трудов. / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. - Уфа: Гилем, 2004. - С.212-226.

62. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Коновалов Г.В., Минин Б.В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. – М.: МАП Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1992. – 192 с.

63. Казакевич, Г.С. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности [текст] / Г.С. Казакевич, А.И. Рудской. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 264 с.

64. Казанцев, В.Ф. Расчет колебательных систем ультразвуковых станков [текст] / В.Ф. Казанцев // Электрохимические и электрофизические методы обработки. – 1974. - № 8. - С. 1-4.

65. Качество поверхностного слоя деталей машин. Технология. Качество. Метрология. Стандартизация: КПС-2003: сб. докладов Международной научно-

практической конференции, Санкт-Петербург, 24-26 июня, 2003. - СПб: Изд-во С.-Петербург. ин-та машиностр. (ЛМЗ-ВТУЗ), 2003. - 185 с.

66. Киселев, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учеб. пособие [текст] / Е.С. Киселев. - Ульяновск: УлГТУ, 2003. - 186 с.

67. Киселев, Е.С. Эффективность глубокого сверления маломерных отверстий с использованием УЗ-поля [текст] / Е. С. Киселев, М. В. Табеев // Вестник УлГТУ. - 2004. - № 3. - С. 32-34.

68. Клубович, В.В. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / В.В. Клубович, А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1981. – 295 с.

69. Коршунов, В.Я. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей на основе прогнозирования рациональных структурно-энергетических параметров материала и технологических условий механической обработки: дис... доктора технических наук : 05.02.08, 05.03.01. -Зерноград, 2006. - 325 с.

70. Кравченко, Б.А. Физические аспекты теории процесса резания металлов [текст] / Б.А. Кравченко, А.Б. Кравченко. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2002. – 167 с.

71. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке [текст] / Б.Д. Кравченко. - Куйбышев, 1981. - 90 с.

72. Кравченко, Б.А. Исследование эффективности ультразвуковых колебаний при нарезании мелких резьб в труднообрабатываемых материалах [текст] / Б.А. Кравченко, М.С. Нерубай, А.Г. Турков // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – С. 62-66.

73. Кривоухов, В.А. Обработка резанием титановых сплавов [текст] / В.А. Кривоухов, Чубаров А.Д. - М.: Машиностроение, 1970. - 183 с.

74. Криони, Н.К. Экспертная оценка параметров качества поверхностного слоя после механической обработки деталей ГТД / Н.К. Криони, А.А. Мингажева, Н.А. Соколова // Вестник РГАТА. - 2012. - N 2. - С. 295-297.

75. Кувшинов, М.С. Высокопроизводительная обработка тонких резьб в изделиях с переменными физико-механическими свойствами материала [текст] / М.С. Кувшинов // Известия вузов. М.: Машиностроение 1989 с.114-117.

76. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [текст] / П.И. Кудрявцев.- М.: Машиностроение, 1982. - 171 с.

77. Кумабэ, Д. Вибрационное резание [текст] / Д. Кумабэ. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

78. Лесюк, Е.А. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности / Е.А. Лесюк, В.П. Алехин, Сик Ким Чанг // Вестник машиностроения. - 2008. - № 9. - С.52-55.

79. Лотков, А.И. Возможности формирования ультразвуковыми технологиями наноструктурного состояния на поверхности конструкционных и функциональных материалов [текст] / А.И. Лотков // Известия Академии Промышленной Экологии. - 2006. - № 3. - С. 33 .

80. Любимов, А.А. Оптимизация технологических процессов ультразвуковой механической обработки материалов с учетом экологического фактора [текст] / А.А. Любимов // Безопасность жизнедеятельности. - 2007. – № 1. - С. 24-25 .

81. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания [текст] /А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.

82. Макаров, В.Ф. Оценка напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке деталей ГТД / В.Ф. Макаров, А.Х. Половинкин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 5. - С.49-52.

83. Макаров, В.Ф. Обработка валов газотурбинных двигателей методом БУФО/ /В.Ф. Макаров, В.С. Гребенев // Механика ударно-волновых процессов в технологических системах: сб. науч. трудов Международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 9-12 окт., 2012. - Ростов н/Д, 2012. -С.51-71.

