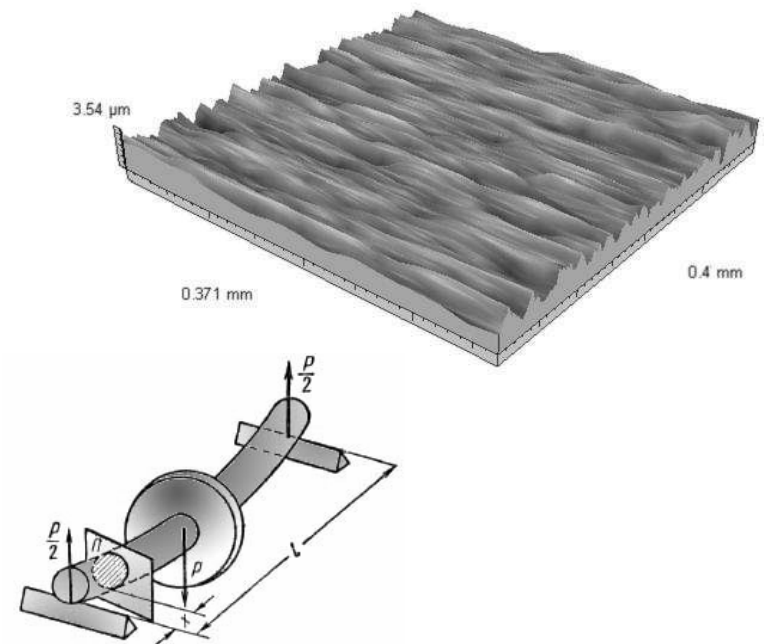


В. А. Валетов
С. Д. Васильков
А. Н. Сисюков
О. С. Юльметова

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ



Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49



Санкт-Петербург

2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

**В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков,
О.С. Юльметова**

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

Валетов Вячеслав Алексеевич

Васильков Сергей Дмитриевич

Сисюков Артем Николаевич

Юльметова Ольга Сергеевна

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 03.12.10

Заказ № 2292

Тираж 100

Отпечатано на ризографе



Санкт-Петербург

2010

В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков, О.С. Юльметова. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов./ Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.- 92 с.

Учебное пособие «Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов» предназначено для магистрантов инновационных магистерских программ кафедры «Технология приборостроения» («Технологическая подготовка производства приборов и систем» - 200.100.68.27, «Управление жизненным циклом приборов и систем» - 200.100.68.28, «Проектирование интегрированных автоматизированных систем технической подготовки производства приборов и систем» - 200.100.68.26) по дисциплине «Научно - исследовательская работа». В пособии изложены современные подходы к исследованиям влияния микрогеометрии поверхностей и механических напряжений в поверхностных слоях деталей приборов и машин на качество работы этих изделий с использованием непараметрических критериев оценки этих факторов.

Одобрено Ученым Советом факультета точной механики и технологий, протокол №12 от 16 ноября 2010 г.

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.



© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2010

© В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков, О.С. Юльметова, 2010

Митрофанов, прошедший школу по всем этапам производства: механика, начальника технологического и конструкторского бюро, главного технолога завода, начальника производства и главного инженера завода “ГОМЗ”. В течение шести лет, с 1954 по 1961 год, он курировал всю промышленность и науку города и Ленинградской области, работая секретарем Ленинградского ОК КПСС.

Кроме учебных лабораторий в 1964 году была создана отраслевая лаборатория по технологии и организации группового производства, ведущая НИР со многими предприятиями не только страны, но и ГДР, ЧССР, Болгарией, Венгрией, Великобританией и др. Кафедра и ее лаборатории стали поставщиком кадров не только для нашего ВУЗа, но и ВУЗов других регионов. За время работы с 1964 года подготовлено более 100 к.т.н. и несколько д.т.н.

В настоящее время на кафедре работают 7 профессоров и 9 доцентов.

С.П. Митрофанов оставил заведование кафедрой в связи с возрастом, оставаясь профессором кафедры. С 1998 года кафедру возглавлял проф. Н.Д. Фролов. В настоящий момент кафедрой возглавляет Е.И. Яблочников.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Кафедра технологии приборостроения была создана как ведущая и обслуживала чтением лекций по курсу «Технология приборостроения» все выпускающие кафедры ВУЗа. На заведование кафедрой был приглашен профессор Знаменский А.П. – главный инженер завода ГОМЗ, автор первого «Справочника Металлиста», известного во многих странах мира. Преподавателями и сотрудниками кафедры были приглашены высококвалифицированные специалисты, в основном работники промышленности – проф. Соколов - главный инженер инструментального завода им. Васкова, Буталов В.И., Бельфир, Казак и др. Нужно отметить, что до 1961года кафедра была слабо оснащена оборудованием и поэтому большое время уделялось прохождению практики непосредственно на заводах «ГОМЗ», «Красногвардеец», «ПИМаш» и др., где давались хорошая подготовка, как по работе на станках, так и по разработке грамотных технологических процессов. В 1951г. в кафедру влились кафедры станков и теории резания. После смерти А.П. Знаменского заведующими кафедрой были сотрудники института проф. Барун В.А., Маталин А.А., Соболев Н.П., научные труды которых использовались в качестве учебников. Учитывая длительный срок эксплуатации, оборудование устарело и было изношено. При кафедре имелись небольшие мастерские (25 токарных станков «ДИП», 3 фрезерных станка «Красный пролетарий» и другое вспомогательное оборудование). По своей оснащенности она не удовлетворяла качества подготовки инженеров-технологов. На кафедре ученое звание профессора имел только Н.П. Соболев – заведующий кафедрой.

В 1962 году, после смерти профессора Соболева Н.П. заведующим кафедрой был избран лауреат Ленинской премии, д.т.н., профессор С.П.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	3
Введение.....	4
1. Краткая историческая справка.....	5
2. Алгоритм процесса оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей.....	11
3. Обобщенная методика исследований с использованием непараметрических критериев.....	18
4. Разработка методики оценки влияния шероховатости растрового рисунка на оптические свойства бериллиевого ротора гироскопа.....	20
5. Теоретические аспекты планирования эксперимента при оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей.....	22
6. Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей.....	28
7. Разработка программы в среде МАТЛАБ для обработки профилей и анализа микрогеометрии поверхностей.....	32
7.1. Фильтрация профиля.....	32
7.2. Анализ профиля.....	35
8. Представление о напряжённно-деформированном состоянии изделий... ..	37
8.1. Остаточные напряжения и их классификация	39
8.2. Возникновение остаточных напряжений при различных видах обработки.....	40
8.3.Способы обработки поверхностей деталей.....	42
8.3.1. Термические методы.....	42
8.3.2. Механические методы.....	43
8.4. Методы исследования напряженно-деформированного состояния деталей и их ограничения.....	44
8.5. Сравнительные метрологические характеристики существующих методов определения остаточных напряжений.....	54
9. Резистивный электроконтактный метод неразрушающего определения остаточных напряжений.....	59
9.1. Теоретическое описание метода	59
9.2. Особенности конструкции первичных преобразователей.....	67
10. Средство измерения СИТОН-ТЕСТ напряжённного состояния в поверхностном слое металла.....	71
10.1. Принцип работы измерительного комплекса СИТОН.....	71
10.2. Методика определения напряжений.....	76
10.2.1. Подготовка к работе.....	76
10.2.2. Работа прибора.....	79
10.2.3. Работа с программой RezikonExcel.....	80
10.3. Методика получения калибровочной зависимости.....	83
11. Примеры лабораторных работ по определению остаточных напряжений.....	85
Выводы.....	87
Литература.....	88

Введение

Если какой-либо фактор существенно влияет на качество производимой продукции, то целесообразно оптимизировать этот фактор для получения максимального эффекта. Решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей изделия оказывают характеристики поверхностного слоя материалов деталей. В данной статье речь пойдет о двух характеристиках поверхностного слоя материала деталей, оптимизация которых по разным причинам до сих пор не используется для повышения эксплуатационных свойств деталей. Это микрогеометрия (шероховатость) поверхностей и механические напряжения в поверхностном слое материала деталей. Проанализируем причины такого положения и изложим предлагаемые способы их устранения.

напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов. Патент на полезную модель № 64755. ФИПС, 2006.

28. Ковалев А.В., Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник (под ред. Ключева В.В.) Изд. 3-е, перераб., доп. Изд. Машиностроение, 2005, 656с.

29. Васильков Д.В., Вейц В.Л., Шевченко В.С. Динамика технологической системы механической обработки. – СПб.: Изд-во "Инструмент", 1997.- 230 с.

30. Васильков С.Д. Исследования по определению остаточных напряжений через удельное электросопротивление. Сб.научн.тр. «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительного производства» – СПб.: Изд. «Инструмент и технологии», 2008, с.28-31.

31. Васильков Д.В., Васильков С.Д., Иванов С.Ю. Применение аппаратуры СИТОН для исследования технологической наследственности при изготовлении изделий машиностроения / Пленки и покрытия-2007: Труды 8й международной конференции. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та 2007, с.219-223.

32. Никитина Н.Е., Камышев А.В., Смирнов В.А., Борщевский А.В., Шарыгин Ю.М. "Определение осевых и окружных напряжений в стенке закрытой трубы ультразвуковым методом на основе явления акустоупругости". Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 49-54.

33. Воробьев Е.А. Радиоволновой контроль судовых радиотехнических конструкций и материалов. Л.: Судостроение, 1986.

34. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса «деформация – разрушение». Часть I. Физические критерии предельных состояний металла. М.: ЗАО «Тиссо», 2007. 517с.

35. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневых материалов. СПб.: Изд-во «Астериан», 2004, 624с.

36. Кочаров Э.А., Тараканов Ю.В. Способ электрического неразрушающего контроля токопроводящих материалов и устройств его реализации. Патент на изобретение № 2256906. ФИПС, 2002.

концепция диагностики напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов. – М., 2008. – Режим доступа:

http://www.energodiagnostika.ru/ru/about_mmm/article/about_mmm_sss_dign.aspx

14. Дубоделова О.С., Ивченко Т.Г. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое детали при совместной обработке точением и обкатыванием. / Дубоделова О.С., Ивченко Т.Г.// Донецк: ДонНТУ, 2005, № 6. - С.132-135.

15. Маталин А.А. Технология машиностроения. Учебник. М.: Изд. Лань, 2008. 512 с.

16. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000. - 320с.

17. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1989, 254 с.

18. Блурцян Р.Ш., Блурцян И.Р. Формирование технологических остаточных напряжений в поверхностных слоях торсионных валов при обкатывании Часть I. Физические критерии предельных состояний металла. / Блурцян Р.Ш., Блурцян И.Р. // М.: ЗАО "Тиссо", 2007. – 517с

19. Овсеев А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. М.: Янус-К, 2003, 296 с.

20. Васильков С.Д., Александров А.С., Афанасьев И.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки // Инструмент и технологии, № 30-31, 2009. С. 83-85.

21. Меркулова Н.С., Иванова Т.О., Гринченко М.И. Совершенствование средств контроля поверхностных остаточных напряжений и их метрологическая аттестация // Упрочняющие технологии и покрытия, №3, 2006. С.46-48.

22. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 356 с.

23. Трофимов В.В., Башкарев А.Я., Краус И. Рентгеновская тензометрия - это так просто // В мире неразрушающего контроля, №1(27), 2005. С.28-32.

24. Решенкин А. С. Магнитошумовой метод контроля состояния силовых конструкций // Автомобильная промышленность", № 8, 2005. С. 31-32.

25. Чернышев Г.Н. Полезные и опасные остаточные напряжения / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев // Природа. 2002. – №10.

26. Бураков А.И., Гутнер А.Б., Васильков Д.В., Васильков С.Д., Иванов С.Ю. Неразрушающий способ определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов. Патент на изобретение № 2327124. ФИПС, 2006.

27. Бураков А.И., Гутнер А.Б., Васильков Д.В., Васильков С.Д., Иванов С.Ю. Устройство неразрушающего определения механических

1. Краткая историческая справка

В 1975 году в СССР был введен в действие ГОСТ 2789-73 на шероховатость поверхностей деталей машин и приборов. Ранее аналогичные стандарты были приняты во многих западных странах. Среди стандартизованных параметров чаще всего встречаются параметры R_a (среднеарифметическое отклонение профиля от средней линии), R_z (среднеарифметическое отклонение профиля от средней линии по десяти точкам), R_{max} (наибольшее отклонение профиля), R_q (среднеквадратическое отклонение профиля от средней линии). Одновременно создавались и совершенствовались средства автоматизированного определения этих параметров. Что явилось главной причиной перехода на параметрические стандарты? Как известно, ранее шероховатость поверхностей деталей регламентировалась четырнадцатью классами шероховатости: от самой грубой – $\nabla 1$, до самой чистой, идеально зеркальной – $\nabla \nabla \nabla \nabla 14$.

Каждый класс шероховатости делился на несколько подклассов с использованием соответствующего количества знаков ∇ . Например, седьмой класс мог иметь обозначение $\nabla 7 \dots \nabla \nabla \nabla 7$. Для всех основных видов обработки поверхностей были изготовлены образцы шероховатости для каждого конкретного класса и подкласса. На основе многочисленных многолетних опытов были сформулированы рекомендации, какой вид обработки и какие режимы используются для получения шероховатости поверхности того или иного класса и подкласса. Соответствие шероховатости обработанной поверхности заданной на чертеже определялось визуально, сравнением с соответствующим образцом. Неизбежная субъективность подобного метода оценки приводила к многочисленным конфликтам. Поэтому, как только метрологи предложили примитивнейший по сегодняшним меркам прибор для графического изображения, а затем и статистической обработки профиля, все стало внедрять стандартизацию параметров профиля поверхностей с удивительной поспешностью. Таким образом, удалось избавиться от субъективности оценки микрогеометрии, одновременно была потеряна возможность оптимизации последней для получения конкретных функциональных свойств поверхности. В качестве доказательства приведем четыре условия, без выполнения которых оптимизация микрогеометрии практически исключается:

- наличие сведений об оптимальной микрогеометрии с учетом конкретного функционального свойства;
- точное описание известной оптимальной микрогеометрии (нормирование на чертеже);
- воспроизведение заданной оптимальной микрогеометрии при обработке поверхности;

- возможность провести контроль полученной микрогеометрии быстро, точно и с минимальными затратами.

Очевидно, что на практике параметрические стандарты не позволяют выполнить второе условие, т.к. для этого требуется от 3 до 25 параметров. Это нереально, и такие попытки даже не предпринимаются. О последнем можно судить на основании того, что на рабочих чертежах деталей шероховатость каждой поверхности нормируется одним параметром: R_a (или R_q), или R_z . Практическую нецелесообразность параметрических стандартов с точки зрения оптимизации микрогеометрии показывает пример, ставший уже классическим (рис.1.1).

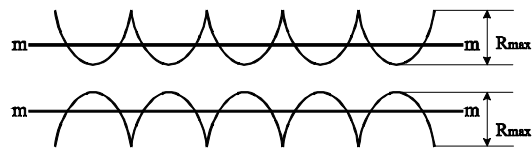


Рис. 1.1. Профили двух зеркально противоположных поверхностей

Достаточно посмотреть на два профиля, у которых все действительно используемые стандартные параметры абсолютно одинаковы, и задать только один вопрос: могут ли две поверхности с такими разными микрорельефами иметь одинаковое функциональное свойство? Даем парадоксальный на первый взгляд ответ: могут, но только в том случае, если интересующее нас свойство поверхности не зависит от ее шероховатости. При этом остается без ответа еще один важный вопрос: зачем мы нормируем шероховатость всех поверхностей деталей независимо от того, влияет она или не влияет на известные функциональные воздействия. Если же шероховатость поверхности существенно влияет на интересующее нас функциональное свойство, то оно просто не может быть одинаковым у этих двух поверхностей, профили которых показаны на рис.1.1. Очевиден и вывод: параметрические критерии оценки и контроля микрогеометрии поверхностей изделий практически исключают возможность улучшения их качества за счет оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей.

Неудовлетворенность параметрическим подходом к оценке и контролю микрогеометрии поверхностей проявилась вскоре после введения последнего и выразилась в многочисленных попытках поиска так называемых комплексных критериев, которые, как предполагалось, должны коррелировать с функциональными свойствами поверхностей. Данную задачу пытались решить И.В.Крагельский, Ю.Р.Витенберг, В.С.Лукьянов, В.С.Комбалов, Я.А.Рудзит, Д.Ф.Аршард, П.Р.Найак, Т.Р.Томас, Р.С.Сейлс, Д.Д.Уайтхауз и многие сотни, а возможно, и тысячи других исследователей [1-4]. Все эти попытки заканчивались предложением использовать какой-либо численный (параметрический) критерий, полученный в результате арифметических действий с различными параметрами, или некоторые

Литература

1. Крагельский И. В., Рудзит Я. А. Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // Приборостроение. 1968. № 3. С. 15–24.
2. Крагельский И. В., Комбалов В. С. Расчет величины стабильной шероховатости после приработки (упругий контакт) // Доклады АН СССР. 1970. Т. 193, № 3. С. 554–556.
3. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975. 344 с.
4. Whitehouse D. J., Archard J. F. The properties of random surfaces of significance in their contact // Proc. Roy. Soc. London, 1970. Ser. A. N 316. P. 97–121.
5. Валетов В. А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Труды Ленингр. кораблестроит. ин-та. 1976. Вып. 108. С. 135–140.
6. Валетов В. А. Влияние исходной микрогеометрии на коэффициент сопротивления качению и долговечность роликовых направляющих // Трение и износ. 1982. Т. III. № 5. С. 914–918.
7. Валетов В. А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндрической поршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. 1983. Т. 4, № 6. С. 1104–1107.
8. Валетов В. А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. № 6. СПб.: СЗПИ, 1997. С. 118–121.
9. Валетов В. А., Иванов С. Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов // Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем: Труды Пятой сессии Международной научной школы, 27 июня – 5 июля 2002 / Под ред. В. П. Булатова, Л. В. Ефремова. СПб.: Изд-во СПбГУ, ИПМаш, 2002. С. 164–167.
10. Valetov W. A., Grabow J. Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflächenmikrogeometrie // 41. Internationales wissenschaftliches Kolloquium. 1996. Bd 2. S. 622–625.
11. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз. 1963, - 233 с.
12. Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М., Пономарев И. И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах /– М., 1996.
13. Дубов А. А., Власов В. Т. О проблеме измерения характеристик напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов сложных технических объектов. [Электронный ресурс]: Энергетическая

Выводы

Использование ставших привычными параметров для оценки и контроля различных функциональных свойств поверхностного слоя деталей приборов и машин обладает только одним достоинством – простотой практического использования. Когда речь идет о комплексном критерии, зависящем от нескольких факторов, просто невозможно применять числовые критерии, так как они не позволяют описать на чертеже оптимальную (лучшую из возможных) для нормируемого функционального свойства поверхности характеристику с достаточной для практики степенью точности.

Функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей шероховатых поверхностей для микрогеометрии и эпюры распределения механических напряжений по глубине поверхностного слоя материала детали практически однозначно определяют соответствующую характеристику поверхностного слоя и полностью удовлетворяют закономерному требованию – необходимости полного описания нормируемой характеристики.

Из математики известно, что предлагаемые критерии оценки микрогеометрии поверхностей и механических напряжений могут быть представлены либо в виде набора параметров (от трех до двадцати пяти), либо аналитически (в виде формул), либо графически. Первый вариант практически не реализуем по причине, изложенной выше. Как практически использовать в качестве критерия формулу (второй вариант), даже если она известна, мы не знаем. В статье приведен метод использования графических изображений функций (третий вариант), практическая приемлемость которого изложена в многочисленных публикациях. Особо следует подчеркнуть простоту и практическую целесообразность нормировать в технической документации не критерии оценки, а непосредственно интересующее нас функциональное свойство поверхностного слоя деталей.

функции для качественной оценки характера микро рельефа. Но ни одно из решений не удовлетворяло четырем вышеизложенным условиям оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей.

Возможное реальное решение проблемы было предложено в докторской диссертации и многочисленных публикациях и докладах профессора В. А. Валетова [5-10]. В этих работах графические изображения функций распределения и функций плотности распределения ординат и углов наклона профилей, а также графические изображения опорных кривых (кривых Аббота) представлены таким образом, что их можно использовать на практике в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии. В качестве предельных возможностей непараметрического подхода в этой области указывается использование в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии графических изображений самого профиля и – в пределе – графических изображений микро топографии поверхностей. Последнее практически означает возврат к комплексной оценке, характерной для раннее используемых образцов шероховатости, за исключением субъективности оценки, т.к. предполагается, что процесс полностью компьютеризирован.

К сожалению, эта важнейшая проблема имеет не только технический характер. Нецелесообразность использования параметрических критериев настолько очевидна, что их применение и в наши дни невозможно объяснить соображениями здравого смысла.

В связи с этим одной из основных целей данного пособия является широкое распространение информации о возможности эффективного использования непараметрических подходов и в учебном процессе, и на любом отдельно взятом предприятии как реалистичного, экономически приемлемого способа повышения качества продукции. Для того чтобы получить реальный эффект от оптимизации микрогеометрии поверхностей, многие предприятия, выпускающие продукцию из конструкционных материалов, могут самостоятельно экспериментально определить наилучшую возможную микрогеометрию или убедиться в отсутствии влияния микрогеометрии на интересующие их функциональные свойства поверхности. И в том, и в другом случае экономический эффект очевиден: если будет иметь место первый вариант, то станет лучше качество продукции, если второй вариант, отпадет необходимость ненужных затрат на обеспечение и контроль ни на что не влияющей шероховатости поверхности. Конечно, речь идет об экспериментах с использованием непараметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии. В качестве таких критериев целесообразно использовать графические изображения функций плотности распределения ординат или углов наклона профилей, а еще лучше – сами профили или микро топографии поверхностей.

В чем же принципиальное отличие стандартных параметрических критериев оценки и контроля шероховатости от предлагаемых непараметрических – графических изображений различных функций? Главное отличие – в их информативности. Любой стандартный параметр шероховатости содержит так мало информации, что, будучи реализован при обработке поверхности, практически никак не предопределяет структуру

микрорельефа. Таким образом, для заданного на чертеже параметра можно получить бесчисленное множество разных микрорельефов поверхности, зависящие от шероховатости свойства которых будут разными и чаще всего совсем не такими, как мы ожидали.

