

Методические рекомендации для магистрантов по изучению дисциплины

«Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин»

Дисциплина «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» относится к учебным дисциплинам базовой части профессионального цикла основной образовательной программы направления подготовки 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», квалификация (степень) – магистр.

Для успешного изучения дисциплины «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» необходимо усвоение следующих дисциплин:

- «Логика и методология науки»;
- «Консалтинг в логистике»;
- «Методология инновационного проектирования», «Бизнес-планирование транспортно-технологических систем».

Дисциплина «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» является базой для усвоения следующих дисциплин:

- «Эксплуатация и техническое диагностирование транспортно-технологических машин».

Изучению курса «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» призвано помочь данное методическое пособие. К учебно-методическому пособию прилагаются вопросы и задания, которые можно использовать в процессе проведения семинарских и практических занятий, список контрольных вопросов для зачета и примерный перечень источников. Прилагаемый список источников не является исчерпывающим, и студенты могут как самостоятельно, так и по согласованию с преподавателем изучать иную, избранную ими по тематике курса литературу.

При изучении дисциплины «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» используются следующие образовательные технологии: работа в команде, методы проблемного обучения, обучение на основе опыта, опережающая самостоятельная работа, проектный метод.

Методы проблемного обучения - это устный монолог преподавателя, активизирующий продуктивную мыслительную деятельность путем создания у обучающихся проблемной ситуации или группы проблемных ситуаций с последующими предложениями по ее разрешению, требующими убедительной аргументации и доказательств. Из определения следует, что метод проблемного изложения реализует первый уровень проблемности в обучении, когда преподаватель сам выдвигает проблемы перед обучающимися, показывая им те или иные противоречия и создавая проблемную ситуацию, сам делает предложения по их разрешению, сам доказывает и проверяет доказательство, делает вывод. Главным отличием проблемного изложения от объяснительно-иллюстративного является продуктивная мыслительная деятельность, активность мыслительных процессов, поскольку грамотно построенное проблемное изложение подталкивает обучающихся к получению новых знаний, а не дает их в готовом виде, позволяет студентам идти впереди рассуждений педагога, сверяя свои мысли с его высказываниями. Проблемное изложение прекрасно реализует триединую цель обучения. Оно позволяет качественно усвоить знания, развивает теорети-

ческое мышление, формирует познавательный интерес и профессиональную мотивацию. Проблемное изложение – это, по существу, внутренний диалог с аудиторией.

Опережающая самостоятельная работа - метод, при котором обучаемый взаимодействует с образовательными ресурсами при минимальном участии преподавателя и других обучаемых. Для самообучения на базе современных технологий характерен мультимедиа – подход, при котором используются образовательные ресурсы

Проектный метод основан на стимулировании интереса учащихся к определенным проблемам, предполагающим владение определенной суммой знаний и через проектную деятельность, предусматривающим решение этих проблем, умение практически применять полученные знания, развитие рефлексивного мышления

Изучая данный курс, студенты могут обращаться за дополнительными, индивидуальными консультациями, как к преподавателю, его ведущему, так и к своим научным руководителям.

Для успешной сдачи зачета по дисциплине необходима активная демонстрация студентом своих знаний на практических (семинарских) занятиях, своевременное и правильное выполнение практических и тестовых заданий, а также верные ответы на контрольные вопросы по дисциплине.

Для самостоятельной работы по курсу «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин» отводится определенное количество часов для каждой темы (см. рабочую программу). При сдаче заданий предусматриваются сроки их выполнения и критерии оценки.

Конспект лекций по предмету «Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин»

Лекция 1. Работоспособность машин.

Инженерные расчеты конструкций невозможны без сведений о материалах, из которых они изготавливаются. Все фактические сведения о конструкционных материалах, т.е. их механические характеристики, получают экспериментально. При опытном изучении образцов получают сведения об основных механических свойствах материалов к которым относятся прочность, жесткость, упругость, пластичность, твердость и др., устанавливают степень влияния на механические характеристики температуры, радиоактивного облучения, термообработки и других факторов.

Прочность - это способность конструкции сопротивляться разрушению при действии на нее внешних сил (нагрузок).

Жесткость - способность элемента конструкции сопротивляться деформации.

Упругость - это способность твердого деформируемого тела восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних нагрузок.

Пластичность - это свойство твердого деформируемого тела до разрушения необратимо изменять свою форму и объем от действия внешних сил.

Твердость – способность материала оказывать сопротивление деформированию и разрушению при местных контактных воздействиях.

Вязкость - это свойство оказывать сопротивление за счет трения происходящего при перемещении элементарных частиц тела относительно друг друга в процессе деформирования. Отметим, что при этом, как показывают результаты экспериментов, сила сопротивления, возникающая за счет внутреннего трения материалов, прямым образом зависит от величины скорости перемещения элементарных частиц относительно друг друга.

Ползучесть - это явление, характеризующее изменения во времени величин деформаций и напряжений в теле при действии статических нагрузок.

Выносливость - это явление, которое характеризуется чувствительностью и изменениями прочностных свойств материалов в зависимости от числа циклов нагружения.

В ряде случаев опытному изучению подвергаются отдельные конструкции, их узлы, целые сооружения или их модели. В этих испытаниях проверяются расчетные формулы и схемы, фактическое распределение напряжений в опасных сечениях, выявляются опасные зоны или участки, устанавливается степень надежности сооружения или конструкции.

В связи с различным использованием материалов на практике созданы разнообразные виды и методы испытаний.

Виды испытаний можно классифицировать следующим образом:

1) По характеру воздействия:

- кратковременные испытания;
- длительные испытания.

2) По виду напряженного состояния:

- испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез;
- испытания в условиях сложного напряженного состояния.

3) Технологические испытания:

- испытания для контроля пластичности;
- измерение твердости;
- испытание на вытяжку.

4) Испытание переменной нагрузкой:

- испытание на выносливость;
- испытание на малоцикловую усталость.

5) Испытание ударом:

- испытание на ударное растяжение;
- испытание изгибом на ударную вязкость;
- испытание поворотным ударом.

6) Натурные испытания:

- испытание на стендах;
- испытание готовых изделий.

Как правило, при механических испытаниях металлов все наблюдения и расчеты напряженного состояния производят в макроскопических объемах. В виде исключения прибегают иногда к наблюдениям в микроскопических объемах (наблюдение за отдельными кристаллами). При всех видах механических испытаний образцы металлов по возможности подвергаются тем же внешним воздействиям, что и на практике. Получаемые при этом механические характеристики свойств материала условны, т.к. они зависят от условий испытаний, поэтому методы испытаний унифицируются в рамках ГОСТов, рекомендаций, правил и международных рекомендаций с целью получения сопоставимых данных. Численные значения механических характеристик сводятся в справочные таблицы.