84. Макаров, В.Ф. Ультразвуковая финишная обработка опорных шеек валов газотурбинных двигателей / В.Ф. Макаров, В.С. Гребенев // Тезисы

5 Международной научно-практической конференции "Инженерные системы-2012", Москва, 16-18 апр. 2012. - М. - 2012. - С.68-69.

85. Марков, А.И. Ультразвуковая интенсификация процессов лезвийной и упрочняюще-чистовой механической обработки металлов и сплавов [текст] / А.И. Марков // Научно-техническая конференция «Ультразвуковые технологические процессы – 98». Сборник докладов. – М: 1998. – С. 155-158.

86. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов [текст] / А.И. Марков. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с.

87. Марков, А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов [текст] / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1968. – 365 с.

88. Марков, А.И. Резание труднообрабатываемых материалов при помощи звуковых и ультразвуковых колебаний [текст] / А.И. Марков. – М.: Машгиз, 1962. – 332 с.

89. Матвеев, В.В. Нарезание точных резьб [текст] / В.В. Матвеев. - М.: Машиностроение, 1978. – 85 с.

90. Мезенцева, Е.В. Исследование влияния режимов и видов механической обработки деталей на структуру и свойства конструкционных сталей / Е.В. Мезенцева, А.С. Селиванов, Д.Л. Мерсон // Физическое материаловедение: 4 Международная школа, Тольятти, 14-18 сент., 2009: сб. трудов. - Тольятти: ТГУ, 2009. - С.108-110.

91. Нерубай, М.С. Физико-механические методы обработки металлов: Учебное пособие [текст] / М.С. Нерубай.– Куйбышев: КПТИ, 1979. - 91 с.

92. Нерубай, М.С. Влияние ультразвуковых колебаний на механические свойства труднообрабатываемых материалов [текст] / М.С. Нерубай // Металловедение и термическая обработка материалов. - 1987. - № 4. - С. 10-13.

93. Нерубай, М.С. Повышение эффективности механической обработки труднообрабатываемых материалов путем применения ультразвука: дис. ... докт. техн. наук.: 05.02.08 и 05.03.01 защищена 22.12.89:15.03.90./ Нерубай Марк Семенович. - Куйбышев, 1989. – 430 с.

94. Нерубай, М.С. Ультразвуковая механическая обработка и сборка [текст] / М.С. Нерубай, В.В. Калашников, Б.Л. Штриков. – Самара: Кн. Изд-во, 1995. – 191 с.

95. Нерубай, М.С. Физико-химические методы обработки и сборки: Учеб. пособие [текст] / М.С. Нерубай, В.В. Калашников, Б.Л. Штриков, С.И. Ярьско. - М.: Машиностроение-1, 2005.

96. Нерубай, М.С. Эффективность применения ультразвука при механической обработке, упрочнении и сборке [текст] / М.С. Нерубай, Н.Д. Папшева, Б.Л. Штриков // Современные проблемы автоматизированного производства. – Самара: СамГТУ, 1998. – С. 133-137.

97. Никитин, Е.А. Нарезание резьбы с наложением ультразвука [текст] / Е.А. Никитин, Г.С. Трезубов // Станки и инструмент. – 1989. - №4. - С. 30-32.

98. Никитин, Ю.В. Формирование поверхностного слоя на деталях из серого чугуна обработкой на основе ультразвукового пластического деформирования и плазменного нагрева: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01, 05.02.08 / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2002. - 19 с.

99. Николаев, В.А. Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов [текст] / В.А. Николаев, Б.Л. Штриков, С.Д. Шапошников. – Куйбышев: КуАИ, 1985. - С. 12-19.

100. Обловацкая, Н.С. Повышение качества поверхностного слоя изделий из низкоуглеродистых легированных сталей методом ультразвуковой финишной обработки: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.03.01. [текст] / Обловацкая Наталья Сергеевна. - М., 2007. - 17 с .

101. Павленко, Д.В. Формирование характеристик поверхностного слоя лопаток центробежного колеса компрессора при механической обработке / Д.В. Павленко, Э.В. Кондратюк, В.К. Яценко, М.А. Гребенников, С.Д. Зиличихис // Вісн. Двигунобудування. - 2003. - № 1. - С.125-133.