К числу пока еще трудно решаемых проблем следует отнести механические напряжения в поверхностном слое материала деталей, их возникновение практически неизбежно при обработке металлических заготовок резанием любого вида и при термической обработке многих видов. Следует выделить три принципиально различных последствия воздействия этих напряжений в процессе изготовления и эксплуатации продукции:

- Если изделие очень жесткое и величины остаточных напряжений превышают предел прочности материала, то на поверхности изделия возникают трещины.
- Если остаточные напряжения достаточно велики, а жесткость изделия мала, то возникают деформации изделий, которые могут превысить допуски по требуемой геометрической точности, прежде всего по точности взаимного расположения поверхностей.
- Если изделие обладает высокой жесткостью, а остаточные напряжения не достигают предела прочности материала, то сохраняется опасность разрушения изделия при совпадении знаков остаточного напряжения и эксплуатационных нагрузок ниже расчетных.

Исследования показали, что механическими напряжениями технологически можно управлять. Это означает, что и величина, и знак, и распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя зависят от видов и режимов обработки заготовок. Варьируя параметры обработки и последовательность методов обработки заготовок, можно в конечном итоге получить необходимую величину и распределение остаточных напряжений по глубине в поверхностном слое. Большой вклад в исследование данной проблемы внес С.Ю.Иванов [9]. Его соратники Д.В.Васильков и С.Д.Васильков продолжают совершенствовать метод и средства неразрушающего контроля и измерения технологических остаточных напряжений. Чрезвычайно информативным критерием оценки остаточных напряжений является интеграл от эпюры их распределения по глубине. С.Ю.Иванов назвал этот критерий деформирующей способностью технологических остаточных напряжений и обозначил буквой q .

На рис.1.2 и рис.1.3 показаны эпюры распределения остаточных напряжений, полученных при различных видах и режимах обработки, это наглядно демонстрирует их технологическую управляемость. Очевидно, что использование в качестве критериев оценки и контроля механических напряжений графических изображений эпюр их распределения по глубине может быть так же эффективно, как и применение непараметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей.

(например, в виде таблицы) Построить получившуюся эпюру остаточных напряжений.

3.7. Написать конкретные выводы и рекомендации по работе.

3.8. Указать список используемой литературы и/или ссылки Интернет-ресурсов.

3.9. Время выполнения работы – 2 академических часа. Время выполнения отчёта – 1 неделя.

Лабораторная работа №2. Исследование влияния вида обработки на остаточные напряжения

Шаг 1. Подготовка к эксперименту

1.1. Выбрать 3 объекта исследования с различным способом обработки поверхности из одного и того же металлического материала.

1.2. Записать название, геометрические размеры, материал, виды обработки измеряемых поверхностей.

1.3. Записать название аппаратуры для измерений.

1.4. Записать настройки прибора при измерениях.

Шаг 2. Проведение эксперимента и расчёты

2.1. Измерить на образце по 3 (три) раза в разных близких областях каждой исследуемой поверхности и сохранить данные на компьютер.

2.2. Проверить наличие получившихся эпюр остаточных напряжений.

2.3. Сравнить полученные электрические значения эффективного удельного сопротивления (ЭУС) для каждой глубины каждого образца, рассчитывая математическое ожидание и дисперсию. Также вычислить погрешность измерения среднего ЭУС.

Шаг 3. Оформление работы

3.1. Оформить титульный лист.

3.2. Написать постановку задачи.

3.3. Написать информацию о влиянии механической обработки поверхности на остаточные напряжения.

3.4. Указать применяемую аппаратуру в лабораторной работе.

3.5. Описать объекты измерения (детали).

3.6. Указать формулы расчёта остаточных напряжений и погрешностей. Указать рассчитанные величины математического ожидания и дисперсии (например, в виде таблицы) Построить получившиеся эпюры остаточных напряжений.

3.7. Написать конкретные выводы и рекомендации по работе.

3.8. Указать список используемой литературы и/или ссылки Интернет-ресурсов.

3.9. Время выполнения работы – 2 академических часа. Время выполнения отчёта – 1 неделя.

6. Выполняют СКАН-идентификацию с построением корреляционных зависимостей K_σ между электрическими и механическими характеристиками образцов и пластин

$$K_\sigma = K_\sigma(f, \rho, q), \quad (10.6)$$

где f – частота тестового сигнала, Гц; I – амплитуда тестового сигнала, А; U – амплитуда сигнала отклика, В; q – деформирующая способность остаточных напряжений, Н/м.

7. Функцию (10.6), помещают в базу данных по калибровкам.

11. Примеры лабораторных работ по определению остаточных напряжений

Лабораторная работа №1. Измерение остаточных напряжений

Шаг 1. Подготовка к эксперименту

- 1.1. Выбрать объект исследования с определённым видом обработки поверхности.
- 1.2. Записать название, геометрические размеры, материал, вид обработки измеряемой поверхности.
- 1.3. Записать название аппаратуры для измерений.
- 1.4. Записать настройки прибора при измерениях.

Шаг 2. Проведение эксперимента и расчёты

- 2.1. Измерить на образце по 3 (три) раза в разных близких областях исследуемой поверхности и сохранить данные на компьютер.
- 2.2. Проверить наличие получившегося эпюры остаточных напряжений.
- 2.3. Сравнить полученные электрические значения эффективного удельного сопротивления (ЭУС) для каждой глубины, рассчитывая математическое ожидание и дисперсию. Также вычислить погрешность измерения среднего ЭУС.

Шаг 3. Оформление работы

- 3.1. Оформить титульный лист.
- 3.2. Написать постановку задачи.
- 3.3. Написать информацию по остаточным напряжениям, включая определение, классификацию и примеры. Какие приборы существуют по определению остаточных напряжений? На что влияют остаточные напряжения?
- 3.4. Указать применяемую аппаратуру в лабораторной работе.
- 3.5. Описать объект измерения (детали).
- 3.6. Указать формулы расчёта остаточных напряжений и погрешностей. Указать рассчитанные величины математического ожидания и дисперсии

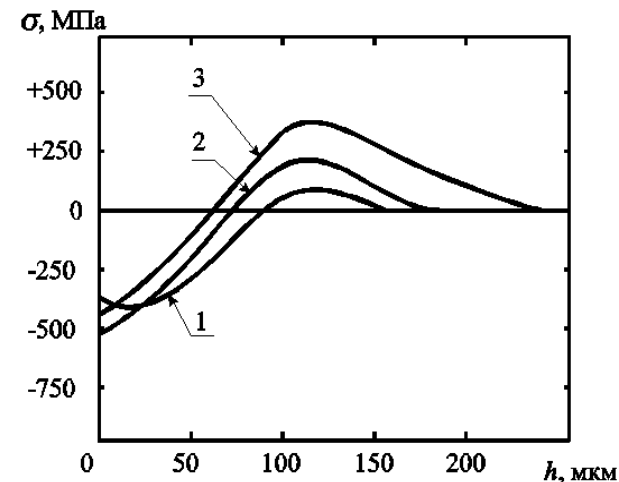


Рис. 1.2. Влияние режимов шлифования на остаточные напряжения $\sigma(h)$ и деформирующую способность технологических остаточных напряжений q : 1 – скорость резания $v = 10$ м/с; подача $S = 0,3$ м/с; давление инструмента на обрабатываемую поверхность $P = 100$ Н; 2 – $v = 20$ м/с; $S = 0,2$ м/с; $P = 150$ Н; 3 – $v = 40$ м/с; $S = 0,1$ м/с; $P = 200$ Н)

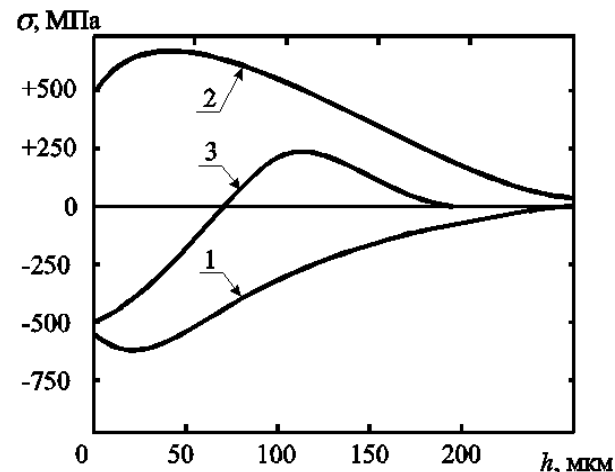


Рис. 1.3. Распределение $\sigma(h)$ в стали 20X13 после обработки: 1) – фрезерование на станке Forest, Германия; 2 – ручное шлифование на станке ЛШ-95; 3 – шлифование лентой на станке Metabo, Германия.

В настоящее время существует большое количество различных физических методов и средств контроля для обеспечения качества деталей. Все более важным аспектом является контроль механических характеристик материалов во всем объеме деталей, а также в поверхностном слое после различных технологических воздействий, причем основное место здесь занимают методы и средства измерения остаточных и внутренних рабочих напряжений. Поэтому на первый план выходят методы технической диагностики, с помощью которых изучаются и устанавливаются признаки или причины дефектов деталей, применяя разрушающий или неразрушающий контроль, основанные на положениях металловедения, физики твердого тела, метрологии и пр. Здесь, прежде всего, важно отметить методы контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) [11- 13].

Задачами измерений механических напряжений, в частности остаточных, в работающих деталях и конструкциях с целью оценки их состояния в настоящее время занимаются многие компании по всему миру. Однако до сих пор эффективность различных методов и средств контроля напряжений зачастую остается невысокой при их использовании непосредственно на оборудовании.

Большой опыт эксплуатации изделий в различных областях техники и многочисленные эксперименты показывают, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, долговечность изделий и другие свойства. Они оказывают влияние на точность изготовления маложестких изделий [13- 17].

В современной промышленности определение остаточных напряжений осуществляется методами разрушающего и неразрушающего контроля. При этом эксплуатационные свойства изделия определяются как величиной остаточных напряжений на поверхности, так и характером их распределения по глубине поверхностного слоя. Недостатки разрушающих методов общеизвестны и не требуют комментариев. Существующие неразрушающие методы имеют ряд ограничений, не позволяющих применять их при определении остаточных напряжений в изделиях из алюминиевых, никелевых и других сплавов. Требуется создание новых методов и средств неразрушающего контроля, что является актуальной проблемой для современного приборостроения и машиностроения.

5×2мм, длиной, соответственно, 60мм. Принадлежность пластины к данному образцу помечается маркировкой на тыльной части пластины и в месте выреза на образце.

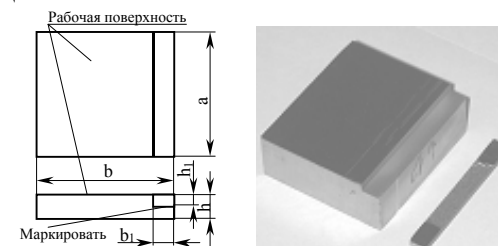


Рис.10.14. Калибровочный образец и место выреза для разрушающего контроля

3. Образцы 1 и 2 поступают на испытания для измерений на приборе СИТОН-ТЕСТ. Схема установки датчика на рабочую поверхность образца приведена на рис.10.15.

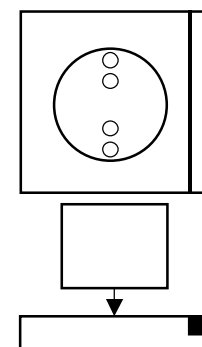


Рис. 10.15. Схема установки датчика на калибровочный образец

Результатом испытаний являются таблично заданные функции:

$$\text{для образца 1} \quad \rho_1 = \rho_1(h); \quad (10.2)$$

$$\text{для образца 2} \quad \rho_2 = \rho_2(h); \quad (10.3)$$

4. Пластины 1 и 2 поступают на испытания по определению разрушающим методом остаточных напряжений с построением эпюр на приборах ПИОН или ПОВКОН. Результатом испытаний являются таблично заданные функции:

$$\text{для образца 1} - \quad \sigma_1 = \sigma_1(h); \quad (10.4)$$

$$\text{для образца 2} - \quad \sigma_2 = \sigma_2(h). \quad (10.5)$$

5. Функции (10.2) – (10.5), помещают в базу данных по калибровкам.

10.3. Методика получения калибровочной зависимости

Снятие калибровочной зависимости между ЭУС и механическими напряжениями материала исследуемого изделия на глубинах, соответствующих заданным частотам, производится следующим образом. Любым из известных способов разрушающего контроля, например, методом Давиденкова-Биргера для образцов из материала исследуемого изделия строится распределение (эпюра) напряжений по глубинам, соответствующим частотам электрических измерений. Этому распределению сопоставляется распределение ЭУС (или его приращения) по тем же глубинам. В результате получается калибровочный график между ЭУС и остаточными напряжениями в материале изделия. При последующих исследованиях изделий из этого же материала полученная калибровочная зависимость используется для преобразования данных электрических измерений в распределение остаточных напряжений. Например, криволинейную калибровочную зависимость $\sigma_i^{кал}(\rho_{эi}^{кал})$ можно аппроксимировать набором прямолинейных отрезков, каждый из которых имеет угловой калибровочный коэффициент

$$K_{\sigma i} = \Delta \sigma_i^{кал} / \Delta \rho_{эi}^{кал}, \quad (10.1)$$

где $\Delta \sigma_i^{кал}$, $\Delta \rho_{эi}^{кал}$ – соответственно приращение механических напряжений и ЭУС в материале изделия.

Далее проводится преобразование распределения $\rho_{эi}$ в распределение остаточных напряжений σ_i по глубине исследуемого изделия.

Рассмотрим пример калибровки по остаточным напряжениям. Она предусматривает следующую последовательность действий.

1. Готовят два калибровочных образца для измерения.

Для общих исследований предусматривается следующая технология подготовки образцов. Оба образца подвергаются отжигу в соответствии с режимом, предусмотренным для исследуемого материала. Рабочая поверхность обоих образцов подвергается технологическому воздействию (механическая обработка, термообработка, пластическое деформирование и др.). Далее образец 1 вновь подвергается отжигу, а образец 2 остается в обработанном состоянии.

Для исследования отдельных технологий из партии образцов, рабочая поверхность которых подвергнута данному технологическому воздействию на различных режимах, выбираются два образца. Желательно, чтобы теплофизическое воздействие на рабочую поверхность образцов было различным.

Образцы для идентификации должны быть выполнены в виде пластины с размерами рабочей поверхности не менее $a \times b = 60 \times 50$ мм (см. рис.10.14) и толщиной $h = 5$ мм.

2. В каждом из двух образцов вырезают пластину в соответствии со схемой, представленной на рис.10.14. Поперечные размеры пластины $b_1 \times h_1 =$

2. Алгоритм процесса оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей

В современной технологии приборостроения актуальным остается поиск таких решений, которые позволяют значительно повышать эксплуатационные показатели изделий при минимальных экономических затратах. Оптимизация микрогеометрии функциональных поверхностей деталей – одно из таких решений.

В данном разделе представлен алгоритм процесса исследования и оптимизации влияния шероховатости на функциональное свойство, который следует рассматривать как аспект развития теории оптимизации.

Алгоритм позволяет выявить критерии и сформировать методику оценки степени влияния шероховатости на функциональное свойство, оптимизировать это влияние на базе теории планирования эксперимента, определить принципы и условия построения управляемой технологии формирования требуемого (наиболее эффективного) микрорельефа и т.д.

Этапы разработки и создания методики оценки влияния шероховатости на функциональное свойство можно рассмотреть на основе алгоритма, представленного на рис.2.1.

Согласно данному алгоритму, для достижения цели, обозначенной в блоке 1 – разработки методики – необходимо решить ряд задач, приведенных в блоках 2 и 3, то есть определить исследуемые функциональные свойства и выбрать функциональный критерий для описания и оценки соответствия данных свойств требуемому значению. Например, если представляет интерес отражательная способность поверхности, то в качестве функционального критерия логично выбрать коэффициент отражения поверхности.

Следующая задача – выбор оборудования, позволяющего контролировать и количественно определять функциональный критерий (блок 4). Так, например, оборудованием, позволяющим измерять коэффициенты отражения, может служить микроскоп-спектрофотометр. Если же необходимое оборудование не удалось найти, то целесообразно использовать косвенные методы или следует выбрать другой критерий. Допустим, нас интересует оптическое свойство, нормируемое коэффициентом контрастности рисунка, нанесенного на базовую поверхность изделия. Однако прямое измерение коэффициента контрастности требует разработки специального оборудования, поэтому в данном случае условие в блоке 4 не выполнено и нам следует вернуться к блоку 3 и выбрать другой критерий, например коэффициент отражения, так как коэффициент контрастности является разностью коэффициентов отражения базовой поверхности и поверхности рисунка.

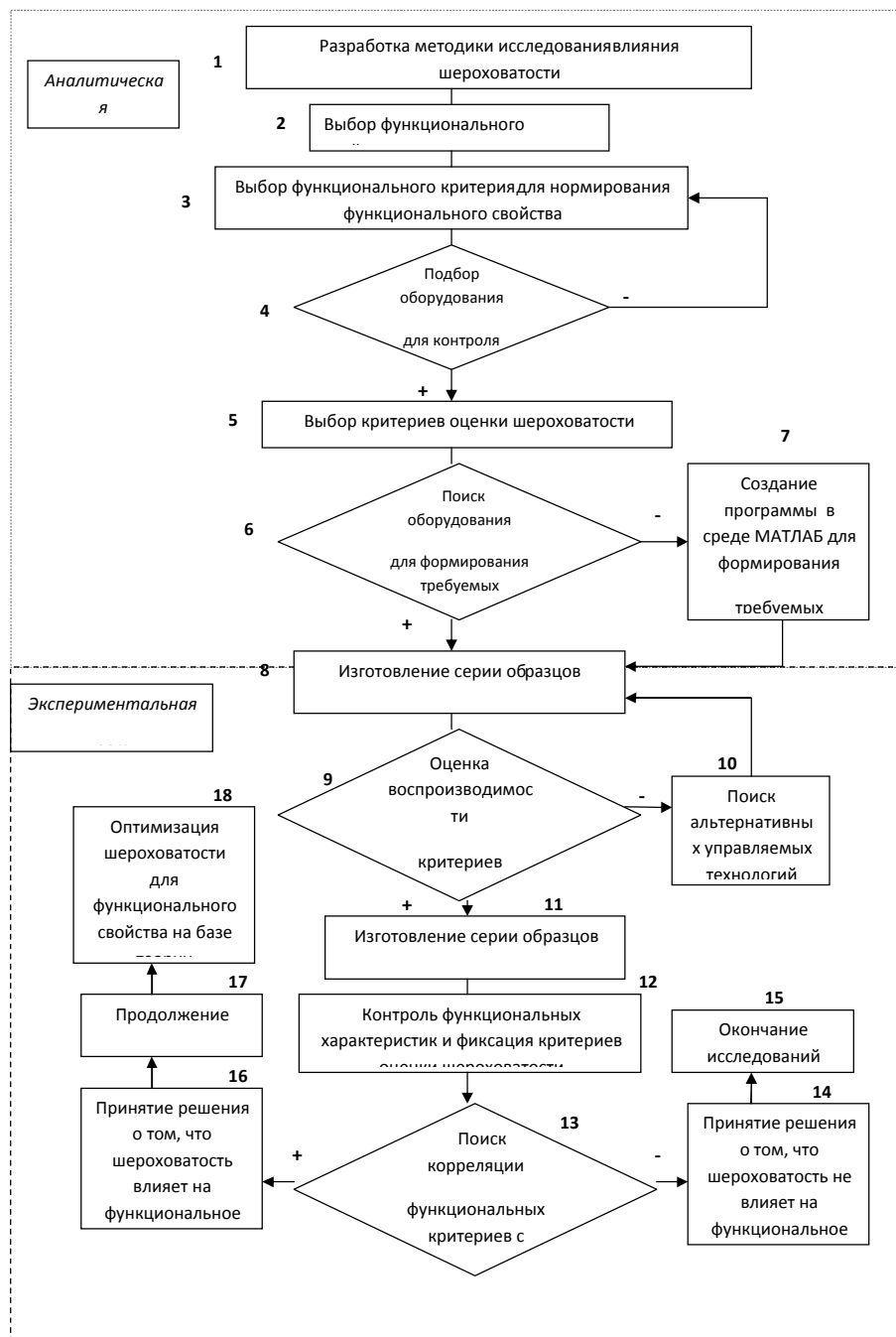


Рис.2.1. Алгоритм процесса исследования и оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей

Файл сохраняется в формате Excel, в котором есть следующие закладки:

«Исходные данные» - хранение исходных данных измерений прибора.

«Расчеты и графики» - преобразованные исходные данные, где найдены средние значения от трех измерений.

Закладка с названием материала – рассчитанные эпюры остаточных напряжений.

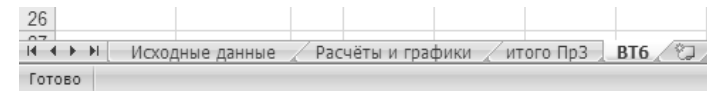


Рис. 10.12. Закладки в сохранённом файле.

В закладке «Расчеты и графики» представлены следующие данные по столбцам (рис.10.13)

A	B	C	D	E	F	H	I
Номер измерения	Номер глубины	Значение глубины	Значение тока	Значение напряжения	ЭУС*	Среднее ЭУС от 3-х измерений	Средне-квадратичное отклонение

*Эффективное удельное сопротивление

В закладке с названием материала представлены рассчитанные эпюры остаточных напряжений. Значения напряжений представлены в областях с названием S.

	A	B	C	D	E	F	H	I
1	№	h, мкм	I, mA	U, мкВ	R ₀ , мОм*мкм	R _{ср} , нОм*СКвОт		
2	3	1	249	16,95	1562,07	22904,44	22944,86	54,86
3	3	2	352	33,33	1786,85	18846,53	18847,48	21,64
4	3	3	497	62,24	1671,72	13354,70	13342,25	27,71
5	3	4	703	108,81	1557,57	10065,30	10072,80	6,90
6	3	5	994	185,63	1358,39	7276,53	7264,01	12,28
7	3	1	249	16,96	1563,47	22922,83		
8	3	2	352	33,30	1787,17	18869,58		
9	3	3	497	62,39	1670,22	13310,50		
10	3	4	703	108,75	1558,82	10078,87		
11	3	5	994	185,93	1355,98	7252,00		
12	3	1	249	16,99	1572,41	23007,30		
13	3	2	352	33,33	1784,58	18826,34		
14	3	3	497	62,24	1672,60	13361,55		
15	3	4	703	108,81	1559,03	10074,24		
16	3	5	994	185,81	1357,24	7263,49		

Рис. 10.13. Закладка «Расчеты и графики».