Машины, используемые для проведения испытаний материалов, должны обеспечивать необходимые постоянные скорости нагружения (или деформирования) образцов. Их оснащают аппаратурой для снятия показаний результатов опытов, а в необходимых случаях – приспособлениями для записи диаграммы испытаний. В лабораторных исследованиях используют специальные машины, способные деформировать и разрушать образцы при статических и динамических нагрузках с применением стандартных образцов на растяжение, сжатие, сдвиг, удар и др.

Разработка и серийное производство испытательных машин налажены во многих развитых капиталистических странах: США, Англии, ФРГ, Японии, Италии, Швеции. К настоящему времени насчитываются десятки зарубежных фирм, специализирующихся на выпуске испытательной техники. В США около 40 фирм занимаются разработкой и выпуском такого рода техники, из них 13 выпускают гидравлические испытательные машины: MTS, Olsen, Balduin, Baad и т.д. В Англии из 22 фирм около 6 выпускают гидравлические установки: Instron, Avery, Denison и др., в ФРГ – Shenck, Losenhausen, Mohr-Federhaff, Frebell, Seidner.

В нашей стране имеется один научный центр по испытательной технике - НИКИМПИ (Научно-исследовательский и конструкторский институт испытательных машин, приборов и средств измерения масс, г.Москва) и два объединения, специализирующиеся на выпуске испытательных машин, - ГФП «ЗИМ» (г.Армавир) и ГФП «ЗИП» (г.Иваново).

Объекты испытаний. Требования к образцам и их классификация

В общей методологии проектирования современных машин двумя важнейшими направлениями являются обеспечение функционирования механических систем и обеспечение прочности и заданного ресурса силовых конструкций и механизмов. Часть инженерных задач имеет достоверность оценок и рекомендации с точностью до 15%, но другие задачи решаются на уровне достаточно грубых оценок и прогнозирования. В последнем случае, когда действуют законы статистики и случайные факторы, расчетчики используют введение нормированных высоких коэффициентов запаса.

Задачи обеспечения прочности, ресурса и функционирования машин на основе экспериментальных исследований

Машиноведение и прикладная механика содержат дисциплины, определяющие методологию проектирования и разработку отдельных фундаментальных и частных проблем машиностроения.

Машина создается на базе данных нескольких научно-технических направлений по системам, но ее связующую конструктивную основу составляют силовые конструкции и механизмы. Они определяют значительную долю материалоемкости и массы машины, что, в свою очередь, ставит как первостепенными, задачи обеспечения прочности и ресурса конструкции при ее минимальной массе.

Современное проектирование предусматривает независимо от класса машин несколько стадий в создании и эксплуатации техники.

Экспериментальная механика машин объединяет и обобщает ту область знаний в прикладной механике (механике твердого тела), в теории машин и механизмов и других разделах общего машиноведения, которая изучает экспериментальные методы и средства, применяемые для исследования объектов силовой конструкции машин и механизмов с целью обоснования прочности и ресурса, а также обеспечения функционирования механических систем.

Схема силового проектирования машин и механизмов, этапы расчетного анализа, формулировки критериев функционирования, ресурса прочности, содержание экспериментального обеспечения и обоснования расчетных и проектных работ и самих критериев для заключения о прочности, ресурсе и функционировании машины показаны на рисунке 1.1.

Лекция 2. Виды изнашивания деталей и узлов машин.

Объекты, исследуемые для решения задач прочности и ресурса (табл. 1.3), образуют условный хронологический ряд по этапам создания машины. На основе принятых для машины и ее агрегатов расчетных условий и критериев прочности и ресурса определяют минимальные объемы испытания стандартных образцов материалов и полуфабрикатов ($O_{ст}$, $O_{п}$) для уточнения базовых характеристик и зависимостей в условиях, близких к реальным ожидаемым условиям эксплуатации узла.

Экспериментальные исследования образцов-соединений (O_c), как стандартных, так и специальных, дают базовые характеристики и сравнительные данные о новых видах и технологиях соединений. Эти данные анализируют совместно с данными о жесткости, прочности, усталости и о массовых характеристиках известных соединений.

В разработке соединений, отдельных деталей, узлов, агрегатов и силовых конструкций в целом используют физические модели (M_c , M_a , M_k) и макеты.

Таблица 1.3

Наименование объектов экспериментальных исследований	Обозначение	Решаемые задачи
Стандартные образцы материалов	$O_{ст}$	Механические, упругие, жесткостные, усталостные, коррозионные характеристики, ползучесть и др.
Образцы полуфабрикатов	$O_{п}$	Характеристики изгиба, сдвига, смятия, отрыва, потери устойчивости, теплопрочности полуфабрикатов
Образцы соединений	O_c	Характеристики прочности, усталости, ползучести болтовых, заклепочных, сварных, клеевых, композиционных и других соединений
Модели соединений и отдельных деталей	M_c	Исследование на упруго- или конструктивно подобных моделях силовых потоков, НДС, перемещений, проверка приближенных теоретических расчетов, оптимизация конструкций на основе параметрических исследований
Модели агрегатов и узлов	M_a	
Модели силовой конструкции машин	M_k	
Полунатурные элементы конструкции: панели, стыки, детали, рамы, опоры, и др.	H_d	Исследование несущей способности, силовых потоков, НДС, перемещений, остаточных деформаций и напряжений, теплопрочности, выносливости, остаточной прочности и долговечности, динамики, ударных воздействий, вибро- и акустической прочности, коррозии и других воздействий на конструкции
Натурные агрегаты и узлы	H_a	
Натурная силовая конструкция машины	H_k	
Натурная машина (опытная или серийная)	H	Исследование спектра нагрузок, реальных напряжений, долговечности, вибраций, коррозии, старения и других параметров в эксплуатации

НДС – напряженно-деформированное состояние

В зависимости от объема исходных данных и целей, которые преследуют при создании моделей, рассчитывают, проектируют и изготавливают упругоподобные, конструктивно подобные и динамически подобные модели. Большинство их создают на этапе эскизного и

рабочего проектирования, когда становятся более конкретными силовые связи, жесткости, массовые характеристики и формы деталей.