102. Павленко, Д.В. Формирование характеристик поверхностного слоя деталей из сплава ЭК79-ИД при деформационном упрочнении / Д.В. Павленко,

Э.В. Кондратюк, А.Я. Мовшович // Вісн. Двигунобудування. - 2004. - №1. - С.132-138.

103. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений: монография [текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.Б.Иванов. - Самара: «Изд-во СНЦ», 2008. – 64 с.

104. Павлов, В.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости резьбовых деталей из сталей 30ХГСА и 40Х / В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, Г.Ф. Мальков / Известия вузов. Машиностроение. - 1990. - №3. - С. 15-20.

105. Павлов, В.Ф. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами по распределению остаточных напряжений / В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, О.В. Каранаева // В сб.: Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1 / Математическое моделирование и краевые задачи. - Самара: СамГТУ, 2010. - С. 249-252.

106. Пановко, Я.Г. Введение в теорию механических колебаний: учеб. пособие [текст] / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1980. – 272 с.

107. Пат. 2127658 Россия, МПК⁶ В24 В 1/04 Способ безабразивной ультразвуковой финишной обработки поверхности / Г.А. Головлев, Д.Е. Максимов и др. - №98107760 / 0.2; Заявл. 29.4.98; Оpubл. 20.03.99, Бюл. №8. – 3 с.

108. Пат. 2131794 Россия, МПК 6 В23 В 37/00 Способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки [текст] / Хмелев В.Н., Баранов Р.В. и др.; заявитель и патентообладатель Бийский Технологический институт Алтайского Технического университета. - №98105730/02; Заявл. 26.3.98; опубл. 20.6.93, Бюл. №17 – 3 с.

109. Пат. 2124430 Россия, МПК⁶ В24 В 35/00 Устройство для ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки поверхностей [текст] / Холопов Ю.В. - №98100977/02, Заявл. 20.1.98; Оpubл. 10.1.99, Бюл. №1. – 3 с.

110. Пат. 2234398 Россия, МПК 7 В 23 G 1/16. Устройство для нарезания внутренних резьб с помощью ультразвука /Дампилон В. Г., Соболевский А. М., Парсаев С. А., Филиппков О. И., Цыганков Н. Г.; ОАО "Череповецк. сталепрокат. з-д". N 2003108481/02; Заявл. 26.03.2003; Оpubл. 20.08.2004.

111. Пат. 2252843 Россия, МПК⁷ В23 G 1/16. Способ нарезания внутренних резьб осевым инструментом с наложением ультразвуковых колебаний [текст] / Киселев Е.С., Горностаев В.В.; заявитель и патентообладатель Ульяновский ГТУ. - № 2003101324/02; заявл. 16.01.2004; опубл. 27.05.2005. – Бюл. № 15. – 4 с.

112. Пат. 2290282 Россия, МПК В23G 1/16 (2006.01), В23G 1/44 (2006.01). Устройство для наложения ультразвуковых колебаний на заготовку при резьбонарезании [текст] / Киселев Е.С., Унянин А.Н., Табеев М.В.; заявитель и патентообладатель Ульяновский ГТУ. N 2005112107/02; Заявл. 22.04.2005; Оpubл. 27.12.2006.

113. Пат. 2404031 Российская Федерация, МПК В23G1/02, В23G9/00 Способ нарезания резьбы / Головкин В.В., Ромашкина О.В., Шуваев В.Г., Шуваев И.В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО СамГТУ. – № 2008124066/02; заявл. 11.06.2008; опубл. 20.11.2010. - Бюл. №32. – 5 с.

114. Петрушко, И.В. Оборудование для ультразвуковой обработки: Монография [текст] / И.В. Петрушко. - СПб.: Андреевский издат. дом, 2005. - 166 с

115. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки [текст] / В.Н. Подураев. - М.: Машиностроение, 1985. - 264 с.

116. Поздеев, А.А. Остаточные напряжения (теория и приложения) / А.А. Поздеев, С.И. Няшин, П.В. Трусков - М.: Наука, 1982. -109 с.

117. Пономарев, В.П. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин [текст] / В.П. Пономарев, А.С. Батов, А.В. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.

118. Промптов, А.И. Технологические остаточные напряжения / А.И. Промптов. - Иркутск: ИЛИ, 1980. - 220 с.