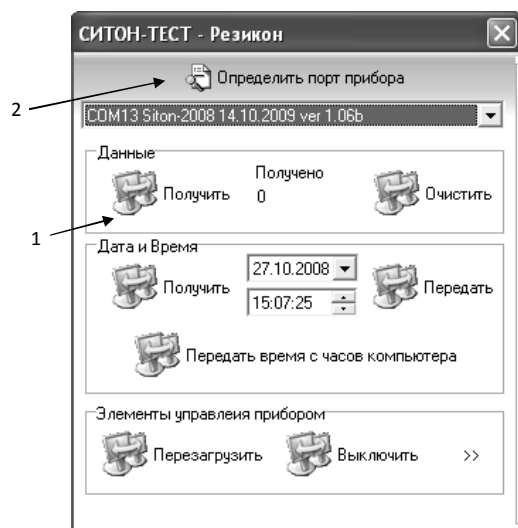


Рис. 10.10 Общий вид программы для получения данных.

Будет предложено указать название файла (рис.10.11), по умолчанию предлагается дата и время сохранения. Сохраните файл. Программа настроена на поставляемый компьютер. При приеме данных с другого компьютера перед получением данных требуется настройка порта, для чего нажать кнопку «Определить порт прибора» (2, рис. 10.10).

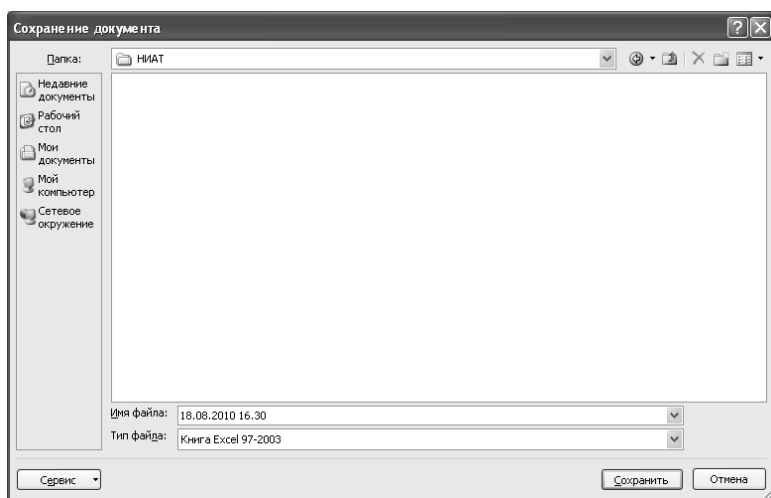


Рис. 10.11.Окно для сохранения данных.

Следующий шаг в разработке методики связан с выбором критериев оценки шероховатости (блок 5). ГОСТом 2789-73, действующим на территории нашей страны, нормирование шероховатости предписано осуществлять с помощью параметрического описания профиля поверхности. Однако для двух зеркальных профилей, приведенных на рис. 2.2, набор параметров практически одинаков, а функциональное свойство будет отличаться существенно. Можно предположить, что отражательная способность будет выше у поверхности, в профиле которой преобладают вершины, а у профиля, где больше впадин световые лучи будут рассеиваться.

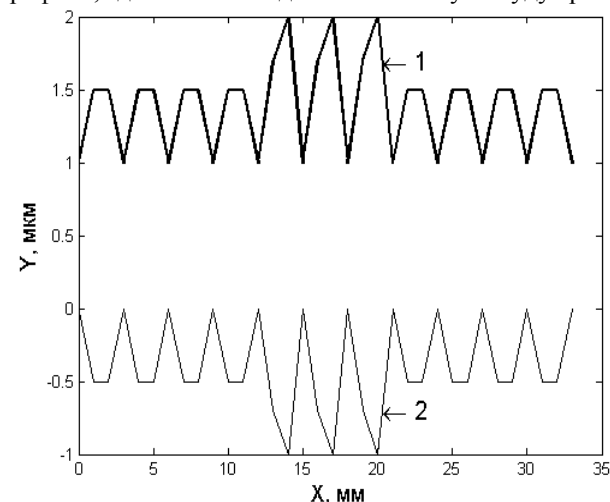


Рис. 2.2. Зеркальные профили поверхности

В качестве наиболее эффективных критериев оценки влияния шероховатости поверхностей на их функциональные свойства В.А.Валетовым предложены графические изображения функций распределения и функций плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей, или – графические изображения самих профилей или микрофотографий поверхностей. Плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона для двух зеркальных относительно оси симметрии $y=0.5$ профилей (рис. 2.2) приведены на рис.2.3.

Из рис.2.3 видно, что непараметрические кривые – плотности распределения ординат и плотности распределения тангенсов углов наклона (tga) двух зеркальных профилей, приведенных на рис. 2, различны, в отличие от набора часто используемых параметров: R_a – среднего арифметического, R_q – среднего квадратичного отклонения профиля, R_{max} – наибольшего отклонения профиля и т.д. Поэтому в рамках разрабатываемой методики как наиболее информативные предложено использовать непараметрические критерии оценки шероховатости, а именно: плотности распределения ординат и плотности распределения тангенсов углов наклона профилей поверхностей.

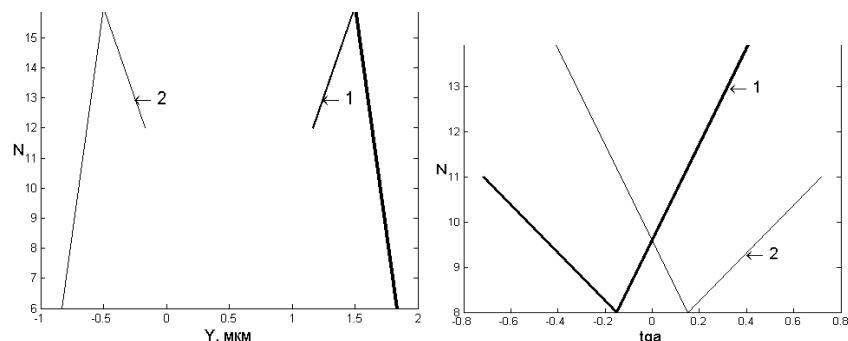


Рис. 2.3. Плотности распределения ординат (зависимость частоты N появления ординат от их величины Y) и тангенсов углов наклона (зависимость частоты N появления тангенсов углов наклона от их величины) в пределах базовой длины профилей для двух их зеркальных отображений.

Согласно алгоритму (рис.2.1) после выбора критериев оценки шероховатости (блок 5) необходимо найти оборудование для построения непараметрических кривых (блок 6). Однако современная контрольно-измерительная аппаратура в большей степени ориентирована на действующие стандарты, поэтому для построения непараметрических кривых предложено произвести измерение шероховатости с сохранением координат профиля поверхности в виде набора дискретных точек (ascii-файла) – опция, предусмотренная в меню любого современного прибора, предназначенного для контроля шероховатости поверхности. Последующая обработка этого файла в прикладных программных пакетах, например, среде МАТЛАБ, позволит построить любые непараметрические критерии (блок 7). В данном случае в качестве оборудования для определения координат профиля поверхности предложено использовать измерительную станцию Hommel Tester T8000, которое обеспечивает и графическое построение функций плотности распределение ординат и тангенсов углов наклона профилей.

Ниже приведен также фрагмент кода программы, разработанной в среде МАТЛАБ, позволяющей:

1. осуществить загрузку файла с расширением .asc

```
P=load('z1.asc','-ascii');
```

2. произвести обращение к столбцам матрицы ascii-файла

```
X=P(:,1);
```

```
Y=P(:,2);
```

3. построить эмпирическую плотность распределения ординат профиля

```
[z,l]=hist(Y,3);
```

экране отображается номер программы, номер текущего измерения, номер шага измерения и значения тока и напряжения (рис.10.9 слева). После измерения номер следующего измениться (рис.10.9 справа).



Рис. 10.9. Индикаторный экран во время (слева) и после измерения.

- Провести ещё 2 (два) измерения. Таким образом, всего будет получено 3 (три) измерения с одной области, что необходимо для корректной работы программы анализа данных.
- Записать в блокноте номера измерений, указываемые в первой строке экрана (четырёхзначная цифра) и описание измеряемого изделия.
- Снять измеряемое изделие, ослабив прижатие ручкой струбины (15).
- При необходимости провести измерения на другом изделии или поверхности изделия.
- В конце всех измерений перенести данные из прибора в компьютер с помощью программы RezikonExcel.

Таблица 10.3

Значения тока и электрического напряжения при установке датчика

Материалы	I, mA	U, мкВ
Стали магнитные	340±10	120±15
Al	340±10	100±10
Ti	340±10	90±10

10.2.3. Работа с программой RezikonExcel

Подсоединить USB-кабель (7, рис.10.6) к прибору и компьютеру. Для приёма данных используется программа RezikonExcel. Открыть на рабочем столе ярлык «СИТОН-ТЕСТ», зайти в папку с названием материала, на котором проводились измерения (Д16, В95, ВНС5, ВТ6). Запустить файл «RezikonExcel»:



В запущенной программе нажмите кнопку «Получить» в секторе «Данные» (1, рис.10.10).

10.2.2. Работа прибора

- Подготовить прибор к работе по п.10.2.1.
- Подвести к датчику измеряемый образец и вращать поворотную ручку струбины (15) с небольшим усилием, чтобы прижать образец к контактам датчика, при этом на экране (6) в первой строке появится значение тока вместо надписи «Проверка датчика», а во второй строке значение электрического напряжения (десятки-сотни мкВ вместо единиц мкВ). Проверить значение тока и напряжения по табл.10.3. В случае несовпадения значений переустановить образец.

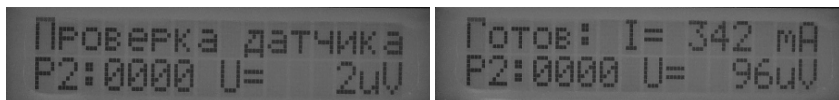


Рис. 10.7. Индикаторный экран до (слева) и после установки образца

- Внутренние контакты подпружинены (рис.10.8), и их регулировка не требуется. Если же во второй строке экрана значение напряжения составляет единицы мкВ, то необходимо вращать ручку датчика (16), чтобы подвести внутренние контакты к поверхности изделия. Контакты считаются не подпружиненными, когда все 4 контакта находятся на одном уровне.



Рис. 10.8. Контакты датчика, внутренние контакты подпружинены.

- Для измерения нажать на кнопку измерения (5), после чего начнётся процесс измерения, в конце которого прозвучит единичный звуковой сигнал. Время измерения составляет 2,5 минут для Программы №1 и 1,5 минут для Программы №2. Во время измерения на индикаторном

4. вывести график непараметрической кривой с подписанными осями в отдельном окне

```
figure(1)
plot(1,z,'black')
hold on
xlabel('Y,мкМ');
ylabel('N',rotation',0);
```

После выбора оборудования и разработки программы построения непараметрических критериев, переходим к экспериментальной части – изготовлению партии образцов на одинаковых режимах (блок 8). Осуществляем измерение шероховатости и функционального критерия. Производим оценку воспроизводимости результатов эксперимента (блок 9). Если использованная технология позволила на одних и тех же режимах технологической обработки получить близкие результаты при построении непараметрических кривых и измерении функционального критерия, то можно переходить к блоку 11. В противном случае, необходимо осуществить поиск более управляемой, более стабильной технологической операции, которая могла бы стать эффективной заменой существующей (блок 10). Оценка однородности полученных результатов (оценку воспроизводимости результатов) можно осуществить с помощью критерия Кохрена.

Если технология признана управляемой, то следует изготовить партию образцов на разных технологических режимах (блок 11) с последующим контролем функционального критерия и построением непараметрических кривых (блок 12). После этого следует оценить корреляцию характера непараметрической кривой с измеренными значениями функционального критерия (блок 13). В случае отсутствия корреляции, следует принять решение об окончании исследования (блок 15). Если же влияние шероховатости на функциональное свойство выявлено (блок 16), то необходимо продолжить исследование и оптимизировать это влияние на базе теории планирования эксперимента (блок 18). Теория планирования эксперимента, например, с реализацией метода Бокса-Уилсона, дает возможность определения технологических режимов, позволяющих получить наивысший уровень оптимизируемого параметра, в роли которого выступает функциональный критерий. А построив непараметрический критерий оценки микрогеометрии поверхности, обеспечивающей экстремум функционального свойства, мы получим критерий оценки шероховатости, соответствующий наивысшему уровню функционального свойства. Накопление таких “эталонных” профилей позволит создать базу данных не только непараметрических кривых, обеспечивающих наивысший уровень функциональных свойств, но и вид технологических операций, а также режимов обработки, позволяющих воспроизвести “эталонный” профиль, а следовательно, и возможный максимум функционального свойства.

Виды и режимы обработки, обеспечившие эталонный профиль (микрорельеф) для интересующего вас функционального свойства поверхности следует реализовывать в техпроцессах изготовления серийной продукции. В дальнейшем при контроле микрогеометрии любого серийного образца достаточно совместить непараметрический критерий оценки его микрогеометрии с аналогичным эталонным для данного функционального свойства критерием (см. рис.2.4). Если графическое изображение критерия оценки микрогеометрии контролируемой поверхности не выходит за пределы допуска относительно эталона, то контролируемую микрогеометрию следует отнести к удовлетворительной. При выходе критерия контролируемой микрогеометрии за пределы допуска изделие следует браковать.

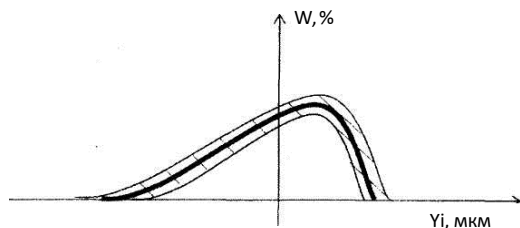


Рис. 2.4. Эталонная плотность распределения ординат профиля с допуском на возможные ее отклонения, где Y_i , мкм – ордината точки профиля, W , % – вероятность ее появления.

Для неответственных случаев в качестве критерия оценки и контроля шероховатости лучше использовать графические изображения опорных кривых (кривых Аббота) или функций распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей, а для ответственных – графические изображения плотностей распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей, а еще лучше – графические изображения самих профилей или микро топографий поверхностей. В последнем случае необходима программа распознавания этих графических изображений с помощью компьютера.

- 1 – прибор, электронный блок;
- 2 – датчик ДУ 26/13-М.
- 3 – разъем для датчика ДУ 26/13-М;
- 4 – индикаторный светодиод;
- 5 – кнопка управления «Пуск/Меню»;
- 6 – индикаторный экран.

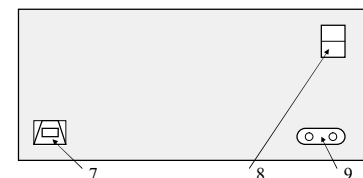


Рис. 10.6,б. Вид прибора со стороны задней панели:

- 7 – USB-разъем для соединения прибора с компьютером;
- 8 – тумблер включения/выключения электропитания;
- 9 – разъем для подсоединения кабеля питания 220В.

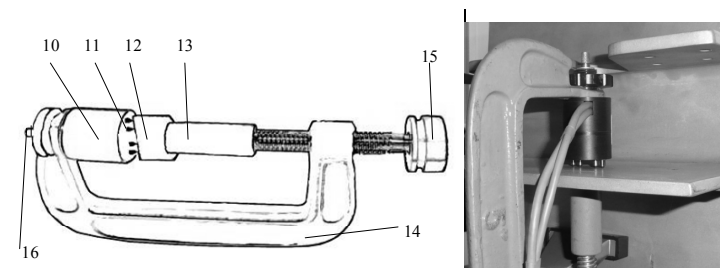


Рис.10.6,в. Датчик с оснасткой на образце и на реальной детали:

- 10 – датчик ДУ 26/13;
- 11 – контакты датчика, инденторы;
- 12 – измеряемый образец;
- 13 – упор, держатель образца;
- 14 – трубка, крепежная оснастка;
- 15 – поворотная ручка упора;
- 16 – поворотная ручка датчика.

- Удалить из памяти прибора все измерения с помощью кнопки «Меню». Для этого вращать кнопку до появления надписи «Очистить Flash» и нажать кнопку. Подтвердить удаление повторным нажатием кнопки.
- Установить необходимую программу измерения (см. табл.10.2) с помощью «Меню». Для этого вращать кнопку до появления надпись «Настройки» и нажать кнопку. Выбрать номер программы вращением кнопки. Подтвердить выбранную программу нажатием кнопки. Через 5 секунд прибор выйдет из меню, при этом в первой строчке экрана будет указан номер выбранной программы (например, P02).
- Прибор готов к измерениям.
- При работе от аккумулятора прибор включить кнопкой (5) на передней панели, удерживая её в течение 2-х секунд. На экране будет указан заряд батареи в процентах.

Таблица 10.2.

Значения глубин (мкм) для различных программ и материалов

	Стали магнитные	Алюминиевые сплавы, стали немагнитные	Титановые сплавы
№ глубины	Программа 1	Программа 2, 3	Программа 2, 3
1	5	39	249
2	7	55	352
3	10	78	497
4	14	111	703
5	19	156	994
6	27		
7	38		
8	54		
9	77		

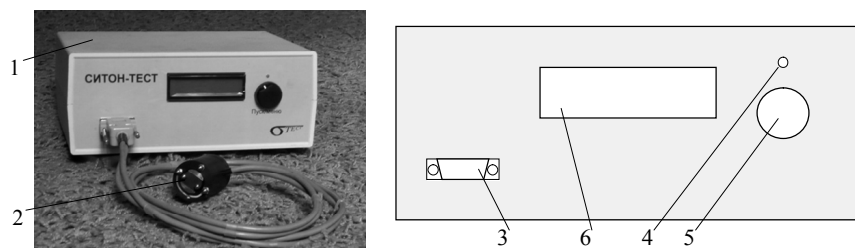


Рис. 10.6,а. Общий вид аппаратуры СИТОН-ТЕСТ с датчиком:

3. Обобщенная методика исследований с использованием непараметрических критериев

Что представляют собой непараметрические критерии? Например, функция плотности распределения ординат или тангенсов углов наклона профиля содержит не менее 95% информации о профиле, а значит, каждой заданной функции соответствует практически только один микрорельеф. Возможное рассеяние микрорельефов для одной заданной функции пренебрежимо мало и не может привести к большому отклонению ожидаемого функционального свойства.

Для менее ответственных случаев в качестве критерия оценки и контроля шероховатости достаточно использовать опорную кривую (кривую Аббота), при наличии более жестких требований – плотность распределения ординат профиля или тангенсов углов его наклона, а лучше всего сам профиль или микрофотографию поверхности. Ниже изложена сущность методики использования непараметрических критериев для улучшения конкретного свойства поверхности, зависящего от ее шероховатости.

Изготавливается определенное количество образцов для испытаний, у которых будут одинаковыми все характеристики, кроме шероховатости испытуемых поверхностей. Последние обрабатываются всеми возможными на предприятии способами и при различных режимах обработки. При этом для каждого образца фиксируются вид и режимы его обработки.

Для исключения влияния наклепа все экспериментальные образцы целесообразно подвергнуть отжигу.

С помощью профилографа-профилометра с функциональных поверхностей каждого образца получаем профили равной длины. С помощью статистической обработки данных о профиле получаем не только R_a и R_z , но и графические изображения опорных кривых (кривых Аббота), плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля и микрофотографию поверхности. Благодаря применению современных приборов вся эта процедура длится несколько секунд, ее результаты сохраняются на жестком диске.

Все образцы подвергаются испытаниям в целях определения необходимого функционального свойства. Если результаты испытаний всех образцов окажутся одинаковыми, значит, шероховатость поверхности не влияет на это свойство, и незачем ее нормировать. Если результаты испытания различны, то определяется образец с лучшим уровнем рассматриваемого функционального свойства.

Графическое изображение кривой Аббота, или график плотности распределения соответствующей функции, или сам профиль поверхности образца, у которого зафиксирован лучший результат, принимается в качестве эталона (см. рис.2.4), а технология изготовления этого образца нормируется в технологическом процессе изготовления детали на производстве.

Соответствие шероховатости поверхностей серийных деталей эталонным значениям проверяется простым совмещением графика функции, полученного для контролируемой поверхности, с эталонным. Если график функции контролируемой поверхности не совпадает с эталоном, деталь бракуется.

В настоящее время доказано существенное влияние шероховатости всего на два десятка функциональных свойств поверхностей. Достаточно присвоить постоянный номер каждому из этих свойств и проставлять его на «знаке» шероховатости вместо используемых сейчас параметров R_a , R_z и т. п.

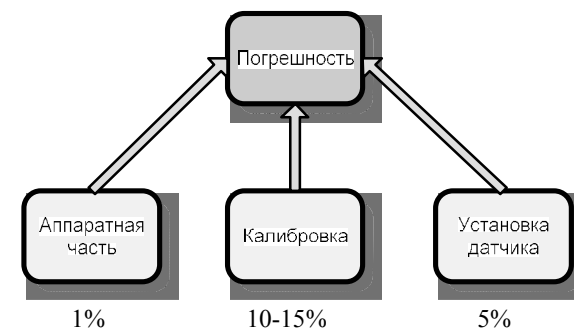


Рис. 10.5. Значения погрешностей различных источников ее появления

Диапазон измерений частот составляет 30...8000 кГц. Причем на края указанного диапазона погрешность около 1%, а в середине 0,4%, ввиду краевых нелинейных эффектов. Для немагнитных материалов глубина изменения начинается от 30...40мкм, чтобы уменьшить такую глубину, необходимо увеличивать частоту засылаемого сигнала, но при этом приближаемся в радиоволновому диапазону и для этого требуется значительно усложнять конструкцию аппаратуры. Поэтому порог чувствительности по глубинам ограничивается по максимально возможной частоте.

10.2. Методика определения напряжений

Изложена разработанная методика определения напряжений и принцип работы измерительного комплекса СИТОН.