Количественные оценки для обоснования реальной долговечности и прочности конструкции получают испытаниями полунатурных и натурных деталей, узлов, агрегатов (H_d , H_a) по программам, максимально приближенным к эксплуатационным условиям, и по нагрузкам программного эквивалента. В некоторых случаях применяют ускоренные испытания, форсируя основные режимы работы конструкций: повышая частоту, уровень нагрузок и непрерывно проводя испытания.

Исследования натурной силовой конструкции H_k на прочность и долговечность (ресурс) выполняют на основании действующих нормативно-технических документов.

Большие и трудоемкие исследования проводят на различных этапах создания машины для выявления работоспособности конструкции и материалов в местах силового контакта и трущихся поверхностей. Подшипниковые узлы, трансмиссии и передачи, робототехнические системы, энергоблоки и т.д. испытывают при стендовой и эксплуатационной нагрузке с измерением многих параметров. Условная классификация (табл. 1.4) показывает объекты исследований механических систем на функционирование, основные задачи и требуемые технические средства испытаний.

Таблица 1.4

Объекты экспериментальных Исследований (группы)	Обозначение	Примеры типовых образцов, узлов, агрегатов, машин	Примеры исследований объектов механических систем	Оборудование для испытаний
Образцы пар трения: антифрикционные, фрикционные, для анализа смазок	$O_{пт}$	Образцы пальчиковые, пластинчатые, дисковые (торцовые), кольцевые (торцовые), типа вал-вкладыш или вал-втулка, вал-призма, вал-палец, ролик по роликам, шарик по шарикам	Определение коэфф. трения пар, моментов и сил трения, износостойкости материалов, условий изнашивания и заедания, фрикционной теплостойкости и изнашивания, сравнение свойств смазочных материалов	Машины трения и специальные стенды (установки)
Модели триботехники	$M_{тб}$	Масштабные физические макро- и микромоделі подвижных силовых узлов и соединений	Изучение изнашивания и параметров трения на моделях и пересчет данных на натурный объект согласно теории подобия и размерности	Установки и стенды, машины трения
Модели механизмов: кинематические динамические	$M_{мк}$ $M_{мд}$	Масштабные кинематические модели сложных пространственных механизмов.	Изучение перемещений, скоростей и ускорений элементов механизма.	Установки и стенды, машины трения

		Структурные динамические модели	Качественные оценки перегрузки, форм, частот, амплитуд и ускорений, устойчивости.	
Модели и макеты машин и робототехники	M_{mm}	Масштабные, аэродинамические, гидродинамические, воздушные-летающие, погружаемые, функциональнодействующие, увязочные и т.д.	Изучение функциональных характеристик объектов на моделях. Геометрическая увязка и оптимальное месторасположение узлов, агрегатов, элементов управления на макетах	Аэродинамические трубы, гидробассейны, грунты и специальные среды
Натурные узлы подвижных соединений	N_{yc}	Подшипники, муфты, сцепления, тормоза, валы и уплотнения, направляющие станков, технологических и управляющих устройств, карданы и т.д.	Кинематическая точность и плавность хода, допустимые частоты вращения, биение, деформирующая и компенсационная способность (муфт), предельный износ, контактное схватывание, температурная выборка зазоров, шумность, КПД	Специальные стенды и приспособления
Натурные и полунатурные элементы передач и трансмиссий	$N_{эп}$	Зубчатые, червячные, планетарные, волновые передачи; цепные, ременные, винтовые (винт-гайка), шариковые передачи; карданные трансмиссии, редукторы, гидромеханические передачи и элементы.	Износостойкость при предельных и эксплуатационных контактных нагрузках, кинематическая точность и плавность при допустимых люфтах; жесткость и собственные частоты, допустимые скорости шум, КПД, температурные режимы и надежность герметичности	Специальные стенды и машины, приспособления и приборы регистрации параметров
Натурные передачи и трансмиссии	$N_{п}$			

			зации уплотнений и сальников	
Натурные автоматические транспортирующие и робототехнические системы	H_{ap}	Автоматические линии, транспортеры, технологические роботы и гидроусилители, системы силового управления, шасси, демпферы	Точность технологических и транспортирующих операций, оценка допустимого износа, надежность дублирования, жесткость, параметры деформирования, влияние вибраций и динамики	Полунатурные стенды и агрегаты
Натурные энергоагрегаты и энергомашины	$H_{эм}$	Атомные реакторы, парогенераторы, турбины, пневмокомпрессоры, ДВС, РД, ТРД, системы мотор-генератор и т.д.	Стендовые и натурные испытания и исследования по специальной программе	Стенды и комплексы
Натурная машина, конструкция или система	H_k H_n	Автомобили, тракторы, сельскохозяйственные, дорожные, горнодобывающие машины, станки, прессы, прокатные станы, надводные и подводные суда, летательные и космические аппараты, буровые установки, атомные электростанции и т.д.	Натурные, эксплуатационные и пусковые испытания по специальной программе	Испытательные комплексы, полигоны

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 3. Методы и способы оценки технического состояния машин.

Объекты исследования при механических испытаниях – образцы, модели, элементы конструкций и конструкции в натуральную величину. Наиболее широко используются образцы. Образцом называется тело специальной формы, подвергающееся испытанию для оценки механических свойств материала.

В настоящее время испытывают разнообразные образцы, которые отличаются друг от друга формой, размерами, назначением. Некоторые типы образцов регламентируются нормативами. К ним относятся образцы для испытаний на одноосное растяжение и сжатие, на кручение и изгиб, образцы для усталостных испытаний и др. Многие типы образцов, особенно используемые в научно-исследовательской работе, не регламентируются нормативными документами, например образцы для испытаний в сложном напряженном состоянии.

Для получения сопоставимых и воспроизводимых результатов механических испытаний образцы должны отвечать соответствующим требованиям. Заготовки образцов должны быть отобраны из прутков, листов или отливок одной и той же плавки или партии. Прежде всего изучается химический состав металла или сплава, т. е. устанавливается количественное содержание химических элементов в исследуемом материале. Механические свойства металлов и сплавов очень сильно зависят от их структурного состояния. Металлы и сплавы представляют собой поликристаллические вещества, поэтому необходимо провести микроструктурный анализ. Структурное состояние металлов зависит от режима термообработки, технологии литья или прокатки. Без знания химического состава и структурных характеристик металла невозможно достаточно надежно оценить его механические свойства. Всякий образец содержит рабочую часть, в которой реализуются однородные напряженное и деформированное состояния. Необходимость реализации однородного напряженно-деформированного состояния в рабочей части образца увязана с тем, что не существует метода прямой оценки напряжений в точках деформированного тела. Существующие методы исследования напряженно-деформированного состояния тел позволяют измерять деформацию на внешней поверхности исследуемого тела. Величину напряжений в точках тела оценивают по внешним силам, но это возможно только при соблюдении определенных условий.