119. Промптов, А.И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке / А.И. Промптов // Вестник ИрГТУ. - 2005. - N 2. - С.98-101, 194.

120. Путятин, Л.И. Влияние комплексной механической обработки на качество поверхностного слоя чугуновых деталей / Л.И. Путятин, В.П. Тарабанова, Н.А. Лазарова, А.А. Ляпин // Вісн. Кременчуц. держ. Ун-ту. - 2011. - N4. - С.75-77.

121. Радченко, В.П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях [текст] / В.П. Радченко, М.Н. Саушкин. - М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с. – ISBN 5-94275-244-3.

122. Радченко, В.П. Определение параметра анизотропии упрочнения и остаточных напряжений в цилиндрическом образце из стали после обкатки роликом / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов, М.Н. Саушкин // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2011. - №4. – С.93 – 100.

123. Радченко, В.П. Феноменологический метод расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце / В.П. Радченко, М.Н. Саушкин // Прикладная математика и механика. – Т.77. – 2013. - №1. – С.142 - 152.

124. Рахимьянов, Х.М. Роль ультразвукового пластического деформирования в формировании структуры поверхностного слоя при комбинированной обработке / Х.М. Рахимьянов, Ю.В. Никитин // Обработка металлов. - 2012. - № 1, С.39-44.

125. Рахимьянов, Х.М. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании / Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова // Обработка металлов.- 2012. - № 3. - С.33-36.

126. Рахимьянов, Х.М. Обеспечение качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия /

Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова, М.А. Сауткина, В.А. Скрынник, А.П. Лихачев // Обработка металлов. - 2013. - № 2. - С.4-7.

127. Робакидзе, З.Ю. Ультразвуковая механическая обработка жаропрочных сплавов твёрдосплавным инструментом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Робакидзе З.Ю. - Волгоград, 2006. - 20 с.

128. Рогов, В.А. Повышение качества поверхностного слоя изделий методом ультразвуковой финишной обработки [текст] / В.А. Рогов [и др.] // Технология машиностроения. - 2007. - № 10. - С. 17-20.

129. Ромашкина, О.В. Формирование полей остаточных напряжений при нарезании наружных резьб с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний [текст] / О.В. Ромашкина // Всероссийская научно-техническая интернет-конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» [материалы]. - Самара: Самар. гос. тех. университет, 2008. - С. 55-58.

130. Ромашкина, О.В. Исследование влияния параметров ультразвуковой обработки на формирование остаточных напряжений при нарезании наружных резьб малого диаметра [текст] / О.В. Ромашкина // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. - 2009. - №2 (24). - С. 113-119.

131. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [текст] / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. - М.: Машиностроение, 1979. - 176 с.

132. Сарычев, И.Г. Исследование процесса нарезания резьб метчиками в титановых сплавах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сарычев И.Г. - Куйбышев, 1974 - 26 с.

133. Саушкин, М.Н. Метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения / М.Н. Саушкин, В.П. Радченко, В.Ф. Павлов, // ПМТФ. - Т.52. - 2011. - №2. - С.173 - 182.

134. Сверденко, В.П. Ультразвук и пластичность [текст] / В.П. Сверденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. – 440 с.

135. Селиванов, А.С. Повышение эффективности ультразвукового выглаживания на станках с ЧПУ на основе управления дислокационно-энергетическим состоянием поверхностного слоя: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.08 / А.С.Селиванов; [Место защиты: Ульян. гос. техн. ун-т]. - Тольятти, 2011. - 174 с.

136. Семенова, Ю.С. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей ультразвуковым пластическим деформированием: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.08 /Ю.С.Семенова; [Место защиты: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова]. - Барнаул, 2012. - 18 с.

137. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность [текст] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. - М.: Машиностроение. - 1975. - 488 с.

138. Столяров, А.К. Эффект упрочнения малых по протяжённости зон цилиндрических деталей / А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Куйбышев: КуАИ. - 1987. - 11 с. - Деп. в ВИНТИ 08.06.87, № 4083-В87.

139. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение. – 1988. – 240 с.

140. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [текст] / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. - М.: Машиностроение, 1974. - 255 с.