10.2.1. Подготовка к работе

- Установить прибор (1, рис.10.6) на устойчивую горизонтальную поверхность.
- Подключить кабель питания прибора в розетку 220В (9).
- Установить датчик (10) в крепежную оснастку (14).
- Подсоединить датчика в разъем (3) прибора.
- Включить прибор электропитание (8), при этом загорятся лампочка (4) и экран (6).
- Оставить прибор во включенном состоянии на 10 минут, после чего провести одно измерение. Для этого установить подвести к датчику любой образец или деталь (12) и нажать кнопку «Пуск» (5). Время измерения 1,5...2,5 минуты. Звуковой сигнал будет сигнализировать окончание измерения.

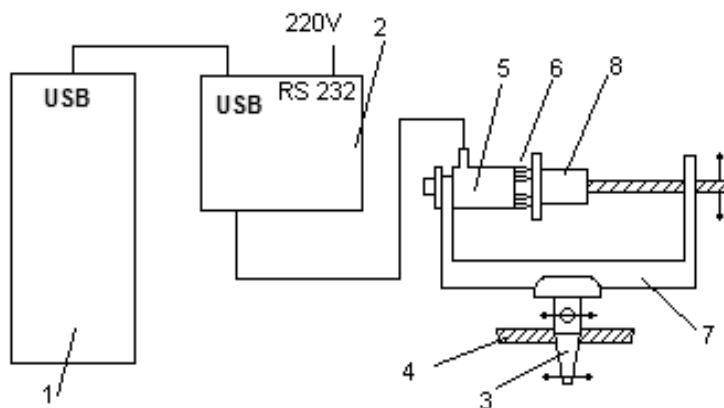


Рис. 10.4. Схема соединения аппаратуры СИТОН-ТЕСТ с датчиком и компьютером: 1 – компьютер; 2 – прибор СИТОН-ТЕСТ; 3 – тиски; 4 – рабочая поверхность; 5 – датчик ДУ 26/13; 6 – образец; 7 – струбцина; 8 – наконечник диэлектрический

При определении остаточных напряжений возникают погрешности, которые можно разбить на три составляющие (рис.10.5). Аппаратная (за счет особенностей электронных компонентов) часть не превышает 1% от абсолютного значения ОН (систематическая погрешность). Установка датчика происходит вручную и появляется влияние человеческого фактора, например недостаточной силой прижатия, и этот фактор эмпирически оценивается в 5% (случайная погрешность). Самая большая погрешность появляется при применении калибровки от разрушающего метода Давиденкова-Биргера, который используется на данный момент. Именно этот разрушающий метод дает погрешность 10-20% (случайная погрешность). Таким образом, общая погрешность метода составляет около 20%. При этом, с увеличением глубины погрешность будет уменьшаться, поскольку ОН имеют тенденцию уменьшаться до нуля. Тем не менее наиболее информативная область находится на глубине 0...200 мкм, к которой и относится вышеуказанная погрешность. Некоторые корреляционные показатели будут описаны в следующей главе при измерении ОН на авиационных деталях из жаропрочных сплавов.

4. Разработка методики оценки влияния шероховатости растрового рисунка на оптические свойства бериллиевого ротора гироскопа

Для оптико-электронных систем съема информации с таким узлом, как ротор электростатического гироскопа, важной задачей является создание рисунка заданной контрастности.

При этом контрастность рисунка, описываемая приведенным ниже соотношением, определяется разностью коэффициентов отражения базовой поверхности R_b и раstra R_r , полученного локальной модификацией базовой поверхности:

$$K = \frac{R_b(\lambda) - R_r(\lambda)}{R_b(\lambda) + R_r(\lambda)}, \quad (4.1)$$

где R_b и R_r – коэффициенты отражения бериллиевой и растровой поверхности соответственно, λ – рабочая длина волны, определяемая условиями функционирования оптической системы съема информации и составляющая 860 нм.

В качестве существующего метода локальной модификации поверхности, позволяющего создать растр с требуемым уровнем контрастности, используется метод электрохимического травления.

Статистические данные, свидетельствуют о разбросе показателей контрастности рисунка в пределах от 0,5 до 0,9 при стабильном уровне коэффициента отражения доведенной поверхности бериллия $R_b=0,42$. При этом в технологии изготовления шероховатость рисунка не нормируется. Контроль шероховатости предусмотрен лишь до операции по нанесению рисунка после финишной доводки зеркального ротора. Этот факт послужил основанием исследования влияния шероховатости растрового рисунка на оптические свойства ротора, нормируемые коэффициентом отражения раstra R_r .

Для оценки этого влияния разработана методика исследования на базе алгоритма, подробно описанного в предыдущем разделе.

Согласно алгоритму разработка методики исследования влияния шероховатости растров на оптические свойства ротора начинается с выбора функционального свойства и нормирующего его критерия. В качестве функционального свойства выступает отражательная способность или оптическое свойство, поэтому его нормирование логично осуществлять с помощью коэффициента отражения раstra R_r . Оборудованием, позволяющим произвести контроль указанного параметра, является микроскоп-спектрофотометр. В качестве критериев оценки шероховатости предложено использовать непараметрические кривые, а именно: эмпирические плотности распределения тангенсов углов наклона. Построение этих кривых предложено осуществлять в среде МАТЛАБ на базе координат профиля, полученных на профилографе Hommel Tester T8000.

После выбора функционального критерия и критериев оценки шероховатости следует изготовить партию образцов на одних и тех же режимах для оценки управляемости применяемого на производстве метода нанесения рисунка.

В результате эксперимента была выявлена недостаточная управляемость электрохимии при нанесении рисунка, так как шероховатость растров, нормируемая непараметрическими кривыми, и коэффициенты отражения отличались существенно.

Вывод: для оптимизации влияния шероховатости на отражательную способность раstra необходим поиск эффективной, более управляемой технологии создания растрового рисунка.

данные измерений остаются в памяти до момента удаления их вручную с помощью специального меню прибора.

При измерении остаточных напряжений используется датчик, который присоединяется к прибору и устанавливается в специальную оснастку в соответствии со схемой на рис.10.4.

Таблица 10.1

Принятые данные из прибора после двух измерений

№ измерения	Дата измерения	Время измерения	Частота, Гц	Амплитуда сигнала, у.е.	I, мА	U, мкВ
102	07.04.2009	19:10:02	8000000	16250	51	1833
102	07.04.2009	19:10:02	4000000	16250	90	2239
102	07.04.2009	19:10:02	2000000	16250	164	2163
102	07.04.2009	19:10:02	1000000	16250	329	2078
102	07.04.2009	19:10:02	500000	16250	591	1862
102	07.04.2009	19:10:02	250000	16250	921	1504
102	07.04.2009	19:10:02	125000	16250	1311	1119
102	07.04.2009	19:10:02	62500	16250	1618	732
102	07.04.2009	19:10:02	31250	16250	1735	427
103	07.04.2009	19:10:53	8000000	16250	51	1833
103	07.04.2009	19:10:53	4000000	16250	89	2241
103	07.04.2009	19:10:53	2000000	16250	164	2164
103	07.04.2009	19:10:53	1000000	16250	327	2079
103	07.04.2009	19:10:53	500000	16250	592	1864
103	07.04.2009	19:10:53	250000	16250	921	1502
103	07.04.2009	19:10:53	125000	16250	1309	1117
103	07.04.2009	19:10:53	62500	16250	1620	732
103	07.04.2009	19:10:53	31250	16250	1735	426

и частоты и измерения сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряжённого состояния образца. Глубина исследования обратно пропорциональна корню квадратному из частоты. Засылка электромагнитного поля и приём сигнала-отклика осуществляются, соответственно, внешними и внутренними парами электродов датчика. После предварительного усиления сигнал поступает в переносной модуль, который автоматически управляет частотой и амплитудой возбуждающего поля и осуществляет первичную обработку принятого сигнала с записью результата в ячейку памяти. Считывание, обработка, расчет данных, а также построение эпюры распределения остаточных напряжений в измеряемом образце происходят с помощью компьютерной программы, обеспечивающей работу аппаратуры.

Полностью изготовленное и собранное устройство СИТОН-ТЕСТ представлено на рис.10.3. Название СИТОН расшифровывается как Скан Идентификатор Технологических Остаточных Напряжений.



Рис. 10.3. Внешний вид аппаратуры СИТОН-ТЕСТ

В приборе имеется программируемый микропроцессор, с помощью которого можно выбирать требуемое количество частот, а соответственно, требуемое количество глубин измерения. Время измерения на одной глубине составляет около 15 секунд. Для получения данных, например, с 5/9-ти глубин потребуется, соответственно, 75/135 секунд. Полученные значения последовательно записываются в память прибора и можно приступать к следующему измерению. После проведения требуемых измерений данные из прибора через USB-порт поступают в компьютер и сохраняются в специальной базе данных, работа с которой осуществляется с помощью специальной программы.

Далее происходит сортировка данных по протоколам. В табл.10.1 показан пример сохраненных данных двух измерений по 9 глубинам, которые в дальнейшем пересчитываются в зависимость ЭУС от глубины. Для удобства использования каждые сутки нумерация измерений обнуляется, а

5. Теоретические аспекты планирования эксперимента при оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей

На сегодняшний день известно порядка 20 функциональных свойств, на которые шероховатость оказывает существенное влияние. Если имеется корреляция шероховатости с функциональным свойством, то это влияние следует оптимизировать. Оптимизация влияния шероховатости на функциональное свойство означает экспериментальный поиск технологических режимов, позволяющих получить оптимум функционального критерия, а шероховатость поверхности образца, изготовленного на технологических режимах, соответствующих лучшему из рассмотренных (исследованных) значений функционального критерия, и есть эталонная или оптимальная шероховатость. Технологию изготовления образца, показавшего лучший результат, следует зафиксировать в рабочем техпроцессе изготовления изделия, а шероховатости функциональных поверхностей серийных деталей осуществлять по непараметрическим критериям оценки шероховатости, полученным для этого лучшего образца. Несмотря на неэффективность существующего стандарта на шероховатость поверхностей деталей, его выполнение в плане нормирования шероховатости, к сожалению, обязательно. Поэтому на чертежах следует проставлять значения стандартных параметров шероховатости, полученных на лучшем из рассмотренных образцов, но контроль шероховатости серийной продукции следует производить по непараметрическим критериям оценки шероховатости этого лучшего образца.

В качестве теоретической основы задачи оптимизации, подразумевающей поиск оптимальных условий, предложено использовать метод Бокса-Уилсона (метод «крутого восхождения»), позволяющий на основе малого количества опытов построить математическую модель процесса линейного типа с последующим целенаправленным приближением к искомому оптимуму в направлении наискорейшего подъема или спуска в факторном пространстве за счет одновременного взаимосвязанного пошагового изменения значимых факторов с использованием результатов предыдущих опытов.

К достоинствам метода относятся:

- целенаправленный поиск области оптимума;
- осуществление движения к оптимуму кратчайшим путем;
- повышение точности метода при увеличении числа действующих факторов;
- возможность одновременного варьирования всеми значимыми факторами, позволяющего сократить общее количество опытов.

В качестве критерия оптимизации предложено использовать функциональный критерий, описывающий функциональное свойство, легко нормируемый и контролируемый, например, коэффициент отражения поверхности рисунка.

В качестве значимых факторов (обозначим их как x_i), влияющих на функциональный критерий, будем рассматривать управляемые режимы технологической обработки. Например, для коэффициента отражения рисунка – оптимизируемого критерия (обозначим его как y), полученного методом электрохимического травления, управляемыми факторами будут: ток, напряжение, концентрация электролита, время выдержки и т.д. Следует отметить, что температура в помещении также влияет на качество создаваемого рисунка, но это нерегулируемая величина, поэтому фактором не является.

На рис.5.1 приведена математическая модель объекта исследования, которую в аналитическом виде можно представить как $y = f(x_1, \dots, x_n)$



Рис. 5.1. Схематическое представление объекта исследований

После выбора критерия оптимизации и основных влияющих факторов, оцениваются границы областей определения факторов, задаваемые либо принципиальными ограничениями, либо технико-экономическими соображениями, либо конкретными условиями течения процесса. Установление области связано с тщательным анализом априорной информации об изменении критерия оптимизации. При этом каждый фактор может принимать несколько значений, называемых уровнями. Рассмотрим простейший случай полнофакторного эксперимента типа 2^k , где 2 – это число уровней, принимаемых каждым фактором, а k – число факторов. Тогда общее число опытов составит $N = 2^k$. В этом случае построение плана эксперимента (часто называемого матрицей планирования) сводится к выбору экспериментальных точек, симметричных относительно основного уровня. Основным уровнем – это набор значений факторов, полученный в ходе предварительных экспериментов, позволивший получить наиболее близкое к желаемому (в рамках уже проведенных экспериментов) значение критерия оптимизации. Уровни, симметричные относительно основного уровня, называются верхним и нижним уровнем фактора. Они получаются прибавлением и вычитанием интервала варьирования (интуитивно назначаемого экспериментатором на основе априорной информации) к основному уровню. Для упрощения записи условий эксперимента в матрице планирования верхний уровень обозначают +1, а нижний -1. Представления

зависимости ЭУС в распределение механических напряжений по глубине исследуемого изделия.

Способ осуществляется следующим образом. Через подающие электроды 3, 3' датчика 2 на поверхность изделия 8 подают переменный ток последовательности различных частот f_i . С приемных электродов 4, 4' датчика 2 снимается напряжение сигнала-отклика. В измерителе 5 производится выделение и измерение поданного в изделие тока и синфазной этому току составляющей напряжения сигнала-отклика. Аналоговые сигналы с выхода измерителя поступают в преобразователь 6, с выхода которого цифровые коды, соответствующие измеренным величинам тока I_i и напряжения U_i , поступают в компьютер 7, где производятся все необходимые расчёты.

Схему разрабатываемого устройства также можно представить следующим образом (рис.10.2).

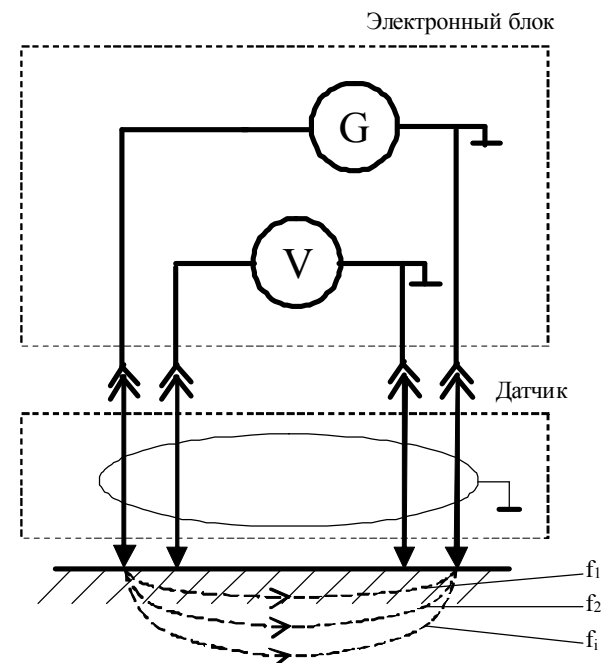


Рис.10.2. Схема разрабатываемой аппаратуры:
G – генератор, формирующий задающий сигнал переменной частоты; **V** – вольтметр, определяющий сигнал-отклик электрического напряжения; f_i – частота сигнала, определяющая глубину залегания тока.

Принцип работы заключается в послойном исследовании образца металла путём засылки в него электромагнитного поля различной амплитуды

10. Средство измерения СИТОН-ТЕСТ напряжённого состояния в поверхностном слое металла

10.1. Принцип работы измерительного комплекса СИТОН

Устройство, с помощью которого можно реализовать описываемый в главе 2 способ (рис.10.1), содержит источник 1 переменного тока, датчик 2 с двумя парами электродов 3, 3' и 4, 4', измеритель 5 тока и напряжения синфазной с этим током составляющей выходного напряжения датчика, преобразователь 6 сигнала, компьютер 7. Датчик установлен на испытуемом изделии 8.

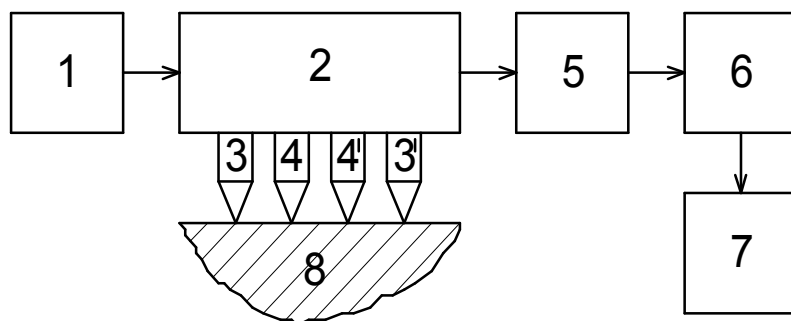


Рис. 10.1. Блок-схема устройства для определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов:

1 – источник переменного тока различных частот; 2 – датчик;

3 и 3' – подающая пара электродов; 4 и 4' – приёмная пара электродов;

5 – измеритель тока и напряжения; 6 – преобразователь сигнала;

7 – компьютер; 8 – испытуемое изделие

Выход источника 1 переменного тока соединен с входом датчика 2, имеющего две пары электродов: 3, 3' (подающая) служит для подачи тока в исследуемое изделие, 4, 4' (приемная) – для измерения напряжения сигнала-отклика на участке между приемными электродами. Выход датчика 2 подключен к измерителю 5, выход которого соединен с входом преобразователя сигнала 6, с выхода которого цифровые коды измеренных тока и напряжения поступают на вход компьютера 7, где производится расчет ЭУС, его распределения по глубине изделия и преобразование снятой

основных уровней и интервалов варьирования трех факторов рассмотренного выше примера приведены в табл.5.1. В табл.5.1 приведен пример выбора уровней (базового, верхнего и нижнего) и интервалов варьирования для каждого фактора. В качестве базового уровня были взяты существующие режимы создания рисунка методом электрохимического травления, определяемые концентрацией электролита 10%, величиной тока 160 мА и напряжения 20 В.

Таблица 5.1.

Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов		
			Верхний (+)	Базовый (0)	Нижний (-)
Концентрация электролита, %	X ₁	5	15	10	5
Ток, мА	X ₂	20	180	160	140
Напряжение, В	X ₃	5	25	20	15

Интервалы варьирования факторов были назначены экспериментатором исходя из априорной информации. Так, например, для концентрации электролита, известно, что при концентрации менее 5% рисунок на поверхности бериллия неотчетлив. Таким образом, нижний уровень фактора X₃ определяется минимально допустимой величиной концентрации электролита, позволяющей получить рисунок. Далее определяется интервал варьирования для концентрации как разность значений базового и нижнего уровней, он равен 5%. Тогда верхний уровень получается путем сложения значений базового уровня и интервала варьирования и составляет 15%.

Пример матрицы планирования для k=3, представляющей собой всевозможные комбинации уровней трех факторов, представлен в табл.5.2.

Таблица 5.2.

Номер опыта	x ₁	x ₂	x ₃	Буквенные обозначения	Y
1	-1	-1	+1	C	y ₁
2	-1	+1	-1	B	y ₂
3	+1	-1	-1	A	y ₃
4	+1	+1	+1	Abc	y ₄
5	-1	-1	-1	(1)	y ₅
6	-1	+1	+1	Bc	y ₆
7	+1	-1	+1	Ac	y ₇
8	+1	+1	-1	Ab	y ₈

Примечание: опыт со всеми факторами на нижних уровнях условимся обозначать (1).

На базе плана эксперимента (табл.5.2) проводится серия опытов. Например, при электрохимическом методе создания рисунка в качестве факторов предложено рассматривать концентрацию электролита, ток и напряжение. Каждый из факторов имеет верхний и нижний уровень,

заданный симметрично относительно основного уровня, например определяемого режимами, используемыми в рамках действующего технологического процесса (табл.5.1). После нанесения рисунка по режимам, приведенным в табл.5.2, проводятся измерения коэффициентов отражения (y_i в табл.5.2) и осуществляется измерение шероховатости поверхности каждого опытного образца.

Следует отметить, что для оценки повторяемости, каждый опыт должен быть проведен не менее 2-х раз. Повторные опыты в теории планирования называют параллельными (обозначаются n). После проведения опытов при наличии грубых наблюдений нужно сначала их исключить, а затем продолжить исследования.

Далее осуществляется расчет коэффициентов в уравнении, связывающем оптимизируемый фактор y с факторами или режимами обработки по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, j = 0, 1, \dots, k, \quad b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (5.1)$$

где x_{ji} – кодированные значения x из матрицы планирования (табл.5.2);

y_i – фактические значения критерия оптимизации, например коэффициенты отражения, занесенные в матрицу планирования (табл.5.2);

i – счетчик строк в матрице планирования;

j – счетчик столбцов в матрице планирования.

Рассчитаем коэффициент b_1 на основе данных таблицы 2 и приведенной выше формулы, получим:

$$b_1 = \frac{(-1) \cdot y_1 + (-1) \cdot y_2 + (+1) \cdot y_3 + (+1) \cdot y_4 + (-1) \cdot y_5 + (-1) \cdot y_6 + (+1) \cdot y_7 + (+1) \cdot y_8}{8}$$

В результате расчета коэффициентов b_i , получается уравнение вида:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_k \cdot x_k, \text{ называемое уравнением регрессии.}$$

После этого производится статистический анализ, включающий ряд этапов.

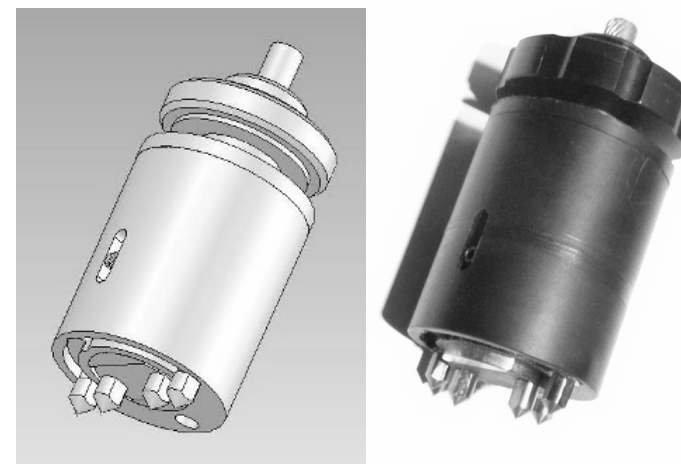
1. Расчет дисперсии опыта или дисперсии среднего по строкам, которая осуществляется по формуле

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2 \quad (5.2),$$

где $\bar{y}$ – среднее арифметическое критерия оптимизации, равное сумме всех отдельных результатов, деленное на количество параллельных опытов.