Условия проведения эксперимента реализуются путем выбора формы образца, приложением к нему таких внешних сил, при которых с достаточной степенью достоверности можно считать, что напряженное и деформированное состояния во всех точках исследуемого образца одинаковы, т. е. в нем создано однородное напряженно-деформированное состояние. Обеспечив такие условия эксперимента, по измерениям взаимных перемещений точек на поверхности образца можно судить о деформациях во внутренних точках. По измеренным внешним силам можно рассчитать напряжения во внутренних точках исследуемого образца, приняв гипотезы однородности, сплошности и изотропности. На рабочей части образца выделяется расчетный участок, который используется для измерения соответствующих параметров (удлинений, укорочений, углов закручивания и поворота, изменений поперечных размеров и др.).

Чаще всего образец представляет собой стержень круглого, кольцевого или прямоугольного поперечного сечения. Форма рабочей части образца зависит от вида заготовки. Если в качестве заготовки используется пруток, отливка или лист большой толщины, то рабочая часть образца имеет цилиндрическую форму; если заготовка – относительно тонкий лист, то рабочая часть образца имеет призматическую форму. Процесс получения заготовки образца регламентируется нормативными документами. Предпочтительным является образец цилиндрической формы.

Образец получают механической обработкой (точением, фрезерованием, шлифованием, полированием). При этом нужно исключить изменение механических свойств материала образца относительно механических свойств исходных заготовок. В некоторых случаях в качестве образцов используются полуфабрикаты (проволока, лента, нити, канаты, арматура и т. п.).

К геометрической форме образца предъявляются требования, которые регламентируются нормативными документами и инструкциями. Совершенство геометрической формы образца позволяет правильно оценить результаты испытаний и воспроизвести их в последующих опытах. Недопустимы изменения поперечных размеров рабочей части образца, искривление его оси и другие геометрические несовершенства формы, приводящие к неоднородности напряженно-деформированного состояния выше предельных значений, предусмотренных инструкциями.

Значительное влияние на результаты механических испытаний образцов оказывает состояние поверхности рабочей части образца. Наличие царапин, вмятин, острых надрезов, раковин может привести к местному изменению напряженно-деформированного состояния, что, в свою очередь, приведет к преждевременному разрушению материала и исказит результаты опыта.

Шероховатость внешней поверхности рабочей части образца для статических испытаний должна соответствовать шероховатости, получаемой тонким точением или шлифованием. У образцов, предназначенных для усталостных испытаний, шероховатость поверхности должна быть ниже и достигаться тонким шлифованием и полированием.

Образец для механических испытаний должен быть однородным по химическому составу и микроструктуре. На рабочей части образца не должно быть раковин, волосовин, трещин, инородных включений и других дефектов структуры, влияющих на распределение внутренних сил, т. е. приводящих к неоднородности напряженно-деформированного состояния. Структурное состояние образца желательно оценивать методами неразрушающего контроля. Образцы, содержащие заметные дефекты структуры, должны быть отбракованы.

На структурное состояние металлов и их сплавов важнейшее влияние оказывает термообработка, поэтому она должна строго соответствовать заданной. На структурное состояние, по крайней мере, поверхностных слоев образца значительное влияние оказывают режимы механической обработки (скорость и глубина резания, охлаждение), приводящие к поверхностному наклепу. Поверхностный наклеп особенно нежелателен для образцов малых размеров (микрообразцы, тонкостенные). Некоторые виды термообработки, например закалка, приводят к неоднородности структуры образца, особенно при большом его сечении, так как глубина термообработанного слоя может быть невелика.

Геометрические формы образцов из металлов и сплавов, предназначенных для исследования упругопластических и прочностных свойств, весьма многообразны, но наиболее широко используются образцы в виде стержня с утолщениями на его концах (рис. 1.11). Эти утолщения называются головками. Форма головки зависит от конструкции захватов испытательной машины, соответствующих виду нагрузок на образец (рис. 1.12).

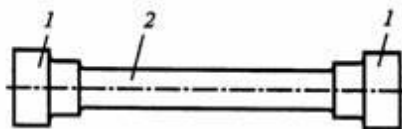


Рис. 1.11. Цилиндрический образец для испытаний на растяжение:
1 – головка; 2 – рабочая часть

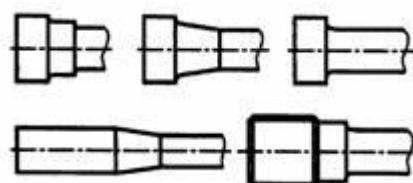


Рис. 1.12. Типы головок цилиндрических образцов для испытаний на растяжение

Для плоских образцов конструкции головок более однообразны по форме (рис. 1.13). Переход от рабочей части к головкам делается плавным, без резкого изменения формы, чтобы уменьшить концентрацию напряжений и тем самым обеспечить в рабочей части образца однородное и одноосное напряженное состояние.



Рис. 1.13. Головки плоских образцов для испытаний на растяжение

Длина рабочей части в 5–10 раз превышает ее наибольший поперечный размер. Переходный участок выполняется в виде торообразной или конической поверхности. Способ закрепления образцов не должен допускать их проскальзывания относительно захватов, смятия опорных поверхностей головок, а также разрушения образцов на переходных участках и в головках. Технология изготовления образцов должна обеспечивать строгую соосность головок и рабочей части, перпендикулярность опорных плоскостей головок к оси образца. Благодаря высокой точности изготовления образца осуществляется качественное центрирование его в захватах современных испытательных машин и предотвращается внецентрированное растяжение.

При испытании на растяжение образцов, находящихся в хрупком состоянии, принимаются все меры к снижению концентрации напряжений и к высокоточному осевому нагружению образца. Образец из хрупкого материала показан на рисунке 1.14.

Образцы для испытаний на одноосное сжатие, как правило, не имеют головок и представляют собой короткие цилиндры или призмы в зависимости от вида заготовки. Отношение длины рабочей части образца к его наибольшему поперечному размеру для предотвращения изгиба не должно превышать трех (рис. 1.15). Торцы образца необходимо изготовить параллельными друг другу и перпендикулярными оси образца.