141. Суслов, А.Г. Качество машин: Справочник в 2 т. [текст] / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, А.А. Гусев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. - Т.1 – 256 с.; Т. 2 – 430 с.

142. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 2000. - 318 с.

143. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения [текст] / А.Г. Суслов, А.М. Доманский. - М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.

144. Таратынов, О.В. Анализ взаимной совместимости геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя изделий из титанового сплава после ультразвуковой обработки / О.В. Таратынов, В.В. Харченко, Д.В. Корнеев // Известия МГТУ "МАМИ". - 2012. - № 1.- С.211-218.

145. Таратынов, О. В. Повышение качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава методом ультразвуковой обработки / О.В. Таратынов, В.В. Порошин, В.В. Харченко // Научные технологии в машиностроении. - 2012. - № 10. - С.13-19.

146. Тепляков, А.Ю. Повышение эффективности сборки и разборки резьбовых соединений путем применения ультразвуковых колебаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Тепляков А.Ю. - Самара, 2004.- 20 с.

147. Тимирязев, В.А. Обеспечение качества поверхностного слоя материала деталей машин / В.А.Тимирязев, М.З.Хостикоев, А.Г.Схиртладзе, В.Н.Агеева, Пью Маунг Вэй //Технология машиностроения. - 2014. - N 1. - С. 7-11.

148. Турков, А.Г. Исследование эффективности ультразвуковых колебаний при нарезании резьб малого диаметра в жаропрочных и титановых сплавах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Турков А.Г. - Куйбышев, 1974. – 25 с.

149. Турков, А.Г. Ультразвуковая резьбонарезная головка [текст] / А.Г. Турков // Машиностроитель. -1982. - №6. - С. 23-25.

150. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. - Киев: Наукова Думка, 1985. - 92 с.

151. Харченко, В.В. Повышение качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава методом ультразвуковой обработки : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.07 / В.В.Харченко; [Место защиты: Моск. гос. индустр. ун-т]. -М., 2012. - 250 с.

152. Харченко, В.В. Повышение качества поверхностного слоя изделий из титанового сплава методом ультразвуковой обработки: автореферат дис. ...

кандидата технических наук : 05.02.07 /В.В.Харченко; [Место защиты: Моск. гос. индустр. ун-т]. - М, 2012. - 25 с.

153. Хейфец, М.Л. Технологическое управление эксплуатационными параметрами качества при механической обработке гильзы цилиндра и сборке двигателя / М.Л. Хейфец, Г.Б. Премонт //Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2009. - №11. - С.3-8.

154. Хворостухин, Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением [текст] / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, И.П. Ковалев, Р.А. Димаков. - М.: Машиностроение, 1988. - 144 с.

155. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов [текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок. – Барнаул: Изд. АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1999.-119 с.

156. Худобин, Л.В. Ультразвуковая активизация СОЖ при абразивной обработке [текст] / Л.В. Худобин, В.И. Котельникова, Ю.В. Полянский // Вестник машиностроения. – 1975. - № 4, С. 51-53.

157. Черня, Н.Н. Исследование влияния комплексных ультразвуковых колебаний на процесс нарезания резьбы метчиками: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Черня Н.Н. - Ростов на Дону, 1967 – 19 с.

158. Чистяков, А.В. Теоретические предпосылки учета пластического деформирования поверхностного слоя металла при механической обработке деталей машин / А.В. Чистяков // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. - 2006. - №9. - С.144-148, 185.

159. Шарипов, Б.У. Повышение эффективности процессов механообработки на основе аналитической оценки напряженного состояния рабочей зоны контакта инструмента и заготовки: дис... докт. техн. наук. Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. - Уфа, 2000. - 34 с

160. Штриков, Б.Л. Применение ультразвука для управления качеством поверхностного слоя деталей [текст] / Б.Л. Штриков // Тезисы докладов, региональной конференции «Прогрессивная технология - основа повышения

качества изготовления и производительности обработки деталей машин». - Горький: ГПИ, 1986. - С. 37 - 38.

161. Штриков, Б.Л. Влияние ультразвукового упрочнения несвязанным инструментом на характеристики качества поверхностного слоя колец подшипников / Б.Л. Штриков, А.Г. Бочкарев // Вестник. Самар. гос. техн. ун-та. - 2005. - № 39. - С.151-157.