2. Проверка гипотезы об однородности дисперсий, выполняемая по критерию Кохрена. Этот критерий пригоден для случаев, когда во всех точках имеется одинаковое число повторных опытов, количество дисперсий больше двух и одна дисперсия значительно превышает остальные. При этом подсчитывается дисперсия в каждой горизонтальной строке матрицы планирования по формуле (5.2), а затем из всех дисперсий находится

внешних/внутренних инденторов. Изображения датчика представлены на рис.9.7.



**Рис. 9.7. Датчик в сборе:
3-х мерная модель датчика (слева) и его реализация (справа).**

Принятая конструкция датчика имеет максимальную помехозащищенность. Базы внешних и внутренних инденторов выполнены постоянными, что также уменьшает погрешность измерения. При этом лифтовая система перемещения внутренних инденторов позволяет устанавливать датчик на плоский, выпуклые и вогнутые поверхности.

приёмных электродов выбирается меньше разности подающих электродов что обеспечивает:

- измерение напряжения сигнала отклика в менее градиентном поле электродов подающих ток, что способствует увеличению помехозащищённости аппаратуры;
- увеличение разрешения при исследовании поверхности изделия.

На основании предложенных критериев для одного из вариантов конструкции датчика разности подающей (токовой) пары был выбран в два раза больше разности приёмной пары. При этом максимальная глубина исследования оказалась примерно равной разности приёмной пары т. е. область исследования датчика стала близкой к изометричной что улучшает представительность измерений на низких частотах.

Схожий принцип в конструировании датчиков применяется в геологии, например, в методе электроразведки основанном на изучении электрических полей создаваемых естественно или искусственно поляризованными геологическими образованиями (рис. 9.6).

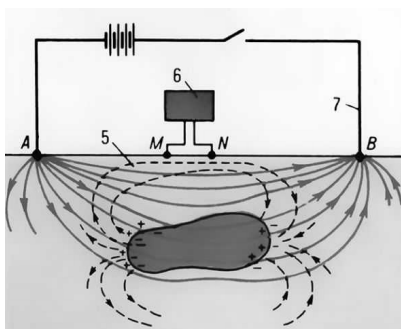


Рис. 9.6. Схема возникновения электрического поля в методе вызванной поляризации: 1 - токовые линии первичного поля; 2 - зона восстановления; 3 - зона окисления; 4 - уровень грунтовых вод; 5 - токовые линии вторичного поля; 6 - измерительная линия; 7 - питающая линия

Был выбран 4-х контактный метод, поскольку тем самым исключается влияние оксидной пленки измеряемой детали. Внешними инденторами засылается сигнал, а внутренними принимается падение напряжения, используя в дальнейшем значения создаваемого тока. Это позволяет уйти от зависимости влияния плёнки при измерении сопротивления напрямую, что особенно актуально для двух контактных методов и нет необходимости «дырять» оксидный слой, нарушая качество поверхности [36].

Для обеспечения необходимого качества контакта реализован контроль на дисплее прибора показывающий заданные значения тока/напряжения для

наибольшая $s_{\max}^2$, которая делится на сумму всех дисперсий. Критерий Кохрена – это отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2}, \quad (5.3)$$

где $s_{\max}^2$ – наибольшая дисперсия опытов;

s_i^2 – дисперсия каждого опыта;

i – номер опыта;

N – число опытов.

С этим критерием связаны числа степеней свободы $f_1=n-1$ и $f_2=N$. Гипотеза об однородности дисперсий подтверждается, если экспериментальное значение критерия Кохрена не превышает табличного значения.

3. Расчет дисперсии эксперимента или дисперсии воспроизводимости, определяемой формулой:

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}, \quad (5.4)$$

где s_i^2 – дисперсия каждого опыта;

i – номер опыта;

N – число опытов.

4. Оценка дисперсии коэффициентов регрессии:

$$s^2\{b_j\} = \frac{s^2\{y\}}{N}, \quad (5.5)$$

где $s^2\{y\}$ – дисперсия эксперимента, равная сумме дисперсий опытов;

j – номер фактора;

N – число опытов.

5. Проверка адекватности модели по критерию Фишера или F-критерию, согласно выражению:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{y\}}, \quad (5.6)$$

где $s^2\{y\}$ – дисперсия эксперимента;

s_{ad} – остаточная дисперсия или дисперсия адекватности, определяемая:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}{f}, \quad (5.7)$$

где y_i – экспериментальные значения критерия оптимизации, полученные в ходе опытов, занесенные в матрицу планирования (табл.5.2.);

$\hat{y}$ – расчетные значения критерия оптимизации, полученные на основе уравнения регрессии по данным матрицы планирования эксперимента (табл.5.2.);

i – счетчик строк в матрице планирования;

f – число степеней свободы.

Запомните правило: в планировании эксперимента число степеней свободы для дисперсии адекватности равно числу различных опытов N , результаты которых используются при подсчете коэффициентов регрессии, минус число определяемых коэффициентов:

$$f = N - (k + 1), \quad (5.8)$$

где k – число факторов; N – число опытов.

Если рассчитанное значение F -критерия не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Следующий этап – интерпретация результатов, где осуществляется оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии и определяется, достигнуто ли положение оптимума.

Коэффициент уравнения регрессии b_j считается значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Доверительный интервал задается верхней и нижней границами $b_j + \Delta b_j$ и $b_j - \Delta b_j$, где Δb_j определяется следующим образом:

$$\Delta b_j = \pm \frac{ts\{y\}}{\sqrt{N}}, \quad (5.9)$$

где $s^2\{y\}$ – дисперсия эксперимента;

N – число опытов;

t – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялась $s^2\{y\}$ и выбранном уровне значимости (обычно 0,05).

В случае, если модель признана адекватной, все коэффициенты уравнения регрессии значимы и положение оптимума достигнуто, то матрица планирования позволяет извлечь следующую информацию.

Во-первых, значение оптимального критерия оптимизации y или значение функционального критерия.

Во-вторых, режимы, на которых был получен желаемый оптимум функционального критерия.

В-третьих, определив шероховатость поверхности, задающей оптимальное значение функционального критерия, мы можем получить эталонные непараметрические кривые, соответствующие интересующему функциональному свойству.

Фиксирование непараметрических кривых поверхностей, полученных в ходе экспериментов, описанных матрицей планирования, но не соответствующих оптимальному или экстремальному значению критерия оптимизации, позволит накапливать базу данных непараметрических кривых, описывающих разный уровень функционального критерия с сохранением режимов и технологических методов его получения.

электродов внутри каждой пары а также величинами разносов электродов в парах – расстояниями между центрами электродов.

Области контактов токовых электродов с поверхностью изделия являются областями с максимальными неоднородностями плотности тока в изделии. Поэтому измеряемые сигналы-отклики также весьма подвержены влиянию этих неоднородностей что понижает помехозащищенность устройства. Кроме того, глубина исследования материала на низких частотах тем больше чем больше расстояние между токовыми электродами. Если нужно исследовать среду глубже то необходимо увеличивать расстояние между электродами но при этом детальность исследования (разрешение) теряется (разрешение тем лучше чем меньше разнос приёмных электродов). Налицо противоречие между требованиями обеспечения достаточной глубины и детальности исследования.

Компромиссное решение упомянутого противоречия приводящее к увеличению устойчивости измерений связанной с влиянием расположения датчика на поверхности неоднородного по электрическим свойствам изделия заключается в том что взаимное расположение подающей и приёмной пар электродов должно удовлетворять следующему требованию: оси разноименных пар электродов должны пересекаться в середине их разносов (в частном случае совпадения осей должны совпадать и середины разносов). На рис.9.5 изображено возможное взаимное расположение электродов датчика предлагаемого устройства на плоскости исследуемого изделия: а- ось подающих электродов; б- ось приёмных электродов; О- точка пересечения осей- середина разносов.

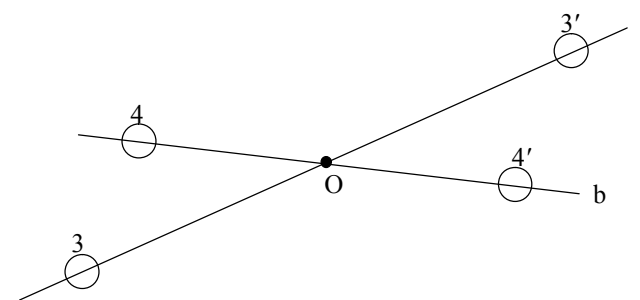


Рис. 9.5. Взаимное расположение электродов датчика на плоскости исследуемого изделия:

а- ось подающих электродов б- ось приёмных электродов О- точка пересечения осей – середина разносов

Разнос подающих электродов выбирается из соображения получения необходимой глубины проникновения поля (тока) в изделие а разнос

Приведенные примеры доказывают работоспособность описываемого способа и устройства для его реализации. Способ позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние изделий из металлов и сплавов без их разрушения, экологически чисто, быстро и экономично. На его основе можно осуществлять контроль стабильности технологий, неразрушающий контроль ответственных изделий, прогнозирование остаточного ресурса высоконагруженных узлов машин и т.д.

При исследовании деталей можно выбирать необходимые глубины исследований. Причём для разных материалов глубины могут отличаться. В табл.9.1 представлены рассчитанные значения глубин для различных частот засылаемого сигнала.

Таблица 9.1

Частотно-глубинная зависимость (10^{-6} м)

Частота, Гц	Cu	Al	3X13	X17
16777216	15,9	20,2	2,9	3,1
8388608	22,5	28,5	4,2	4,4
4194304	31,8	40,3	5,9	6,3
2097152	44,9	57,0	8,3	8,9
1048576	63,6	80,6	11,7	12,5
524288	90,0	114,0	16,6	17,7
262144	127,1	161,2	23,5	25,1
131072	179,8	228,0	33,2	35,4
65536	254,3	322,4	46,9	50,1
32768	359,6	456,0	66,4	70,9
16384	508,6	644,9	93,9	100
8192	719,2	912,0	133	142
4096	1020	1290	188	200
2048	1440	1830	266	284
1024	2030	2580	375	401
512	2880	3650	531	567

9.2. Особенности конструкции первичных преобразователей

Теперь, когда теоретическое обоснование способа можно считать выполненным, следует обосновать выбор технических решений при конструировании первичного преобразователя (датчика) и схемы реализации принятого способа измерений

Датчик имеет две пары электродов (подающую и приёмную) конструкция которых определяет основные характеристики устройства. Взаимное расположение двух пар электродов на плоскости измерений характеризуется положением осей этих пар т.е. прямых соединяющих центры

6. Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей.

На сегодняшний день актуальна задача создания единой информационной модели, позволяющей в упорядоченном виде хранить данные (координаты профиля), с помощью которых можно построить графические изображения непараметрических кривых, описывающих оптимальную микрогеометрию поверхностей для конкретных функциональных свойств изделия. При этом поиск оптимальной микрогеометрии подразумевает экспериментальное определение наилучшей микрогеометрии для конкретного функционального свойства на базе теоретических основ планирования эксперимента.

База данных, содержащая непараметрические критерии оценки микрогеометрии функциональных поверхностей, позволит:

- накапливать информацию по виду непараметрических кривых для конкретных функциональных свойств;
- получать сведения о виде оборудования и инструменте, режимах резания и материале, необходимых для получения оптимальной микрогеометрии, описывающей интересующее функциональное свойство.

В основу разработки базы данных (БД) положена структурно-логическая схема, представленная на рис.6.1.

Из схемы видно, что условно в БД выделены три информационных блока: конструкторский, технологический и метрологический. Каждый блок несет специфическую информацию. Например, в конструкторском содержатся характеристики, определяемые конструктором: марка материала, форма детали или узла, а также ее наименование; технологический — перечень двух последних операций, так как именно на этом этапе формируется рабочий микрорельеф поверхности детали или узла; наименование и марка станка и инструмента, а также режимы обработки— эти данные необходимы для поиска и технологического обеспечения оптимальной микрогеометрии. Немаловажным является блок, содержащий дополнительную информацию об обработке, например сведения о дисперсности притирочных паст, которая во многом определяет свойства полученного в процессе доводки микрорельефа.

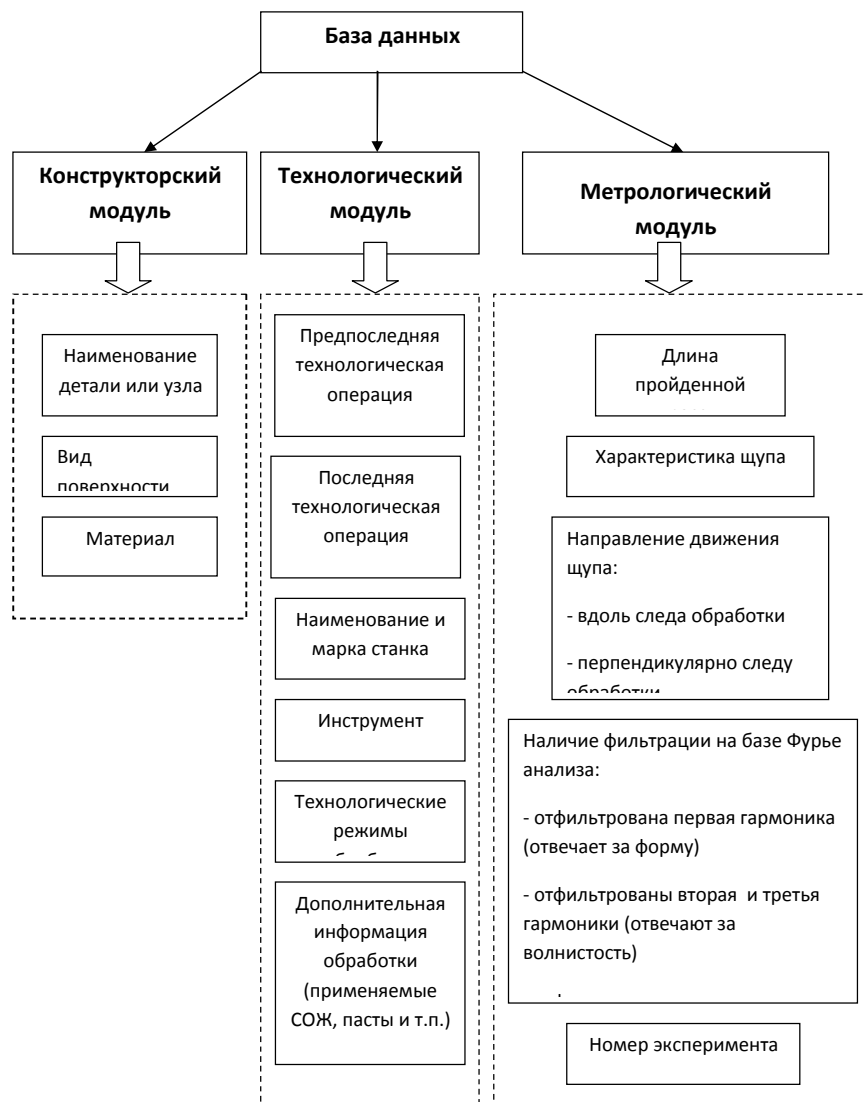


Рис. 6.1. Структурно-логическая схема построения БД

Последний блок содержит метрологическую информацию, а именно: данные о длине пройденной трассы в процессе определения микрогеометрии контактно-щуповым методом, радиус использованного щупа, направление движения щупа, информацию о произведенной фильтрации. При этом все блоки объединяет конкретное функциональное свойство.

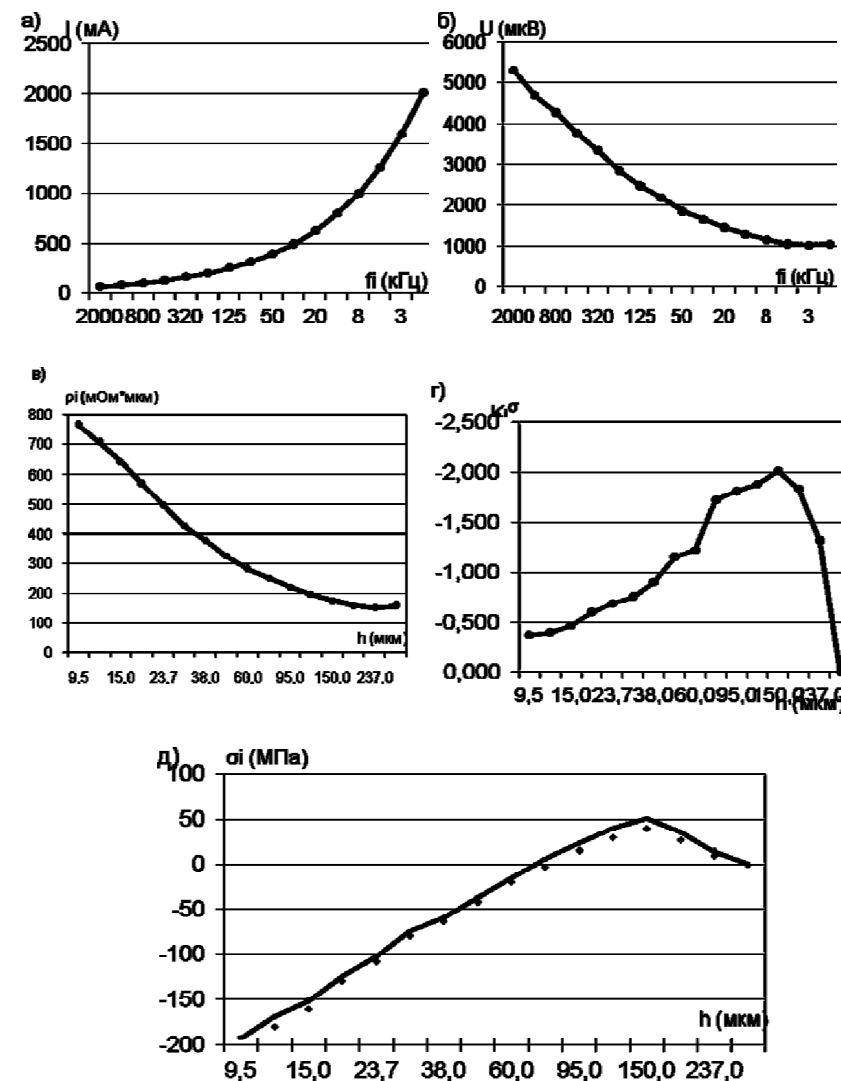


Рис. 9.4. Пример поэтапной работы устройства для определения механических напряжений в турбинной лопатке: а) и б) результаты измерения тока и напряжения в диапазоне рабочих частот; в) вычисленное распределение ЭУС по глубине поверхностного слоя; г) кривая калибровочных коэффициентов; д) вычисленная эпюра остаточных напряжений в лопатке, там же нанесены данные разрушающего контроля (•)

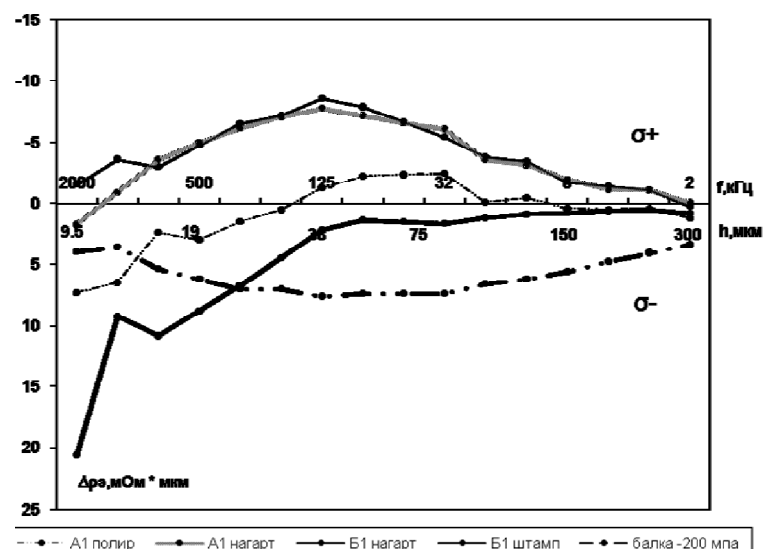


Рис. 9.3. Зависимости приращения эффективного удельного сопротивления ρ , от частоты f и от толщины h поверхностного слоя для различных технологий обработки поверхности образцов сплава ЭП866

Графический интерфейс разработанной базы данных представлен на рис.6.2.

Рис. 6.2. Графический интерфейс БД

Спроектированное приложение позволяет вести учет проводимых экспериментов, регистрировать новые классификаторы, осуществлять поиск в базе данных по частичным критериям. В дальнейшем предполагается расширить функционал большей интерактивностью, возможностью совмещения измеренного профиля с эталонным профилем для конкретного функционального свойства.

Созданная БД позволит накапливать и хранить сведения по виду непараметрических кривых, соответствующих определенному уровню функционального свойства, способу их технологического обеспечения и метрологического контроля, что играет важную роль в процессе оптимизации микрогеометрии поверхностей для их функциональных свойств при решении проблемы повышения качества изделий.

7. Разработка программы в среде МАТЛАБ для обработки профилей и анализа микрогеометрии поверхностей

В настоящее время применение программных пакетов, высокоуровневых языков, интерактивных сред позволяет значительно расширить возможности обработки и анализа данных. Среди большого числа пакетов прикладных программ система MATLAB занимает особое место. Первоначально ориентированная на исследовательские проекты, система в последние годы стала рабочим инструментом не только ученых, но также инженеров-разработчиков и студентов. Особенно широко, эффективно и эффективно система MATLAB применяется в области обработки сигналов. Пр продемонстрируем это на примере задачи обработки и анализа координат профиля поверхности.

7.1. Фильтрация профиля

В силу ряда многочисленных и часто независимых причин профиль поверхности следует рассматривать как реализацию случайной функции, полученную наложением шероховатости, волнистости и отклонения от идеальной формы (рис.7.1).