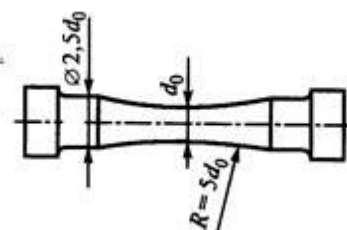


Рис. 1.14. Образец из хрупкого материала для испытаний на растяжение

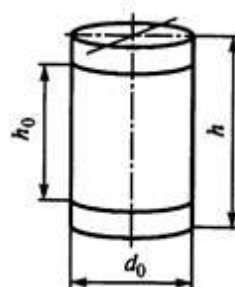


Рис. 1.15. Образец для испытаний на сжатие

Образцы для испытаний на кручение имеют примерно такую же форму, как и образцы для испытаний на растяжение. Применяются как сплошные (рис. 1.16, а), так и полые образцы, поперечное сечение которых – тонкостенное кольцо (рис. 1.16, б). Переходный участок выполняется в виде горообразной поверхности. Конструкция головок должна обеспечить передачу крутящего момента к рабочей части образца. Головки имеют две или четыре грани для передачи крутящего момента от захватов испытательной машины к образцу. На рабочей части выделяется расчетный участок, в пределах которого устанавливаются угломерные устройства, позволяющие определять угол закручивания.

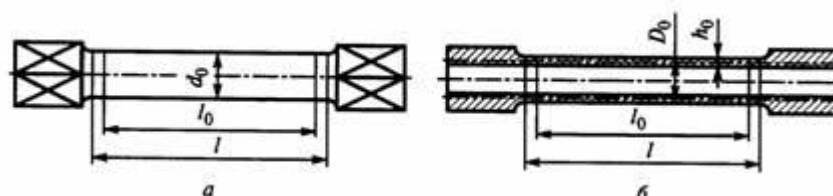


Рис. 1.16. Образцы для испытаний на кручение: а) сплошной; б) трубчатый

Образцы для испытаний при сложном напряженном состоянии представляют собой тонкостенные цилиндрические трубы с головками, конструкция которых зависит от видов тех нагрузок, которые должны быть переданы рабочей части (осевая сила, крутящий момент, внутреннее или внешнее давление либо их сочетание). При проведении испытаний в камерах высокого давления применяются сплошные цилиндрические образцы. Размеры и форма образцов для этого вида испытаний не регламентируются.

Некоторые виды механических испытаний образцов металлов и сплавов регламентируются нормативами. К ним относятся испытания на растяжение при комнатной, пониженной и повышенной температурах, на сжатие и на кручение. В процессе этих испытаний определяются механические характеристики металлов и сплавов. Под механической характеристикой понимается величина, характеризующая упругие, прочностные или деформационные свойства металлов и сплавов.

Механические характеристики носят условный характер, так как зависят от метода испытаний и способа обработки экспериментальных данных. Поэтому оценку механических характеристик проводят строго регламентированными методами, что необходимо для обеспечения сопоставимости их значений. Механические характеристики металлов и сплавов определяются в условиях однородного напряженно-деформированного состояния и используются в расчетах на прочность и жесткость элементов конструкций и сооружений.

К механическим характеристикам относится модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, относительные остаточные удлинения и сужения после разрыва.

Лекция 4. Критерии предельного состояния деталей и узлов машин.

Деформации (и перемещения) являются линейными аналогами многих механических величин. При определенных условиях, например при правильно спроектированных упругих элементах они становятся почти идеальными носителями информации в преобразователях и градуируются в размерности сил, моментов, ускорений, напряжений, давлений, масштабных перемещений и даже в размерности параметров усталости (в счетчиках ресурса). Большинство средств измерения спектров нагрузок, условий эксплуатации, параметров вибрации, макро- и микроперемещений в элементах машин построено на преобразовании деформации в электрический сигнал, который трансформируют специальной аппаратурой и записывают аналоговыми или цифровыми регистраторами.

Принципы преобразования могут быть различные: тензорезисторные потенциометрические, индуктивно-трансформаторные, емкостные, ультразвуковые, пьезоэлектрические, частотные и др. Современное развитие промышленной микроэлектроники сузило номенклатуру массовых типов преобразователей, но расширило число типов специализированных преобразователей. Измерение нагрузок при испытании агрегатов, моделей, узлов и деталей осуществляют в основном тензорезисторными динамометрами (ТД) с выходом сигнала на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и передачей его на управление процессом нагружения, а также на регистрирующие и цифровые показывающие приборы. ТД изготавливают для измерения нагрузок и крутящего момента, а также для многокомпонентных измерений, например, для гидродинамических и аэродинамических экспериментов. Изучение или воспроизведение виброакустических нагрузок, амплитуд и ускорений выполняют специальными преобразователями и высокочастотной аппаратурой. Различают устройства измерения параметров при эксплуатации и испытании машин и устройства реализации виброакустических нагрузок при испытании агрегатов (виброметры, шумометры, акселерометры, частотные анализаторы, самописцы, вибраторы, вибростенды, сирены и т.д.).

Преобразователи давлений для измерений в жидкостях, газах, сыпучих средах (датчики давлений ДД) имеют ряд особенностей и характерные условия применения: малые габариты ДД (миниатюризация) для проведения модельных экспериментов в аэродинамических трубах, каналах, гидросистемах; выполнение измерений давления при высоких (низких) температурах в энергетических установках, в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) при нестационарных температурах и пульсирующих взрывах газовых смесей.

Развитие средств измерения перемещений (датчики перемещений ДП) характеризуется значительным разнообразием принципов и широтой диапазона измерений. Классифицируют ДП по следующим параметрам:

- 1) *диапазону*: датчики микроперемещений (0–100 мкм); датчики миллиметрового диапазона (0,01–10 мм, 0,1–100 мм); датчики больших перемещений (0,5–5000 мм);
- 2) *типу процесса*: датчики статических перемещений; датчики высокочастотного контроля амплитуд и смещений; датчики перемещений для повышенных (пониженных) температур; универсальные датчики перемещений;
- 3) *принципу измерения*: тензорезисторные, индуктивные, емкостные, потенциометрические, ультразвуковые, пневматические, оптические, фотомодуляционные (растровые), механические, а также контактные-бесконтактные;
- 4) *измеряемым параметрам*: осевые (линейные), угломерные (плоские и пространственные), кривизномерные и комбинированные.

Исследование деформаций и напряжений

Различают методы исследования полей деформации, которые применяют при изучении сложных НДС, когда неизвестны главные направления, и методы измерения деформаций по отдельным точкам тензомерами (экстензомерами).