162. Штриков, Б.Л. Повышение работоспособности резьбовых соединений путем применения ультразвука при обработке и сборке: Монография [текст] / Б.Л. Штриков, В.В. Головкин, В.Г. Шуваев, И.В. Шуваев. - М.: Машиностроение, 2009. -124 с. Шуваев, И.В. Повышение эффективности сборки и контроля качества резьбовых соединений путем применения ультразвука: дис. ... канд. техн. наук: 05. 02. 08: защищена 09.06.06. / Шуваев И В. - Самара, 2006. – 141 с.

163. Шуваев, В.Г. Ультразвуковой инструмент для сборки и разборки резьбовых соединений [текст] / В.Г. Шуваев, В.А. Папшев, И.В.Шуваев // СТИН. - 2012. - № 5. - С. 37-40.

164. Якухин, В.Г. Оптимальная технология изготовления резьбы [текст] / В.Г. Якухин. - М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.

165. Якушев, А.И. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений [текст] / А.И. Якушев, Р.Х. Мустаев, Р.Р. Мавлютов. - М.: Машиностроение, 1979. - 215 с.

166. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. - Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.

167. Влияние ультразвуковой обработки поверхностного слоя стали 40Cr на шероховатость ее поверхности / Wang Ting, Wang Dong-po, Shen Yu, Gong Bao-ming, Deng Cai-yan // Tianjin daxue xuebao=J. Tianjin Univ. - 2009. - 42. - № 2, С.168-172. - Библ. 13. - Кит.

168. Chen Yuan-Feng. Изменение поверхностного слоя сплава Al-Zn-Mg при комбинированной электроэрозионной и ультразвуковой обработке и добавлении частиц TiC в электролит. Surface modifications of Al-Zn-Mg alloy using combined

EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric /Chen Yuan-Feng, Lin Yan-Cherng // J. Mater. Process. Technol. - 2009. - 209, № 9. - С.4343-4350. - Англ.

169. Chen Yuan-Feng, Lin Yan-Cherng. Изменение поверхностного слоя сплава Al-Zn-Mg при комбинированной электроэрозионной и ультразвуковой обработке и добавлении частиц TiC в электролит. Surface modifications of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. // J. Mater. Process. Technol. - 2009. - 209, № 9. - С.4343-4350. - Англ.

170. Hsu C. Y. Особенности механической обработки сплава Инконель 718 с применением ультразвуковой резки. Machining characteristics of Inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting./Hsu C. Y., Lin Y. Y., Lee W. S., Lo S. P. // J. Mater. Process. Technol. - 2008. - 198, № 1-3. - С.359-365. - Англ.

171. Измерение и оценка качества поверхности при обработке оптических микроструктур. Measurement and characterization of surface quality in fast tool servo machining of optical microstructures / Cheung C. F., Kwok T. C., To S., Lee W. B., Jiang X. Q., Li H. F. // Key Eng. Mater. - 2008. - № 381-382. - С.517-520. - Англ.

172. Japitana Feliciano H., Обработка выступающего заостренного угла на станке с системой управления по шести координатным осям с применением ультразвуковых колебаний. Manufacture of overhanging sharp corner by means of 6-axis control machining with the application of ultrasonic vibrations / Morishige Koichi, Yasuda Shugo, Takeuchi Yoshimi // JSME Int. J.C.- 2003. - 46. - №1. - с.306-321. - Англ.

173. Kalashnikov, V.V. Ultrasonic physico-chemical methods of processing and assembly / V.V. Kalashnikov, M.F. Valogin, M.C. Nerubai, B.L. Shtrykov, F.R. Khan // FAS computing and publishing: New Delhi, India. Монография на англ. языке. - 2002. - 161с.

174. Khan, F.R. Finite element analysis (FAE) model of ultrasonic assembly process in Mechanical engineering / F.R. Khan // International journal of mechanical engineers: Indian Institute of Technology (IIT), Дели, Индия. - 2001. - С. 58-66.

175. Kumar J. Ультразвуковая обработка. Ultrasonic machining-a comprehensive review: Review. Mach. Sci. and Technol. - 2013. – 17. - № 3, С.325-379. - Англ.