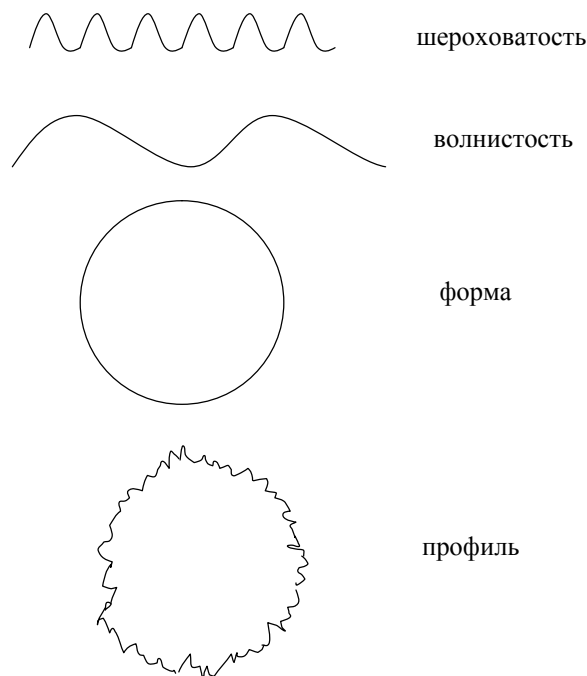


Рис. 7.1. Компоненты профиля поверхности

На рис.9.2,а приведен типичный график зависимости ρ_z от частоты для образца Б1 из сплава ЭП-866. В силу зависимости (9.2) между частотой и глубиной проникновения тока в проводник эта же кривая является графиком распределения ЭУС по глубине поверхностного слоя (для этого ось абсцисс имеет два масштаба – по глубине и по частоте). Для образца, график ρ_z которого приведен на рис.9.2,а, аналогичным образом получено распределение ρ_{z0} для случая отсутствия механических напряжений в образце. Кривая по амплитуде и форме мало отличается от кривой на рис.9.2,а. Полученные данные использованы для построения зависимости «чистой» аномалии ЭУС $\Delta\rho_z = \rho_z - \rho_{z0}$, приведенной на рис.9.3. Там же приведены аналогичные кривые $\Delta\rho_z$ для различных технологий обработки поверхности образцов из того же сплава, а также кривая для нагруженной балки из этого сплава с напряжением равно 200 МПа. Измерения, проведенные на балке с известной степенью ее нагруженности, показали масштаб величин остаточных напряжений в образцах с разными технологиями обработки их поверхности. Вид кривых $\Delta\rho_z$ для образцов с разными технологиями обработки их поверхности (полировка, нагартовка и штамповка на двух гранях плоских образцов А1 и Б1) хорошо соответствует принятым представлениям о механических напряжениях, создаваемых этими технологиями. На рис.9.4 приведен пример осуществления предлагаемого способа при определении остаточных напряжений в турбинной лопатке непосредственно по этапам его осуществления. Так, на кривых а) и б) приведены результаты измерения тока I_i и напряжения U_i на тех же частотах f_i , что и данные на рис.9.2,а и рис.9.3; на кривой в) – вычисленное распределение ЭУС ρ_z по глубине лопатки; на кривой г) – кривая калибровочных коэффициентов $K_{i\sigma}$; на кривой д) – вычисленная эпюра остаточных напряжений $\sigma(h)$, полученная по предлагаемому способу. На этой же кривой нанесены результаты разрушающего контроля. Сравнимые результаты хорошо коррелируют друг с другом, но данные по предлагаемому способу получены за 5 минут, а альтернативный разрушающий метод требует около 4-х часов работы.

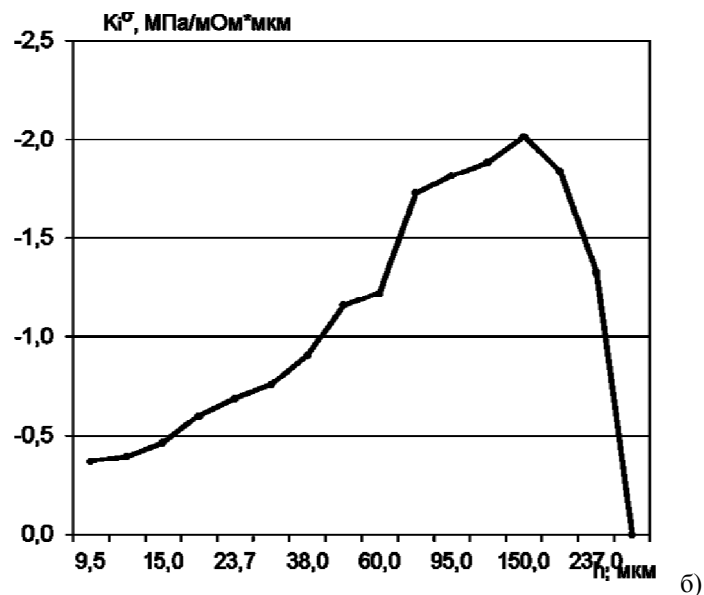
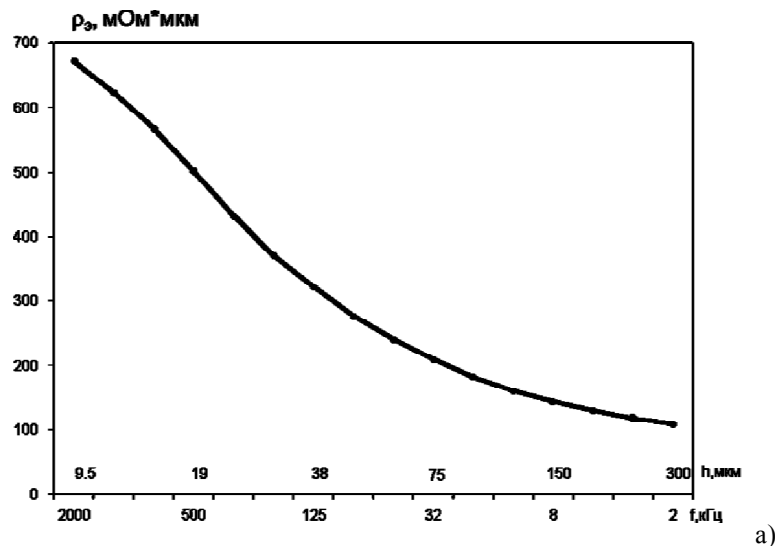


Рис. 9.2. Графики зависимости ЭУС (а) и коэффициента калибровки (б) от глубины

Эту функцию можно разложить в ряд Фурье. Графическая зависимость амплитуды гармоник от их частоты есть не что иное, как амплитудный спектр профиля. Теоретически доказано и экспериментально многократно подтверждено, что самая низкочастотная гармоника содержит информацию об отклонениях формы поверхности. Вторая и третья гармоники содержат информацию о волнистости. Падающая часть спектра несет в себе информацию о шероховатости профиля. Незатухающая высокочастотная часть спектра несет в себе информацию о помехах. Удаляя из амплитудного спектра любую из вышеназванных частей информации (одну или несколько), после обратного преобразования Фурье получаем профиль без исключенных составляющих информации.

Практическая реализация описанной схемы фильтрации начинается с определения микрогеометрии поверхности прибором ошупывающего типа и сохранением координат профиля в виде текстового файла (ascii). Эта опция включена в меню любого современного прибора, предназначенного для определения микрогеометрии поверхностей. После этого осуществляется загрузка ascii-файла в среду MATLAB при помощи функции load ('имя файла', '-ascii'), в виде матрицы с двумя столбцами. Первый столбец – координаты перемещения щупа прибора по оси x, второй – характеризует колебания по оси y. Функция plot (x, y) позволит вывести исходный график профиля поверхности (рис.7.2).

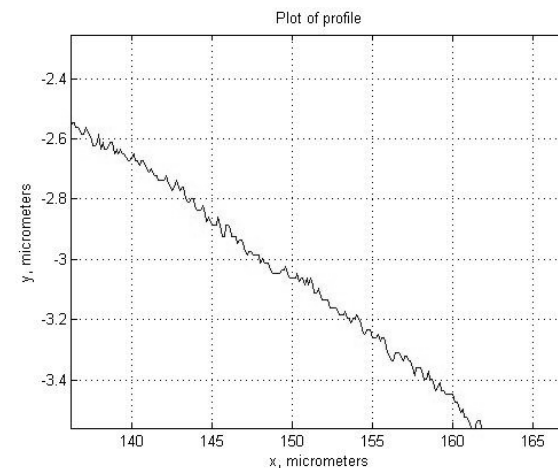


Рис. 7.2. График профиля поверхности

Разность между максимальной и минимальной координатой x, соотнесенная к количеству дискретных интервалов, определит шаг дискретизации. Частота – величина, обратная шагу. Применим функцию fft (discrete Fourier transform) – прямое преобразование Фурье к ординатам y и выведем результат преобразования с помощью функции bar (рис.7.3).

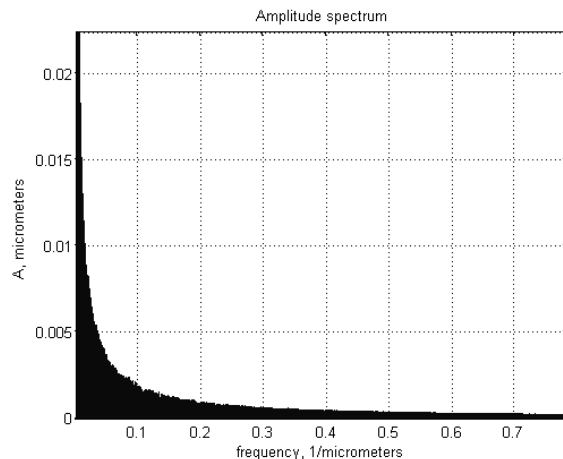


Рис. 7.3. Результат прямого преобразование Фурье

Исключим незатухающую высокочастотную часть спектра, а также низкочастотную часть спектра, отвечающую за волнистость и отклонение формы, применим обратное преобразование Фурье ifft (inverse Fourier transform), получим шероховатость поверхности без помех. На рис.7.4 приведен рисунок окна, появляющегося после отработки программы.

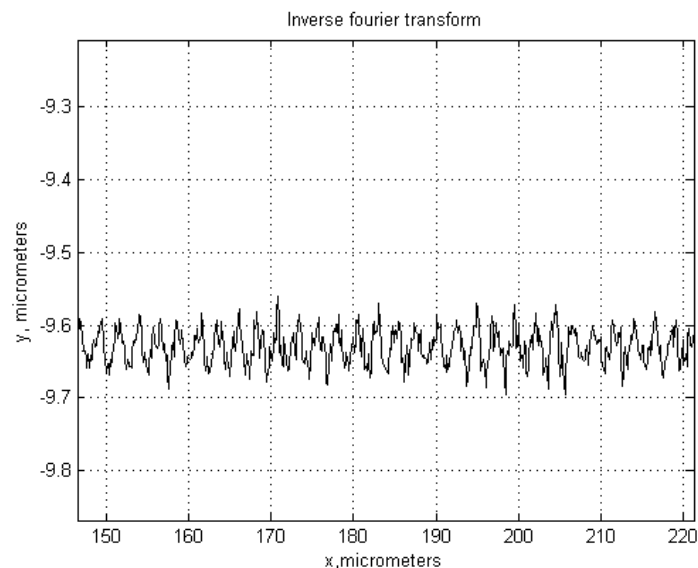


Рис. 7.4. Результат обратного преобразования Фурье

Таким образом, задавая последовательность подаваемых токов различных частот f_i , измеряя ток I_i и напряжение U_i , вычисляя ρ_{zi} и его распределение по глубине материала изделия, можно определять распределение механических напряжений σ_i в нем. Для этого:

- в исследуемое изделие через подающие электроды засылают ток различной частоты;
- измеряют силу поданного тока на каждой из заданных частот;
- измеряют напряжение сигнала-отклика изделия на каждой из заданных частот;
- вычисляют распределение ЭУС по глубине материала изделия;
- снимают калибровочную зависимость между ЭУС и механическими напряжениями в материале исследуемого изделия на глубинах, соответствующих глубинам проникновения тока на заданных частотах;
- на основании снятой зависимости вычисленное распределение ЭУС преобразуют в распределение механических напряжений по глубине исследуемого материала изделия.

Измерение силы поданного тока позволяет вычислять непосредственно эффективное удельное сопротивление и его распределение по глубине изделия и, кроме того, повышает стабильность измерений, т.к. внешнее воздействие не только задается и измеряется непосредственно в изделии, но и является нормирующим фактором (формула 9.6).

Вычисленное распределение ρ_z по глубине изделия (рис.9.2,а) содержит информацию как об изменении удельного сопротивления ρ поверхностного слоя материала изделия, зависящего от изменений механических напряжений σ по его глубине, так и об изменении сечения проводника (т.е. слоя, в котором распространяется ток). В соответствии с формулой (9.5) ρ_z пропорционально ρ и обратно пропорционально b . Основное изменение ρ_z при изменении частоты тока связано с изменением сечения проводника, а изменение $\Delta\rho_z$, связанное с механическими напряжениями, т.е. рассматриваемые аномалии, примерно на 1-2 порядка ниже. Механические напряжения определяются с помощью калибровочной зависимости (рис.9.2,б).

Имеется возможность выделить эти небольшие аномалии ЭУС на фоне значительных изменений, связанных с видом зависимости ЭУС, что может существенно повысить точность измерений. Для этого предлагается дополнительно вычислить распределение по глубине приращений ЭУС $\Delta\rho_z$ исследуемого изделия относительно ЭУС изделия из того же материала с известными механическими напряжениями, снять калибровочную зависимость между этими приращениями и механическими напряжениями материала исследуемого изделия на глубинах, соответствующих заданным частотам, и, используя снятую зависимость, вычисленное распределение приращений ЭУС преобразовать в распределение механических напряжений по глубине материала исследуемого изделия.

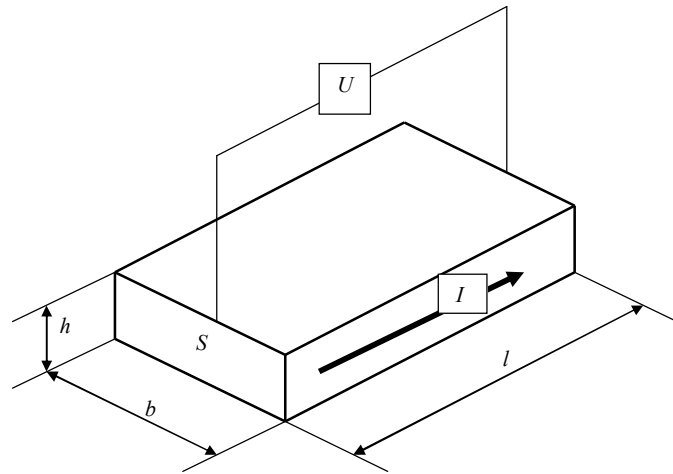


Рис.9.1 – Схематическое изображение элемента изделия с током: b, l, h – линейные размеры, S – площадь сечения проводника, I – ток через элемент, U – падение напряжения на элементе.

Введём понятие эффективного удельного электрического сопротивления (ЭУС) материала изделия ρ_3 :

$$\rho_3 = \rho \frac{l}{b}. \quad (9.5)$$

ЭУС зависит от материала изделия и от частоты тока, поскольку частота тока зависит от ширины его прохождения, его можно измерять на разных задаваемых нами частотах f_i также, как и на постоянном токе:

$$\rho_{3i} = \frac{U_i h_i}{I_i}, \quad (9.6)$$

где индекс i означает, что измерения тока и напряжения произведены на i -ой частоте ($i = 1, 2 \dots m$), а значения h_i вычислены по формуле (9.3) для частоты f_i .

Важно отметить, что в формуле (9.6) под измеренным напряжением U_i следует понимать синфазную поданному току I_i составляющую напряжения сигнала-отклика, что легко реализовать, например, путем фазового детектирования указанного сигнала.

Выражение (9.5) определяет физический смысл введенного параметра ρ_3 . На низких частотах тока на поверхности проводника вокруг подающих электродов имеют распределение, близкое к аксиально-симметричному, при этом $b \approx l$ и $\rho_3 \approx \rho$. По мере увеличения частоты f подаваемого в изделие тока происходит сжатие диаграммы распределения токов в плоскости изделия и по его глубине, т.е. ширина b уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к тому, что на высоких частотах ρ_3 оказывается существенно большим, чем ρ .

Описанная методика фильтрации позволяет оставлять или удалять шероховатость, волнистость, отклонение формы, помехи или комбинацию этих компонентов. Это важно в исследовательских целях, так как в ряде случаев отдельные составляющие микропрофиля существенно влияют на конкретные функциональные или эксплуатационные свойства. Например, шумовой эффект при работе зубчатых зацеплений определяется исключительно волнистостью, а отражательная способность поверхности – ее шероховатостью.

Кроме того, данный метод исключает необходимость тщательной горизонтальной выверки исследуемой поверхности: для наклонно записанного профиля из его амплитудного спектра достаточно исключить самую низкочастотную гармонику и после обратного Фурье-преобразования получим такой же профиль, как и при идеально выставленной в “горизонт” контролируемой поверхности.

7.2. Анализ профиля

Как отмечалось ранее для анализа характера профиля поверхности использование параметрических критериев не информативно и не эффективно. Особенно актуально это сегодня, когда существуют мощные аппаратные и программные средства и речь идет об анализе влияния технологических режимов на топографические характеристики поверхности. Необходим переход от параметрических к непараметрическим критериям оценки.

Продemonстрируем процесс анализа профиля поверхности на базе непараметрических кривых, представленных на рис.7.5, построение которых осуществлялось в среде МАТЛАБ.

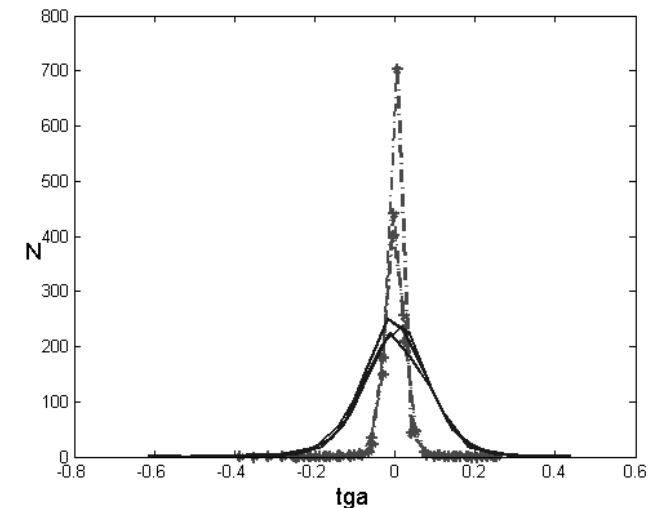


Рис. 7.5. Эмпирическая функция плотности распределения тангенсов углов наклона

На рис.7.5 приведены совокупности плотностей распределения тангенсов углов наклона профилей поверхностей, выполненных методом лазерного маркирования при разной мощности обработки и прочих равных условиях. Для группы плотностей с большей зоной рассеяния и пиком плотности на уровне $N=250$ мощность маркирования составила порядка 6 Вт. А группа плотностей с меньшей зоной рассеивания тангенсов углов наклона, отложенных по оси абсцисс, и пиком при $N=700$, описывает маркированную поверхность, обработка которой велась при мощности 1,4 Вт.

Приведенный пример наглядно демонстрирует, как с помощью непараметрических кривых можно оценивать влияние параметров обработки на характер плотностей.

Таким образом, непараметрические кривые позволяют не только оптимизировать микрогеометрию функциональных поверхностей на качественно новом уровне, но также это прекрасный исследовательский инструментарий для изучения влияния режимов технологической обработки на характер получаемого микрорельефа.

сосредотачиваются у той поверхности проводника, которая является ближайшей к источникам поля, вызывающим появление токов. На основании решения системы уравнений Максвелла для проводящего полупространства глубина проникновения тока h в таком проводнике определяется выражением

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (9.3)$$

где f – частота тока, Гц; μ – магнитная проницаемость материала, Гн/м; γ – удельная электропроводность материала, Ом⁻¹.

Величина плотности тока экспоненциально уменьшается с увеличением глубины, а h представляет значение глубины (9.3), на которой плотность тока падает в "е" раз по сравнению с исходным значением тока на поверхности. По определению h – глубина проникновения тока в проводник, т.е. толщина поверхностного слоя, в котором распространяется основная часть тока.

Использование явления скин-эффекта позволяет послойно исследовать поверхностный слой изделия путем подачи в него тока различной частоты и измерения сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряженного состояния материала изделия. Уменьшая в соответствии с формулой (9.3) частоту посылаемого в изделие переменного тока, увеличивается глубина исследуемого слоя. Выбор рабочих частот обеспечивает требуемый диапазон глубин изделия.

Для пояснения сути технического решения задачи предлагается нижеследующая интерпретация процессов, происходящих в поверхностном слое исследуемого изделия, в который проникает подаваемый ток.

Рассмотрим участок плоского проводника с протекающим по нему током I от какого-либо внешнего устройства (см. рис.9.1). Сопротивление R такого проводника для постоянного тока выражается формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м; l и S – соответственно длина и площадь сечения проводника, м; $S = b h$, м², где h – высота проводника, м, b – ширина проводника, м.

Сопротивление проводника $R = U/I$, где U – падение напряжения на нем. Измерив U и I и определив R , по формуле (9.4) при известных размерах l , b и h , можно вычислить значение ρ .

Аналогичным образом поступаем и для переменных токов, в том числе высокочастотных. В случае скин-эффекта формула будет также справедлива, если считать, что площадь сечения S проводника представляет собой произведение глубины проникновения поля в проводник h на ширину b , причем h и b зависят от частоты тока и материала проводника.

9. Резистивный электроконтактный метод неразрушающего определения остаточных напряжений

9.1. Теоретическое описание метода

Резистивный электроконтактный (РЭК) метод неразрушающего контроля остаточных напряжений основан на корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками металлов и сплавов – удельной электрической проводимостью γ или удельным электрическим сопротивлением ρ в h -слое металла и деформирующей способностью остаточных напряжений, связанной с изменением периода кристаллической решетки при деформации [30].

Существует взаимосвязь между удельной электрической проводимостью γ и механическими напряжениями, она определяется формулой:

$$\gamma = \frac{e^2 E n_0}{m k T V_T N_0 \pi} \cdot d, \quad (9.1)$$

где e – заряд электрона, Кл; m – масса покоя электрона, кг; n_0 – число электронов проводимости в единице объема; E – напряженность поля, В/м; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; V_T – скорость теплового движения электронов, м/с; N_0 – число атомов в единице объема; d – период кристаллической решетки, м. Известна связь удельной электрической проводимости γ с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1/\gamma$.