Каждый инженерный метод имеет свою область оптимального применения и эффективные комбинации с другими методами. Нельзя требовать от специализированных средств

универсального применения для всего разнообразия практических задач, что может привести к отрицательным результатам. В этом смысле важна вся информация об уже решенных инженерных задачах, выполненных конкретным методом. Одним из направлений в экспериментальной механике должна стать систематизация решений, которых, вообще говоря, ограниченное число. Это объясняется значительной трудоемкостью экспериментальных исследований.

Разработка новых методов и средств изучения НДС связана в последние годы в основном с поисковыми работами в области голо- и спеклинтерферометрии, пневматических и ультразвуковых средств, методов проникающих излучений, оптико-геометрических методов, тепловидения, термографии. В то же время произошла значительная модернизация известных методов; так, например, получил новое развитие метод хрупких тензочувствительных покрытий и зеркально-оптический метод. Одним из важных направлений развития методов изучения НДС является автоматизация многих процессов обработки данных на ЭВМ и создание специализированного программного обеспечения, а также автоматизация самого процесса измерения и сбора данных на ЭВМ.

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 5 Методики испытания узлов, систем и машин.

Цель исследования прочности материалов, деталей и конструкций – это получение прочностных характеристик для паспортизации материалов и полуфабрикатов; определение разрушающих нагрузок для оптимизации несущей способности деталей и соединений при проектировании; проведение контрольных сертификационных статических испытаний на расчетные нормированные нагрузки до разрушения и расчет запаса прочности (избыток прочности), не превышающего допустимого по весовому критерию.

Аналогичные цели ставят при усталостных испытаниях, но в этом случае главными параметрами являются уровень средних напряжений и число циклов (часов) до разрушения.

Развитие техники испытаний на прочность и сопротивление усталости происходит в направлении автоматизации нагружения, измерения параметров, контроля и калибровки, обработки данных, формирования информации, ее накопления и оперативного представления, редактирования документации и ее размножения. Для целей автоматизации используют мини- и микроЭВМ, периферийные устройства. Тем самым достигается замена длительных трудоемких операций, повышается уровень стандартизации испытаний, метрологическая культура, объективность оценок и увеличение числа исследуемых параметров.

Структурная схема испытаний на прочность (усталость) или работоспособность дана на рисунке 1.17. Правая часть схемы составляет информационно-измерительную систему (ИИС), левая – управляющий вычислительный комплекс (УВК). Общим инструментом для выполнения всех операций является ИВК – измерительно-вычислительный комплекс, который выполняет прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения электрических величин, управляет процессом измерения и воздействия на объект, представляет результаты измерений оператору в заданном виде. ИВК обеспечивает восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных преобразователей, управление средствами измерений и выработку нормированных электрических сигналов, являющихся входными для анализа точности измерений; контролирует величины силового (или другого типа) воздействия на объект; представляет результаты в установленных формах.

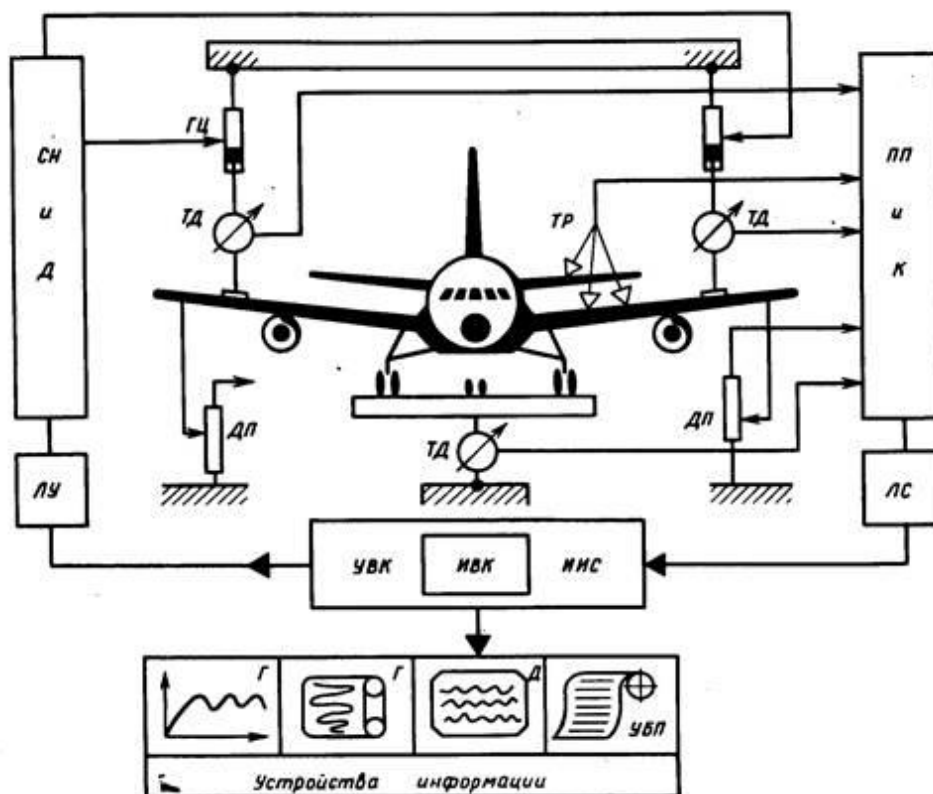


Рис. 1.17. Структура системы испытания на прочность (усталость) или работоспособность: СН и Д – система нагружения и движения; ПП и К – первичные преобразователи и коммутаторы; ЛС – линии связи; ЛУ – линии управления; Г – графопостроители; Д – дисплей; УБП – устройство быстрой печати; ТД – тензодинамометры; ДП – датчики перемещения; ТР – тензорезисторы; ГЦ – гидроцилиндры

Развитие автоматических систем испытания на прочность (усталость) прошло несколько этапов ограниченной автоматизации, прежде чем выработалось рациональное сочетание по многоканальности и быстродействию для ИИС и УВК. В некоторых случаях удобнее использовать только несколько модулей ИИС, или при блочно-модульном построении УВК применять отдельно модули (стойки) АСУН (автоматические системы управления нагружением) для нескольких независимых испытаний. Программное управление осуществляют от встроенного в ИВК процессора (мини- или микроЭВМ); используют, как правило, серийно выпускаемые агрегатные средства измерений и автоматизации, типовые интерфейсы.