176. Kuttkat Bernhard Ультразвуковая обработка при изготовлении деталей из хрупких материалов. Ein harter Job. Maschinenmarkt. - 2002. – 108. - № 12, С.24-25. - Нем.

177. Сочетание обработки резанием и обработки ультразвуком. L'usinage par ultra-sons // J.prod.- 2005.-№67. - с.47. - Фр.

178. Mainolfi, S.I. Designing component parts for ultrasonic assembly / S.I. Mainolfi // Plast, Eng. - 1984, 40. - N12. - p.29-32.

179. Moriwaki Toshimichi Development of 2DOF ultrasonic vibration cutting device for ultraprecision elliptical vibration cutting / Moriwaki Toshimichi // Key Eng. Mater. - 2010. - №447 - 448. - с.164-168. - Англ.

180. Rimkeviciene, J. Обработка резанием с ультразвуковыми колебаниями. Experiments and simulations of ultrasonically assisted turning tool / J. Rimkeviciene, V. Ostasevicius, V. Jurenas, R. Gaidys (Kaunas University of Technology, Lithuania) // Mechanika (Lietuva). - 2009. - №1. - с.42-46. - Англ.

181. Резание ультразвуком. Ultrasonic machining found to be a sound idea // MAN: Mod. Appl. News. - 2007. - 41. - №5. - с. 42-43. - Англ.

182. Schiffler, Ralph Ультразвуковая обработка резанием. Mit hohen Frequenzen die Produktion beschleunigen / Ralph Schiffler // Werkstatt und Betr. - 2004. - 137, № 10. - С. 10-14. - Нем.

183. Seandella J.-S. Обработка резанием труднообрабатываемых материалов с дополнительным применением ультразвука. Les ultrasons dopent l'usinage des matériaux délicats / Seandella J.-S. // Usine nouv. - 2002. - №2849, прил. - с.112-113. - Фр.

184. Singh Rupinder, Khamba J. S. Ультразвуковая обработка титана и его сплавов. Ultrasonic machining of titanium and its alloys: A review. J. Mater. Process. Technol. - 2006. - 173. - № 2. - С.125-135. - Англ.

185. Ультразвуковая обработка различных материалов. Hightech fur harte Zeiten. Werkstatt und Betr. - 2005. – 138. - № 11. - С.84. - Нем.

Приложение А



ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ

ООО ПК «Продмаш»
 Юридический адрес: 443546, Самарская область, Волжский район, п. Петра Дубрана, ул. Молодежная, 3
 Адрес для корреспонденции: 443030, г. Самара, ул. Речная, 9
 р/с 40702810654400015039 в банке Поволжский Банк ОАО «Сбербанк России» в г. Самаре,
 к/с 30101810200000000607, ИК 043601607, ИНН 6307659695
 тел. (846) 270-72-58 (59), 270-72-61 (факс)
 8-800-555-35-79 (звонок по России бесплатный)
 www.ceber.ru, sale@ceber.ru

Утверждаю:
 Генеральный директор
 Курганов А.В.
 01 2014 г.

АКТ об использовании результатов диссертационной работы Головкина Валерия Викторовича.

Комиссия в составе директора по производству Никошина Д.С., ведущего конструктора Гуськова А.А. и председателя комиссии заместителя ген. директора Наумова И.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Методы и средства технологического обеспечения качества резьбы при обработке с ультразвуковыми колебаниями» использованы при изготовлении продукции в следующем виде: осуществляется нарезание резьбы М4-М8 в деталях из нержавеющей стали и др. материалов с применением осевых ультразвуковых колебаний.

Использование указанных результатов исследований позволило механизировать процесс нарезания резьбы, повысить стойкость инструмента и качество резьбы.

Председатель комиссии:

Наумов И.А.

Члены комиссии:

Никошин Д.С.

Гуськов А.А.

Приложение Б

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор
ОАО «Волгабурмаш»

С.М. Крылов

11 ноября 2009 г.



АКТ

Опытно-промышленной проверки нарезания резьбы М6 с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний

В ОАО «Волгабурмаш» была проведена опытно-промышленная проверка процесса ультразвукового нарезания резьбы М6 с использованием ультразвукового устройства, изготовленного в Самарском государственном техническом университете.