При отсутствии механических напряжений металл имеет номинальное значение периода решетки d_0 и соответствующее номинальное значение удельной электрической проводимости γ_0 . Под действием изменения механических напряжений $\Delta\sigma$ имеет место изменение периода решетки металла Δd . В зоне упругих деформаций это изменение можно считать пропорциональным механическому напряжению. В соответствии с (9.1) изменение электропроводности $\Delta\gamma$ также пропорциональны средним механическим напряжениям $\Delta\sigma$ по формуле:

$$\Delta\gamma = K_\sigma \cdot \Delta\sigma, \quad (9.2)$$

где K_σ – экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий свойства материала.

Таким образом, измеряя электрические свойства проводящих изделий, можно определять механические напряжения в них. При этом необходимо измерять распределение электрических параметров и механических напряжений по глубине изделий.

Для измерения распределения удельного сопротивления по глубине используется явление скин-эффекта, при котором токи высокой частоты

8. Представление о напряжённо-деформированном состоянии изделий

Известно, что технологические остаточные напряжения (ОН) могут возникнуть в результате механических, термических и термомеханических воздействий на изделия из металлов и сплавов.

Среди важных достижений в исследовании остаточных напряжений можно выделить результаты, представленные в работах И.А.Биргера, Н.Н.Давыденкова, А.А.Дубова, М.И.Евстигнеева, С.Ю.Иванова, А.И.Исаева, В.В.Клюева, Э.А.Кочаров, Б.А.Кравченко, А.А.Маталина, Ж.А.Мрочка, А.Н.Овсеенко, И.А.Одинга, В.В.Трофимова и др.[11-36].

Установлено [31], что технологические остаточные напряжения при превышении допустимых значений в изделиях с высокой жесткостью в поверхностном слое могут вызвать трещинообразование, а с малой жесткостью – остаточную деформацию, приводящую к короблению с соответствующей потерей точности формы или взаимного расположения поверхностей. При уровне напряжений в пределах допустимых значений видимых изменений не произойдет, но при совпадении знака эксплуатационных нагрузок со знаком остаточных напряжений произойдет разрушение изделия при нагрузках, меньших расчетных.

Во многих случаях разрушение конструкций из высокопрочных материалов при переменных нагрузках связано с действием остаточных напряжений (рабочие лопатки турбин и компрессоров, коленчатые валы, сварные швы и т.д.). Их образование связано с неоднородными линейными или объемными деформациями в смежных объемах материала, агрегата или конструкции [11]. ОН можно охарактеризовать с помощью особых точек на эпюре распределения (рис.8.1) [29].

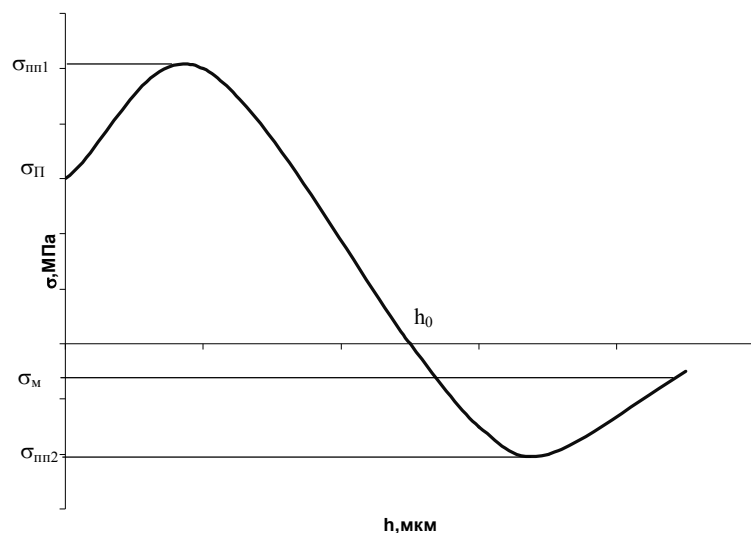


Рис. 8.1. Особые точки на эпюре остаточных напряжений

Для удобства анализа применяют следующие параметры (по рис.8.1):

$\sigma_{\text{П}}$ – напряжения на поверхности, МПа;

$\sigma_{\text{ПП1}}$ – напряжения максимальные подповерхностные до точки перехода нуля, МПа;

$\sigma_{\text{ПП2}}$ – напряжения максимальные подповерхностные после точки перехода нуля, МПа;

$\sigma_{\text{М}}$ – напряжения на выбеге эпюры, МПа;

h_0 – точка перехода нуля эпюры напряжений, мкм.

Важную роль играют величина, знак, глубина залегания и характер распределения этих напряжений по глубине поверхностного слоя (рис.8.2) [19].

Наименование метода	Область применения	Погрешность, %	База замера, мм	Способ измерения
2. Магнитошумовой (шумы Баркхаузена)	Ферро магнитные материалы, имеющие равномерное распределение ОН по сечению	15-20		Разновидность метода магнитной проницаемости. Большая чувствительности к немагнитному зазору, к изменению хим. состава и структуры материала. Попутная аппаратура
3. Токовихревой метод	Ферромагнитные материалы, детали с наклепанным поверхностным слоем, сварные швы	15-20	5-10	Основан на измерении электропроводности по наводимым вихревым токам. Требуется калибровка по тестовым образцам. Большая зависимость от базы
4. Резистивный электроконтактный метод	Любые металлы и сплавы	15-20	13	Измеряется эффективное удельное сопротивление с дальнейшим перерасчетом в эпюры остаточных напряжений
КОСВЕННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ МЕТОДЫ				
1. Метод твердости	Детали после упрочняющих обработок			Основан на измерении твердости, позволяет оценить знак и характер
2 Метод хрупких покрытий	Контроль перегруженных участков деталей плоской формы в условиях динамических нагрузок.			Выявление концентраторов напряжений. Частичное или полное разрушение детали. Требуется нагружающее оборудование.
3. Оптический метод				Требуется хорошая отражающая поверхность детали или нанесение оптически чувствительных покрытий. Специальная аппаратура и материалы.
4. Метод акустической эмиссии				Выявление концентраторов напряжении. Оценка мест появления микротрещин при нагружении.

Анализ существующих методов определения остаточных напряжений показал, что высокую актуальность имеет проблема разработки новых методов, которые бы сочетали преимущества разрушающих методов (высокую надежность, гарантированную погрешность определения остаточных напряжений, возможность определения распределения остаточных напряжений по глубине от поверхности) с неразрушающим принципом действия, имели достаточно высокую универсальность и высокие эксплуатационные качества.

В качестве одного из таких методов в данной работе предлагается новый резистивный электроконтактный метод [20]. Метод запатентован [26, 27] и применим к любым электропроводным металлам и сплавам, имеет высокую универсальность в отношении формы и размеров изделий.

Сравнение основных характеристик различных методов определения остаточных напряжений (ОН) приведено в табл.8.3.

Таблица 8.3

Сравнительные характеристики различных методов определения ОН

Наименование метода	Область применения	Погрешность, %	База замера, мм	Способ измерения
РАЗРУШАЮЩИЕ И МАЛОРАЗРУШЛЮЩИЕ МЕТОДЫ				
1. Метод полосок (метод колец и полосок)	Тонкостенные близкие к плоской форме, толщиной до 10 мм, трубы и детали с тонкой стенкой	4-6	10-20	Травление и замер прогиба или тензодатчики. Значительное время контроля и расчета, ненадежность наклеенных тензодатчиков, выборочный
2. Метод обтачивания (растачивания)	Плоские диски	5-6		Тензодатчики или оптические средства. Необходимо соблюдение температурной стабилизации, высокоточные измерения.
3. Метод полного разрушения (метод кубиков)	Детали с максимальными ОН	4-5	10-15	Тензодатчики. Метод полного освобождения образца от ОН.
4 Метод отверстия (пропила)	Заготовки крупных деталей	6-10	20-40	Тензодатчики. Пригоден при плавном изменении ОН по толщине.
5. Метод электро-стравливания	Тонкостенные детали после упрочняющих обработок.	3-5	80 - 100	Замер прогиба. Требуется специальная аппаратура.
НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ				
1. Рентгеновский	Определение ОН в локальных участках поверхностного слоя на глубину 10 - 25 мкм	10-180МПа	Десятки мкм.	Исследование картины дифракции рентгеновских лучей. Требуется измерение в нескольких точках и их статистическая обработка.
2. Акустический	Крупногабаритные плоские детали и трубы	15-17	5- 10	Измерение скорости распространения УЗ воли. Ластся интегральная
КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ				
1. Метод магнитной проницаемости	Ферромагнитные материалы, имеющие равномерное распределение ОН по сечению	20		Основан на изменении свойств материала при наличии ОН. Требует построения калибровочных кривых. Усредняет данные по сечению. Чувствителен к немагнитному слою между

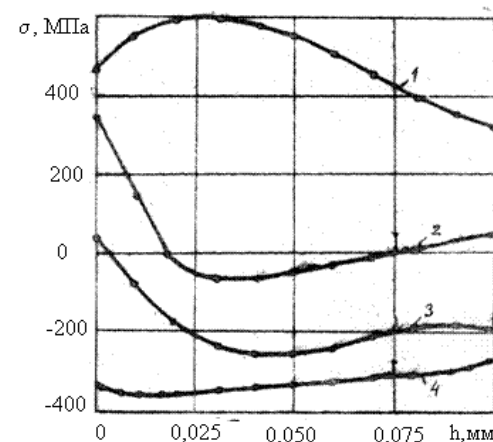


Рис. 8.2. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после различных операций технологического процесса обработки: 1 – предварительное шлифование; 2 – окончательное шлифование; 3 – шлифование, обкатка; 4 – термообработка.

В процессе обработки заготовки напряженно – деформированное состояние (НДС) поверхности может сильно меняться. Опыт эксплуатации изделий, используемых в различных областях техники, и эксперименты показывают, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость и в целом на долговечность деталей и инструмента, могут быть одной из главных причин техногенных аварий и разрушений надежных, на первый взгляд, конструкций в технике и в быту [12].

Так, отечественные авиастроители на основании продолжительного опыта отдают предпочтение сплаву АК6 для применения в сложных штампованных деталях, требующих повышенной выносливости. Данные сплавы хорошо обрабатываются резанием, но склонны к коррозии под напряжением. Поэтому при изготовлении и ремонте, например, авиационных барабанов колес важно контролировать края барабана, где удерживается шина, вентиляционную и дисковую части. Для повышения эксплуатационных свойств изделий проводят дополнительное упрочнение шариками, что увеличивает эти свойства в несколько раз.

Разработка методов управления технологическими остаточными напряжениями в металлах и сплавах является актуальной задачей повышения надежности и долговечности деталей и инструмента.

8.1. Остаточные напряжения и их классификация

Остаточными напряжениями (ОН) принято называть упругие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела, жесткого агрегата материалов, сборной или сварной конструкции при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных).

Остаточные напряжения возникают вследствие пластических деформаций кристаллических решеток материала заготовки в процессе ее механической, термической обработки и пр. Остаточные напряжения, возникающие на поверхности металла, делятся на напряжения растяжения и напряжения сжатия. Остаточные напряжения сжатия на поверхности, как правило, вызывают благоприятное воздействие, увеличивая ресурс изделий, а напряжения растяжения ускоряют разрушение, например могут появиться микротрещины с дальнейшим выходом из строя изделия [31].

ОН подразделяется на три вида в зависимости от размеров рассматриваемой области поверхностного слоя изделия, в которой они возникают [11].

Напряжения первого рода – макронапряжения, которые охватывают области в пределах детали или конструкции. Остаточные напряжения первого рода в детали возникают в результате различных технологических факторов при ее изготовлении [13].

Напряжения второго рода – микронапряжения, возникающие в микрообъемах (в пределах кристаллитов структуры металла).

Напряжения третьего рода – образуются в ультрамикроскопических объемах (в пределах кристаллической решетки).

Так как ОН второго и третьего рода в своих микрообъемах уравновешены, то интерес для исследователей представляют ОН первого рода.

В процессе эксплуатации детали или конструкции, вследствие изменения и перераспределения внутренней энергии материала, возникают технологические и эксплуатационные остаточные напряжения. Технологические остаточные напряжения – это напряжения, являющиеся следствием физических и физико-химических процессов, возникают в материале при изготовлении детали или конструкции и продолжают действовать после изготовления. Эксплуатационные остаточные напряжения – это напряжения, являющиеся следствием процессов взаимодействия собственной внутренней энергии материала детали или конструкции с энергией внешнего поля, возникающие и накапливающиеся в материале в течение всего срока эксплуатации детали или конструкции.

Возможны следующие результаты воздействия остаточных напряжений в поверхностном слое металлов и сплавов.

Если величина остаточных напряжений превысит предел прочности материала, а изделие обладает высокой жесткостью, то в поверхностном слое возникнут трещины вследствие его разрыва сплошности материала.

Если изделие является маложестким, то под действием остаточных напряжений произойдет его коробление, величина которого может превысить поле допуска на точность формы или взаимного расположения поверхностей.

Если остаточные напряжения ниже предела прочности материала, а изделие является достаточно жестким, то видимых изменений не произойдет.

Однако если эксплуатационные нагрузки совпадут со знаком остаточных напряжений и их сумма будет выше величины допускаемых напряжений, то изделие может разрушиться при нагрузках ниже

№	Показатель	Разруша- ющий	НК, рентген	НК, акусти- ческий	НК, магнито- шумовой	НК, резистив- ный
9	Время измерения, мин	20...60	30...60	2	1	1
10	Время обработки данных, мин	30	20	5	5	5
11	Направление измерения обеспечива- ется	Вырезкой образца	Пере- установкой образца	Пере- установка датчика	Пере- установка датчика	Пере- установка датчика
12	Получение эпюры напряжения	Да	Нет	Затрудни- тельно	Нет	Да
13	Компакт- ность аппаратуры	Нет	Нет	Да	Да	Да
14	Основной источник погрешности	Неравномер- ность травления	Изменение химсостава образца	Неоднород- ность материала	Изменение немагнит- ного зазора	Ненадеж- ность контакта
15	Сопутствующ- ие вредные факторы	Химагрес- сивная среда	Рентге- новское излучение	Нет	Нет	Нет
16	Обслужи- вающий персонал	Инженер	Инженер	Техник	Техник	Техник
17	Представитель	ПИОН, Меркулон	ДРОН	УДЦ	Stresscan	СИТОН

Таблица 8.2

Сравнение основных характеристик различных методов определения остаточных напряжений

№	Показатель	Разрушающий	НК, рентген	НК, акустический	НК, магнитно-шумовой	НК, резистивный
1	Изменяемый параметр	Деформация образца	Картина дифракции	Скорость ультразвуковых волн	Электромагнитные свойства	Электропроводность
2	Исследуемые материалы	Большинство металлов и сплавов	Все металлы и сплавы	Все металлы и сплавы однородного объема	Ферромагнитные металлы и сплавы	Все металлы и сплавы
3	Применяемость для деталей различной конфигурации	Ограничена размерами образцов	Ограничена размерами образцов	Плоские образцы	Да	Не менее 50х20х5мм
4	Погрешность, %	5...30	10...100	15...20	15...20	5...10
5	Глубина определения ОН, мкм	>2	3...50	<200	20...200	5...10000
6	Шаг измерения глубины, мкм	5...10			Фиксированный 20, 70, 200	Переменный 5...100
7	База замера, мм	60	0,1...1,0	5...10	15...20	10...15
8	Время подготовки к измерению, мин	10...20	15	5	3	3

запланированных, что чрезвычайно опасно. Из сказанного выше следует, что измерение и неразрушающий контроль технологических остаточных напряжений является важнейшей метрологической проблемой.

8.2. Возникновение остаточных напряжений при различных видах обработки

Технологические способы и режимы обработки поверхности, состояние инструмента, системы и степень охлаждения оказывают влияние на величину и знак остаточных напряжений [32].

Обработка резанием (точение) поверхности заготовки детали обычно вызывает появление растягивающих или сжимающих напряжений. Глубина распространения их находится в пределах 50...200 мкм и зависит от условий формообразования поверхности [14]. Одним из возможных вариантов повышения качества поверхностного слоя является совместная обработка точением и обкатка роликами (рис.8.2).

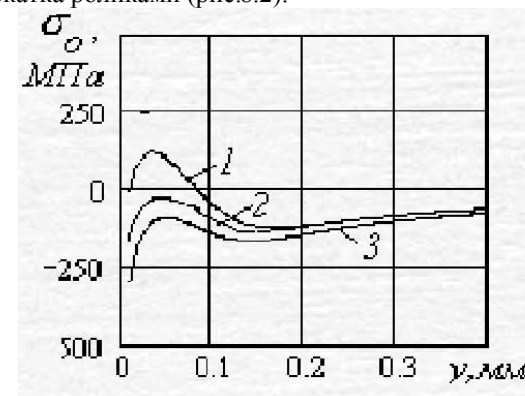


Рис. 8.2. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при 1) точении, 2) совместном точении и обкатке, 3) обкатке.

Из графиков следует, что для указанных режимов обработки при обкатывании и совместном точении и обкатке (кривые 2 и 3) имеют место сжимающие остаточные напряжения; при точении (кривая 1) остаточные напряжения растяжения на глубине 0,1 мм переходят в сжимающие.

При фрезеровании возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения (рис.8.3), которые вызывают два основных фактора — пластическая деформация при силовом воздействии и нагревание поверхностных слоев. В поверхностном слое наблюдаются напряжения сжатия до 320 МПа, переходящие на глубине 30...50 мкм в растягивающие напряжения величиной 100 МПа.

При шлифовании чаще всего возникают растягивающие напряжения (рис.8.4).

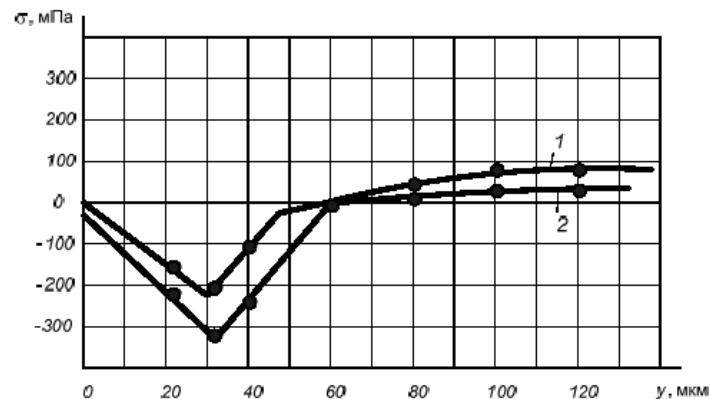


Рис. 8.3. Остаточные напряжения по глубине поверхностного слоя при фрезеровании

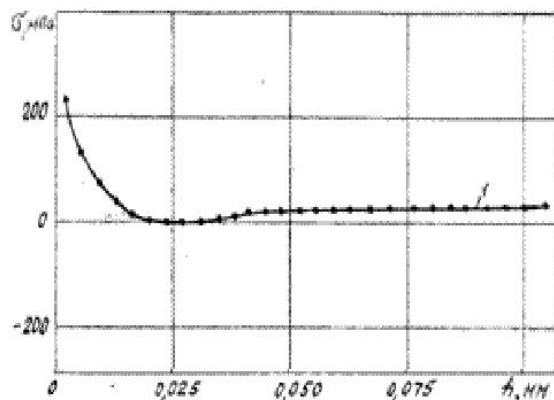


Рис. 8.4. Остаточные напряжения по глубине поверхностного слоя при шлифовании

Из рис.8.4 следует, что в процессе чистового шлифования в поверхностном слое стержня формируются растягивающие напряжения, величина которых достигает 220 МПа на глубине 0,02 мкм.

8.3. Способы обработки поверхностей деталей

Исследования показали, что технологические остаточные напряжения технологически управляемы. Это означает, что и величина, и знак, и распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя зависят от видов и режимов обработки заготовок [15]. Варьируя параметры обработки и последовательность методов обработки заготовок, можно в



Рис. 8.12. Аппаратура Olympus Omniscan

Резистивный электроконтактный метод основан на измерении эффективного удельного электросопротивления при токе прохождения через «напряженные» слои материала. Аппаратура СИТОН-ТЕСТ (рис.8.13) позволяет осуществлять измерение технологических остаточных и эксплуатационных в поверхностном слое металлических изделий неразрушающим способом. Существенным отличием прибора от аналогов является возможность применения прибора на ферромагнитных сплавах таких материалов, как Ti, Ni, Al [35].

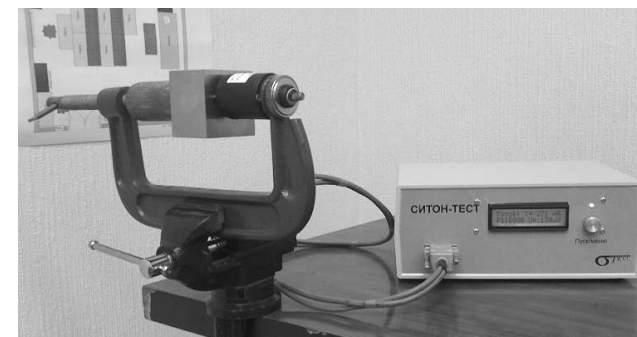


Рис. 8.13. Аппаратура СИТОН-ТЕСТ

8.5. Сравнительные метрологические характеристики существующих методов определения остаточных напряжений

Сравнение основных характеристик различных методов определения остаточных напряжений приведено в табл.8.2.

Метод магнитной памяти металла – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), возникающих на изделиях и оборудовании в зонах концентрации напряжений (ЗКН) и дефектов металла [13, 34]. При этом СМПР отображают необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также структурную и технологическую наследственность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, как правило, в поле Земли. В методе МПМ используются естественная намагниченность и последствие, которое проявляется в виде магнитной памяти металла к фактическим деформациям и структурным изменениям в металле изделий и оборудования.

Основные представители данного метода: ИКН-1М-4 ООО (Измеритель Концентрации Напряжений), ЭМИТ-1М (Электромагнитный индикатор трещин) – ООО «Энергодиагностика», рис.8.11.



Рис. 8.11. Аппаратура ЭМИТ-1М

Вихретоковый контроль это бесконтактный метод контроля НДС поверхностного слоя металлических деталей. Основу этого метода составляет выносной датчик, который при протекании через него переменного тока, создаёт вихревые токи в контролируемой области. Вихретоковые преобразователи возбуждают в контролируемом объекте электромагнитное поле в диапазоне 1 Гц – 500 МГц и преобразуют в электрический сигнал изменения этого поля, вызванные нарушениями плотности, отклонениями геометрических и электромагнитных параметров объект [25].