Частным случаем системы испытания являются испытательные машины и функциональные стенды (установки) (рис. 1.18), которые структурно повторяют многоканальные системы (см. рис. 1.17), но имеют простую схему обратной связи, поскольку большинство из них – одноканальные. Развитие систем испытаний происходит в нескольких направлениях. Так, в зависимости от частот (скоростей) нагружения, мощности и принципов управления нагрузками наиболее универсальными для машин и агрегатов являются электрогидравлические и электромеханические принципы испытаний, менее гибкими – электродинамические и пневмоэлектрические.



Рис. 1.18. Стенд для испытания конструкций

Одновременно с системами основных нагрузок развиваются системы физического моделирования условий эксплуатации (испытаний). Применяют устройства для лучистого и конвективного нагрева, термобарокамеры, криостаты, климатические и реверберационные камеры и т.д.

Научно-исследовательский испытательный комплекс (НИИК) Всероссийского НИИ экспериментальной физики (Российский федеральный ядерный центр) проводит экспериментальные исследования образцов военной техники из ядерного арсенала России и изделий гражданского назначения на прочность и стойкость к внешним механическим, тепловым и климатическим нагрузкам на протяжении всего срока службы.

Научно-технические возможности комплекса позволяют исследовать различные характеристики и параметры конструкций (напряженно-деформированное состояние, взаимные

перемещения деталей и узлов, уровни нагрузок, тепловые поля, динамические характеристики и т. д.) как при одиночном, так и при комплексном воздействии на них инерционных, вибрационных, ударных и климатических нагрузок, а также проводить дистанционные испытания изделий, содержащих взрывчатые, радиоактивные вещества и делящиеся материалы.

На испытательных установках НИИКа могут быть получены:

- статические нагрузки до сотен тонн;
- перегрузки в тысячи единиц при ударе;
- различные виды вибрационных нагрузок;
- арктический холод и тропическая жара, 100%-я влажность и солнечная радиация.

Методологическая и аппаратурная оснащенность испытательного комплекса обеспечивает:

- подтверждение многолетнего гарантийного срока службы конструкций по результатам их форсированных испытаний;
- фундаментальные исследования физико-механических и радиационных характеристик всевозможных конструкционных материалов и взрывчатых веществ;
- испытания на прочность и герметичность газовых систем различного назначения гидравликой, вакуумированием и газом;
- испытания конструкций на воздействие высокого давления одновременно с линейными, вибрационными или ударными ускорениями;
- диагностирование поврежденных конструкций и газовых систем методами рентгенографии, ультразвука, акустической эмиссии, течеискания, тензометрии и др.;
- возможность компрессии водорода, азота, аргона и других газов на передвижных установках;
- проведение необходимого объема измерений и их обработку с использованием современных измерительных и вычислительных комплексов.

Узлы испытательных машин

Для испытаний материалов применяется множество самых разнообразных машин (рис. 1.19, 1.20). Однако, несмотря на всё их разнообразие, всем машинам присущи одни и те же основные части, а именно:

а) *устройства, вызывающие появление усилия*, действующего на образец. Простейшими являются механизм прямого нагружения (поддон с гирями) и механизм рычажного нагружения (позволяющий малым весом гирь создать большое усилие).

Усилие может быть вызвано механическим воздействием, например вывинчиванием винта (шпинделя) из массивной гайки, причём сама операция вращения может производиться через систему зубчатых зацеплений вручную или от двигателя. Усилие, действующее на образец, может быть создано путём увеличения давления жидкости на поршень, в цилиндре.



Рис. 1.19. Электромеханические испытательные машины

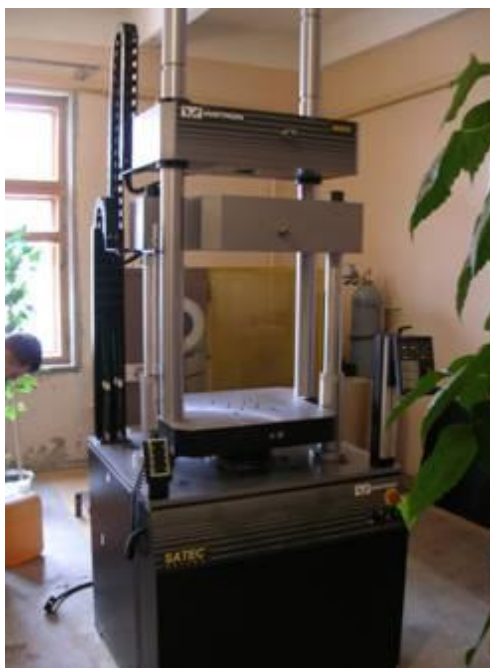


Рис. 1.20. Гидравлическая универсальная машина

Приёмы осуществления методов возбуждения усилий довольно разнообразны и приведены в описаниях каждой машины. В зависимости от способа возбуждения усилия машины чаще всего и получают своё наименование: гидравлический пресс, рычажная машина, шпиндельная машина и т. д.

Для специального изучения эффекта динамических воздействий применяются кривошипно-шатунные механизмы, разнообразные копры и другие устройства;

б) *силоизмерительные устройства* предназначены для измерения приложенной нагрузки. Воздействие силы на один конец образца требует такого же воздействия и со стороны другого конца. Поэтому вызванное усилие нужно уравновесить так, чтобы его можно было измерить.

Применив неравноплечий рычаг, можно малым грузом уравновесить большое усилие, действующее на образец. Система двух неравноплечих рычагов позволяет грузом порядка 10 кг уравновешивать усилие в 50 т.

Большое распространение имеет уравнивание маятниковым противовесом. Величина усилия будет пропорциональна отклонению маятника, отклонение же маятника передаётся силоизмерительному устройству, часто очень простому.

При прямом нагружении (как и при рычажном) о величине усилия судят по сумме веса набора гирь. Однако не обязательно измерять именно уравнивающие усилия: существуют конструкции машин, где силоизмерительное устройство регистрирует величину активной силы.

Название многих испытательных машин определяется и типом силоизмерительных устройств, например: машина с маятниковым противовесом, машина с манометрическим измерением усилия.