Нарезание резьбы с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент проводилась на сверлильном станке с применением специального быстросъемного ультразвукового устройства и генератора УЗГЗ-0,4. Работа проводилась с применением в качестве технологической среды олеиновой кислоты. Обработка осуществлялась с осевыми ультразвуковыми колебаниями с амплитудой 5 мкм на резонансной частоте $f_p = 19300$ Гц. Нарезанная резьба соответствует техническим требованиям.

Применение резьбовых деталей, изготовленных с наложением на инструмент ультразвуковых колебаний, показало повышение ресурса работы в 1,5 – 2,5 раза.

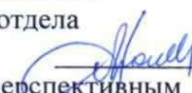
Целесообразно применять ультразвуковое нарезание резьбы на резьбовых деталях, эксплуатируемых в условиях знакопеременных нагрузок.

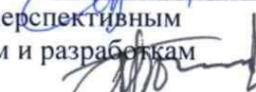
Для дальнейшего внедрения ультразвуковой системы в производство рекомендуется автоматизировать процесс нарезания резьбы с целью повышения производительности обработки.

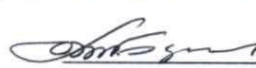
От предприятия:
ОАО «Волгабурмаш»
1^й заместитель технического
директора, начальник
технического отдела

Директор по перспективным
исследованиям и разработкам

Начальник научно-исследовательской
лаборатории

 А.К. Драчков

 Р.М. Богомолов

 А.С. Бурцев

От СамГТУ:

Научный руководитель,
к.т.н., доцент  В.В. Головкин

ассистент  О.В. Ромашкина

инженер  М.В. Дружинина

Приложение В

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВПО «СамГТУ»

профессор, д.т.н.

Быков Д.Е.

 2014 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Головкина В.В. «Методы и средства технологического обеспечения качества резьбы при обработке с ультразвуковыми колебаниями» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет».

В частности:

- при обучении студентов по направлению 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» проводится лабораторная работа с использованием метода нарезания резьбы с применением ультразвуковых колебаний «Влияние ультразвуковых колебаний на основные параметры процесса нарезания внутренних резьб метчиком»;
- полученные автором результаты диссертационной работы используются студентами при выполнении выпускной квалификационной работы;
- разработанные ультразвуковые устройства применяются в научных исследованиях аспирантов, обучающихся по специальностям 05.02.08 «Технология машиностроения» и 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Заведующий кафедрой
«Автоматизированные станочные
и инструментальные системы»,
д.т.н., профессор



А.Ф. Денисенко

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВПО «СамГТУ»
профессор, д.т.н.
Ненашев М.В.
Меншта 2014 г.



АКТ

**внедрения результатов диссертационных
исследований в научно-исследовательскую деятельность**

Результаты диссертационной работы Головкина Валерия Викторовича «Методы и средства технологического обеспечения качества резьбы при обработке с ультразвуковыми колебаниями» нашли отражение в подготовке научно-исследовательских работ, выполненных кафедрой «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» с участием автора в рамках проекта Министерства образования и науки РФ:

1. В научно-технических отчётах, выполненных по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 гг.)» по проекту «Разработка методов решения краевых задач, расчётно-информационная база данных и программный комплекс для оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести и сопротивления усталости упрочнённых элементов конструкций с концентраторами напряжений» (№ 2.1.1/13944), использованы следующие направления диссертационного исследования Головкина В.В.:

- разработан метод расчёта напряжённо-деформированного состояния резьбовых деталей на основе многоуровневой схематизации, декомпозиции и обобщённых моделей неупругого реологического деформирования и предложены формализованные алгоритмы решения данной задачи;

- предложена и реализована новая математическая модель восстановления напряжённо-деформированного состояния в упрочненном слое впадины резьбы при её нарезании лезвийным инструментом с применением ультразвуковых колебаний, не имеющая аналогов в научной литературе;

- выполнена проверка адекватности предложенных моделей оценки напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое после процедуры упрочнения по экспериментальным данным. Наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных;

- разработаны критерии для оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей с концентраторами напряжений.

Заведующий кафедрой
«Прикладная математика и информатика»
Самарского государственного
Технического университета,
руководитель проекта РНП № 2.11/3397,
№ 2.1.1/13944
д.ф.-м.н., профессор.



В.П.Радченко