Основные представители: дефектоскоп вихретоковый ЭМИТ-1, ЭМИТ-2, "Энергодиагностика" (Россия) [13], Olympus Omniscan (Япония), изображен на рис.8.12. Также данный прибор позволяет осуществлять акустический контроль при смене управляющего блока.

конечном итоге получить нужную величину и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое.

Целесообразно технологический процесс изготовления деталей организовывать таким образом, чтобы на участках, подвергающихся при эксплуатации наибольшей деформации, были созданы сжимающие остаточные напряжения, например, с помощью термических, механических, термомеханических и специальных методов обработки.

Для уменьшения остаточных напряжений применяют термические и механические методы.

8.3.1. Термические методы

Основным термическим методом уменьшения остаточных напряжений является регулирование скоростей закалки. На практике этот метод чаще всего используют при термообработке штамповок, поковок и отливок. Наибольший уровень напряжений вызывает закалка в холодной воде. Закалка алюминиевых сплавов в кипящей воде практически не вызывает образования напряжений [16].

Для уменьшения термических напряжений можно применять также изотермическую закалку, при которой мягкая закалка совмещена со старением или отпуском. Сущность изотермической закалки заключается в нагреве до закалочных температур и охлаждении в закалочной среде с температурой, равной температуре старения или отпуска.

Для уменьшения величины остаточных напряжений широко используют отжиг. Пластическое состояние может быть вызвано нагревом до достаточно высоких температур, при которых значительно, снижаются пределы текучести и ползучести материала и становится возможным пластическое течение под действием остаточных напряжений.

Величину напряжений можно уменьшить обработкой холодом. Этот вид термической обработки разработан применительно к сложным штамповкам из алюминиевых сплавов. Обработка холодом заключается в охлаждении свежезакаленного изделия в жидком азоте или углекислоте при температурах -196°C и -70°C , соответственно и в последующем быстром нагреве всей поверхности в высокоскоростной струе пара, кипящей воде, в масле или селитре. Чем ниже температура охлаждения, тем эффективнее снижаются напряжения и повышается стабильность размеров изделий. Механические свойства материала после такой обработки почти не снижаются.

8.3.2. Механические методы

Наиболее распространено растяжение при комнатной температуре. Сущность метода заключается в том, что при небольшой пластической деформации (0-2%), осуществляемой на разрывной машине, величина напряжений по всему сечению выравнивается. При последующей разгрузке

снимается упругая деформация и полуфабрикат почти полностью освобождается от остаточных напряжений [17].

Для уменьшения величины остаточных напряжений широко применяют и холодное обжатие. Этот метод заключается в обжатии полуфабрикатов при комнатной температуре для достижения остаточной деформации сжатия заданной величины. Оптимальные результаты могут быть получены при строгом контроле процесса. Проще всего это достигается при работе гидравлических прессов, хотя может быть использовано любое прессовое и молотовое оборудование. Как и в случае растяжения, после разгрузки остаточные напряжения уменьшаются.

Для плоских и катаных полуфабрикатов применяют роликовую правку, основанную на принципе повторных перегибов. Правильные ролики правильной машины расположены таким образом, что полуфабрикат, проходя через машину, перегибается последовательно. При этом также снижается уровень остаточных напряжений, но способ менее эффективен, чем растяжение, и его труднее контролировать.

Существуют механические методы для регулирования уровня и типа (растяжение или сжатие) остаточных напряжений в изделиях. Наиболее распространен поверхностный наклеп, применяемый для создания сжатого слоя на поверхности готовых изделий. Эту операцию проводят с целью повышения усталостной прочности и уменьшения чувствительности к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Наиболее распространены обдувка дробью и обкатка роликами, вызывающие местную пластическую деформацию поверхностных слоев металла. Недеформированные внутренние слои препятствуют возвращению поверхностных слоев в первоначальное состояние, и поэтому в поверхностных слоях появляются напряжения сжатия [18].

8.4. Методы исследования напряженно-деформированного состояния деталей и их ограничения

Существующие методы определения остаточных напряжений делятся на неразрушающие и разрушающие.

Внутреннее состояние металлов и сплавов можно разделить на две категории по своему несовершенству: нарушение сплошности однородной среды и нарушение однородности сплошной среды. Соответственно при определении состояния материала существуют две области неразрушающего контроля: дефектоскопия и определение напряженно-деформированного состояния (НДС) материала.

Существующие методы определения остаточных напряжений можно разделить на механические, физические и химические [19]. Они могут осуществляться с разрушением и без разрушения изделия.

В соответствии с ГОСТ 18353-79 существуют следующие виды неразрушающего контроля:

- акустические;
- вихрековые;

магнитных доменов у большинства ферромагнитных материалов составляет $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ мм}^3$. Домены отделены друг от друга стенками (границами) и имеют намагниченность вдоль некоторой оси кристаллической решетки. При воздействии на деталь внешнего магнитного поля граница доменов начинает перемещаться. Встречая препятствие, она останавливается и некоторое время остается неподвижной, несмотря на дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля. При некотором значении магнитного поля граница преодолевает препятствие и перемещается до следующего препятствия без дальнейшего увеличения напряженности поля (скачкообразно). Скачкообразное изменение намагниченности сопровождается шумовыми сигналами, которые могут быть оценены в зависимости от изменения магнитоупругости материала.

Оптический метод основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с объектом контроля. Это взаимодействие связано с поглощением, отражением, рассеиванием, дисперсией, поляризацией и др. оптическими эффектами [13, 28]. Данный метод применяют для измерения геометрических параметров изделий, контроля состояния поверхности и обнаружения поверхностных дефектов. Оптические методы имеют очень широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта. Оптические методы широко применяют для контроля прозрачных объектов. В них обнаруживают макро- и микродефекты, структурные неоднородности, внутренние напряжения. Недостатками оптических методов являются узкий диапазон контролируемых параметров, жесткие требования к состоянию окружающей среды и чистоте поверхности изделия.

Радиоволновый метод неразрушающего контроля основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с объектом контроля [33]. Обычно используются волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с длиной от 1мм до 100мм. Контролируют изделия из материалов, где радиоволны не очень сильно затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитоэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты. По характеру взаимодействия с ОК различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного излучения и резонансный. При использовании этого вида контроля наличие дефектов в исследуемых изделиях приводит к появлению дополнительных отражений электромагнитного поля, которые изменяют интерференционную картину и вызывают дополнительные потери энергии. Этот метод применяется в дефектоскопии диэлектриков, а также при исследовании состояния поверхности проводящих тел. Недостатком СВЧ метода является сравнительно низкая разрешающая способность устройств, реализующих этот метод, обусловленная малой глубиной проникновения радиоволн в металлы.

где d_o – расстояние между кристаллографическими плоскостями при отсутствии напряжений.

При определенных упругих постоянных материала деформацию его кристаллической решетки можно отождествить с обычной (макроскопической) деформацией. Значение d_o определяют с помощью образца, изготовленного из того же материала, что и деталь, в которой изучают остаточные напряжения, но подвергнутого термообработке (отжигу) для снятия остаточных напряжений.

Одна из возможных схем для определения значения d показана на рис.8.10. Монохроматический рентгеновский луч направляется узким пучком на исследуемую поверхность, а отраженные лучи фиксируются на рентгеновской пленке в виде затемненного кольцевого следа.

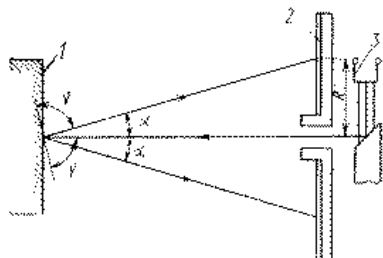


Рис. 8.10. Принципиальная схема прибора определения остаточных напряжений рентгеновским методом: 1 – поверхность исследуемого изделия, 2 – кассета с рентгеновской пленкой, 3 – источник излучения

Подробно методика определения остаточных напряжений с помощью рентгеновского метода описана в специальных работах. Достоинством рентгеновского метода является то, что он позволяет достоверно оценить остаточные напряжения II и III рода в поверхностном слое детали без ее разрушения. Но при определении остаточных напряжений I рода точность метода невысока. Это объясняется тем, что в отражении рентгеновских лучей участвуют только кристаллы, плоскости которых имеют Брэггов угол с направлением падающих лучей. Лучи, проникая в металл на глубину 5...20 мкм, дают на рентгенограммах или дифрактограммах осредненные по этой глубине значения остаточных напряжений. Для уточнения характера распределения остаточных напряжений на различной глубине необходимо выполнить последовательное травление поверхности детали или образца со снятием рентгенограммы после каждого травления. Кроме того, поверхностный слой металла обладает анизотропией физико-механических свойств, что оказывает влияние на точность измерения остаточных напряжений.

Эффект Баркгаузена – скачкообразное изменение намагниченности ферромагнитных материалов при непрерывном изменении внешнего магнитного поля [24]. Ферромагнитные материалы состоят из небольших намагниченных областей, названных магнитными доменами. Объем

- капиллярные;
- магнитные;
- оптические;
- радиационные;
- радиоволновые;
- тепловые;
- электрические.

Данные методы можно структурировать следующим образом (табл.8.1).

Таблица 8.1

Области неразрушающего контроля

Дефектоскопия	Определение НДС материала
Акустические	
вихреговые	
капиллярные	
Магнитные	
оптические	
Радиационные	
радиоволновые	
тепловые	
	электрические

В нашем случае важны методы определения остаточных напряжений и определения напряжённо-деформированного состояния материалов. Для удобства следует сортировать методы диагностики состояния материалов по типу физических полей:

- магнитные;
- тепловые;
- механические;
- электрические;
- электромагнитные.

Механические разрушающие методы достаточно хорошо разработаны и получили наибольшее распространение. Разрушающим методом не

представляется возможным проводить сплошной контроль деталей, поскольку требуется полное или частичное их разрушение. Громоздкость аппаратуры не позволяет использовать её в полевых условиях. Тем не менее, данная аппаратура находит применения на крупных предприятиях, где есть научно-исследовательские лаборатории. Рассмотрим следующие разрушающие методы: метод Давиденкова-Биргера, метод колец, метод зондирующей лунки. Также к разрушающим методам относится рентгеновский, когда требуется построить зависимость остаточных напряжений по глубине и требуется травление измеряемой зоны перед каждым новым измерением. Отдельное описание рентгеновского метода рассмотрено в части о неразрушающих методах.

Одним из наиболее распространенных механических разрушающих методов является **метод Давиденкова-Биргера** [15, 20], который состоит в том, что остаточные напряжения определяются по деформациям, возникающим в результате нарушения равновесия остаточных напряжений при разрезке детали, вырезке из нее образцов, послойного удаления напряженных слоев с фиксацией деформации образца и пересчета их в действительную эпюру остаточных напряжений. Методика определения остаточных напряжений заключается в следующем. С поверхности детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях вырезаются призматические образцы длиной ℓ , шириной b и толщиной δ (рис.8.5).

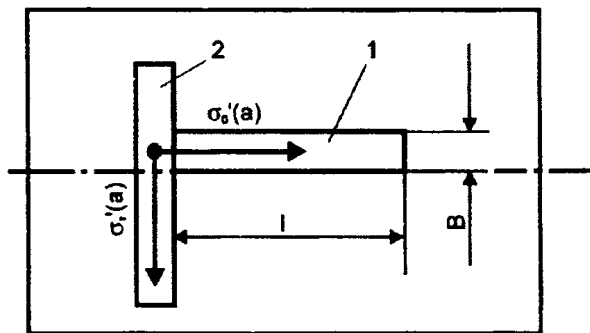


Рис. 8.5. Схема вырезки образцов для определения остаточных напряжений в деталях типа пластин и цилиндров:

1 – продольный образец; 2 – поперечный (или кольцевой) образец

Толщина образца должна более чем в 5 раз превышать толщину a исследуемого напряженного поверхностного слоя, при этом толщина и ширина образца находятся в пределах: $b = 5 \dots 10 \text{ мм}$, $\ell = 60 \dots 100 \text{ мм}$. Для определения остаточных напряжений данным методом широкое применение нашел прибор типа «ПИОН» [15] (рис.8.6).

использовании необходимо разрушать изделие, которое не может быть в дальнейшем использовано. Они нашли широкое применение в лабораторных условиях, а также для калибровки неразрушающих методов контроля.

К физическим методам определения остаточных напряжений относятся следующие наиболее часто применяемые методы:

1. Рентгеновский метод.
2. Методы, основанные на измерении магнитных шумов Баркгаузена.
3. Резистивный электроконтактный метод.
4. Методы, основанные на измерении электромагнитных свойств металла под действием остаточных напряжений.
5. Метод, основанный на измерении ядерного гамма резонанса (эффект Мессбауэра).
6. Ультразвуковые методы.
7. Метод акустической эмиссии (метод упругих волн).
8. Метод индентора.
9. Методы визуализации поверхностных деформаций (методы хрупких покрытий, муаровых полос, поляризационно-оптический).

Рассмотрим эти методы подробнее.

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений основан на явлении рассеяния монохроматических рентгеновских лучей при прохождении через регулярную кристаллическую решетку материала [23]. При таком рассеянии происходит интерференция лучей, в результате интенсивность лучей увеличивается только в определенных направлениях, тогда как в других направлениях – ослабляется. Для материалов некристаллической структуры (стекло, пластмасса) рентгеновский метод не применим.

В основе рентгеновского метода определения остаточных напряжений лежит формула Вульфа – Брэгга, характеризующая условие «отражения» рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристалла

$$2d \sin n = m\ell, \quad (8.2)$$

где d – расстояние между двумя соседними параллельными атомными плоскостями кристаллической решетки исследуемого материала; n – угол падения пучка лучей на плоскость кристаллической решетки материала; m – целое число (порядок отражения); ℓ – длина волны рентгеновского излучения.

Рентгеновские лучи, не удовлетворяющие условию (8.2), взаимно погашаются. Зная угол между падающим и отраженным рентгеновскими лучами, можно вычислить расстояние d при напряженном состоянии металла. Если известно расстояние между кристаллографическими плоскостями d_0 , то деформация кристаллической решетки

$$e = (d - d_0) / d_0, \quad (8.3)$$

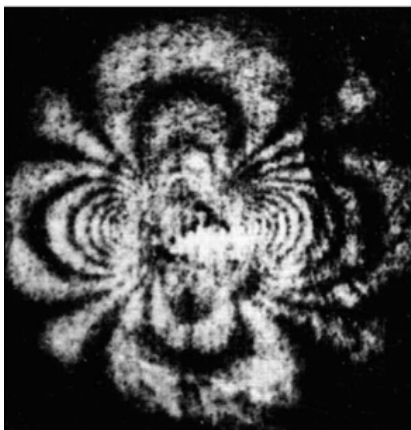


Рис. 8.9. Интерферометрические линии уровня упругих перемещений поверхности тела с остаточными напряжениями в окрестности зондирующей лунки

$$\sigma = \left(\frac{A}{b} + B \right) \frac{D_0}{D} \frac{E}{E_{A1}} N \quad (8.1)$$

где E и E_{A1} – модули упругости исследуемого и эталонного материала; b , D – глубина и диаметр лунки; D_0 – эталонный диаметр лунки, N – число полос на интерферограмме; A , B – аппроксимирующие константы.

Данный метод регистрирует линии уровня перемещений по всей области поверхности тела в окрестности зондирующей лунки, что позволяет визуально определять направления главных напряжений и делать качественные выводы о свойствах напряжений еще до подсчета числовых значений соответствующих величин. На основе данного метода было создано несколько видов портативных голографических систем для измерения напряжений под общим названием ЛИМОН.

Один из недостатков метода состоит в том, что для получения распределения остаточных напряжений в образце требуется множество измерений в разных точках, что принципиально невозможно, так как каждое высверливание лунки приводит к нарушению целостности образца и изменению поля напряжений.

Существуют также другие механические методы, которые в той или иной мере интерпретируют рассмотренные выше. Важным преимуществом данных методов является то, что они позволяют напрямую получать значения остаточных напряжений в поверхностном слое исследуемых изделий. Но они имеют также общий недостаток, который состоит в том, что при их

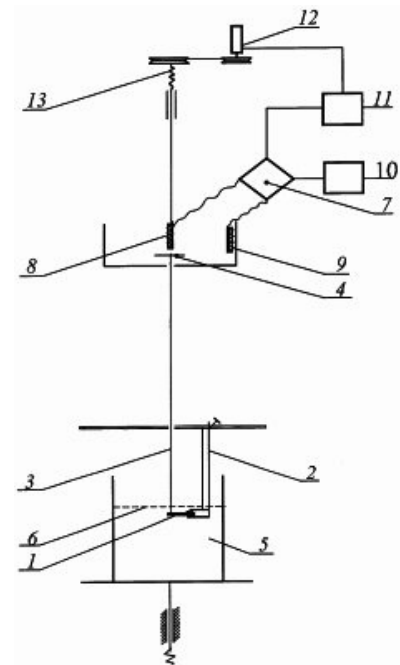


Рис. 8.6. Схема прибора «Пион» контроля остаточных напряжений

Прибор работает следующим образом: под воздействием активной среды т.е. травления, растворяется поверхностный слой, который уравнивает напряжения в образце. Вследствие этого образец изгибается, перемещает шток, изменяет зазор между фольгой и датчиком, нарушает баланс моста. Сигнал разбаланса поступает на ЭВМ, обрабатывается и выдается на печать и на микродвигатель, который через микровинт восстанавливает зазор. Цикл закончен. Далее все повторяется.

Прибор состоит из образца 1, жестко закрепленного в держателе 2, контактирующего с устройством передачи деформации образца, состоящего из кварцевой капиллярной трубки 3 с закрепленной электропроводящей фольгой 4 на свободном конце и погруженного в емкость с агрессивной жидкостью 5 на глубину не менее 2 мм ниже уровня 6, измерительного моста 7, включающего индуктивный датчик 8 и термокомпенсатор 9, питающиеся от генератора высокой частоты 10. Индуктивный датчик 8 удален от фольги на зазор не более 2 мм и снабжен системой обратной связи, состоящей из последовательно соединенных измерительного моста 7, компьютера 11, микродвигатель 12 и микровинта 13.

Рассмотренный метод реализован также в автоматизированной системе контроля поверхностных напряжений механическим методом Меркулон «Тензор» (рис.8.7) [21].



Рис. 8.7. Автоматизированная система контроля поверхностных напряжений механическим методом Меркулон «Тензор»

Данный метод является весьма эффективным, так как позволяет построить эпюру остаточных напряжений по глубине их залегания. Основным недостатком метода является то, что он приводит к разрушению исследуемого изделия.

К числу механических разрушающих методов определения остаточных напряжений относится **метод колец**. Для определения остаточных напряжений в цилиндрических деталях из них вырезают цилиндрические образцы перпендикулярно оси вращения детали (рис.8.8)

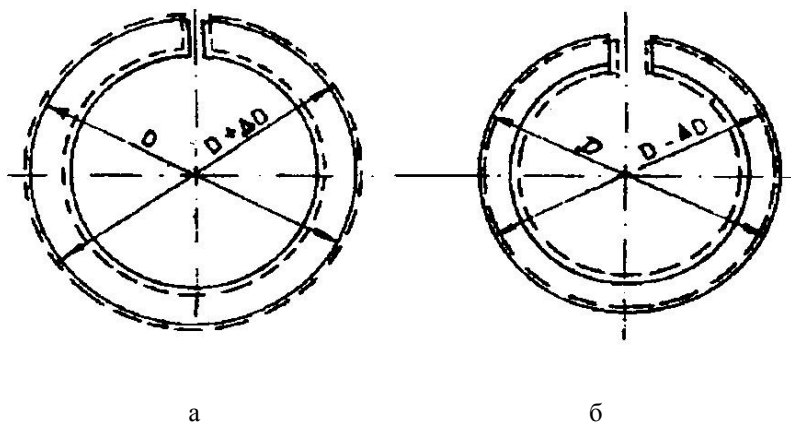


Рис.8.8. Кольцевые образцы для определения остаточных напряжений

Ширина кольцевого образца должна находиться в пределах $(4...6)\delta$. В вырезанных образцах с таким соотношением размеров напряженное состояние можно считать одноосным. После вырезки кольцевые образцы разрезаются по образующей и измеряется их диаметр по сравнению с

начальным до вырезки. Остаточные напряжения сжатия приводят к уменьшению диаметра кольца (рис.8.8,а), а остаточные напряжения растяжения – к его увеличению (рис.8.8,б). Данный метод позволяет интегрально оценить остаточные напряжения, но характер их распределения определить, к сожалению, невозможно.

В работах [21] подробно изложен способ определения остаточных напряжений **методом зондирующей лунки** в сочетании с голографической (спектр-) интерферометрией. Этот метод введен в государственный стандарт некоторых стран (в частности, США, Россия) для определения остаточных напряжений. Суть метода состоит в следующем. Исследуемый участок поверхности тела освещается лазерным лучом. Другая часть этого луча, предварительно расщепленного полупрозрачным зеркалом, направляется на фотопластинку, на которую направляется и луч, отраженный от тела. Вследствие наложения этих лучей на фотопластинке записывается голограмма освещенного участка тела. При освещении голограммы возникает видимое изображение поверхности тела, которое можно рассматривать под разными углами как реальное тело. После записи этой голограммы создается возмущение поверхности тела путем, например, высверливания малой лунки, что позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Голограмма возмущенной таким образом поверхности тела записывается на ту же фотопластинку. В результате наложения двух голограмм и последующего их одновременного восстановления при освещении фотопластинки упругие перемещения в окрестности лунки проявляются в виде системы интерференционных полос, которые в нашем случае соответствуют линиям уровня, т.е. линиям постоянных перемещений (рис.8.9). Картина полос наглядна и проста для расшифровки: оси симметрии интерференционной картины совпадают с осями главных напряжений, а перемещения в разных точках окрестности отверстия определяются числом полос. Величина напряжений определяется числом интерференционных полос, причем цена полосы зависит от упругих свойств материала, т.е. от модуля Юнга, и от диаметра и глубины лунки.

Формула для определения остаточных напряжений σ вдоль выбранного направления на интерференционной картине имеет вид