Во многих случаях уравнивающие и силоизмерительные устройства оснащаются прибором для автоматической записи диаграмм, выражающих зависимость деформаций от нагрузок;

в) *опорные приспособления*. В эту группу устройств входят цилиндрические опоры для испытания балок; плиты для установки образцов при испытании на сжатие; приспособления, центрирующие нагрузку; захваты разных систем при испытании на растяжение; заклинивающие устройства при испытании на кручение. Сюда же могут быть отнесены так называемые реверсоры – приборы, меняющие направление или характер действия сил (например создающие при сжимающей силе пресса растягивающее усилие или крутящий момент в образце);

г) *все перечисленные устройства монтируются на станине машины* и ею объединяются. Все усилия, создаваемые испытательной машиной, уравниваются в пределах станины. От испытательной машины на фундамент передаётся лишь собственный вес машины и динамическое воздействие от упругой отдачи при разрушении образца.

Лекция 6. Выбор параметров испытаний. Выбор планов испытаний.

В качестве примера можно привести схему пресса силой 60 т (рис. 1.21). Образец 1 помещается между верхней неподвижной 2 и нижней подвижной 3 стальными плитами пресса. Подвижная плита 3 входит своей нижней сферической частью в соответствующее углубление поршня 4, находящегося в цилиндре 5. При вращении вала насоса 6 масло из бака 7 перекачивается насосом по маслопроводной трубке 8–9 в цилиндр 5. Вследствие повышения давления поршень 4, поднимаясь вверх, сжимает образец силой, пропорциональной давлению масла в цилиндре 5.

Для измерения величины давления цилиндр 5 соединён трубопроводами 10 и 11 с другим цилиндром 12 значительно меньшего диаметра. Масло выдавливает из цилиндра 12 поршень 13, скреплённый поперечиной 14 с тягами 15. Тяги поворачивают за короткое плечо 16 угловой рычаг, длинное плечо которого 17 с грузом 18 является маятником. Момент веса маятника относительно оси вращения углового рычага уравнивает момент силы, действующей на короткое плечо рычага (силы, выдавливающей поршень 13 из малого цилиндра 12 и пропорциональной давлению масла в цилиндрах 5 и 12). Таким образом, отклонение маятника также пропорционально силе, сжимающей образец. Верхний конец рычага 17 при отклонении передвигает стержень 19, лежащий на роликах, один из которых сидит на общей оси со стрелкой 20. Конец стрелки при её вращении движется по циферблату с делениями, показывающими величину силы, сжимающей образец.

Перемещением груза 18 по рычагу можно изменять предельную величину усилия, развиваемого машиной. Возможны установки груза на 6, 12, 30 и 60 т. При установке груза в низшем положении 60 т будут предельной нагрузкой, при которой маятник отклонится в крайнее положение, а стрелка 20 опишет по циферблату полную окружность. При установке груза 18 в верхней части рычага крайнее отклонение маятника будет соответствовать усилию в 6 т. Так как стрелка указателя силы также обойдёт полностью циферблат при возрастании нагрузки от 0 до 6 т, как и в первом случае, то цена деления будет в 10 раз меньше и, следовательно, точность измерения силы будет во столько же раз больше.

Для разгрузки пресса открывается вентиль 21, и масло выходит по трубкам 10 и 11 из цилиндров 5 и 12 обратно в бак 7.

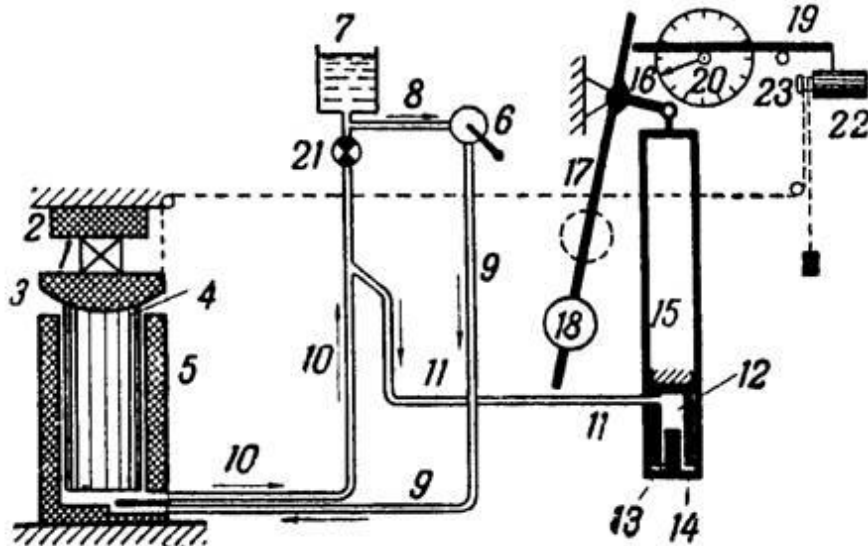


Рис.1.21. Гидравлический пресс с маятниковым приводом

Для автоматического вычерчивания диаграммы сжатия имеется специальное устройство. К нижней стальной плите 3 прикреплён конец шнура, пропущенного затем через кольцо, прикрепленное к верхней плите 2. Шнур, пройдя промежуточные направляющие кольца, перекидывается через шкив 23, расположенный с торца барабана 22. На свешивающийся конец шнура для натяжения его подвешена небольшая гирька.

Так как верхняя стальная доска пресса неподвижна, то поднятие нижней плиты 3 равно деформации (укорочению) образца (если не учитывать деформации опорных плит и некоторого поднятия верхней плиты 2 вследствие удлинения колонок пресса). При поднятии плиты 3 шнур поворачивает барабан вокруг его оси. Вокруг барабана 22 обернута бумага, на которой вычерчивается диаграмма.

К стержню 19 прикреплен карандаш, который, передвигаясь вместе со стержнем при изменении сжимающей силы, чертит на бумаге линию, абсциссы которой (вращение барабана) дают абсолютное укорочение образца, а ординаты (передвижение стержня 19) – силу, сжимающую образец. Масштаб оси абсцисс (укорочений) зависит от отношения диаметра барабана к диаметру шкива, а масштаб оси ординат (нагрузки) – от установки груза 18. Этот прибор даёт диаграммы малого размера и небольшой точности, но всё же вполне пригодные для иллюстрации процесса сжатия.

Машины для испытаний на растяжение системы И.В. Кудрявцева и М.И. Чулошникова

Центральным научно-исследовательским институтом точного машиностроения сконструированы для испытания образцов на растяжение машины силой 4 т (ИМ-4) и 12 т (ИМ-12). Принципиальные схемы обеих машин аналогичны. На этих машинах можно испытывать цилиндрические образцы диаметром от 3 до 10 мм (ИМ-4Р) и от 6 до 15 мм (ИМ-12), а также плоские образцы соответственных размеров. Схемы машины ИМ-4Р даны на рисунке 1.22.

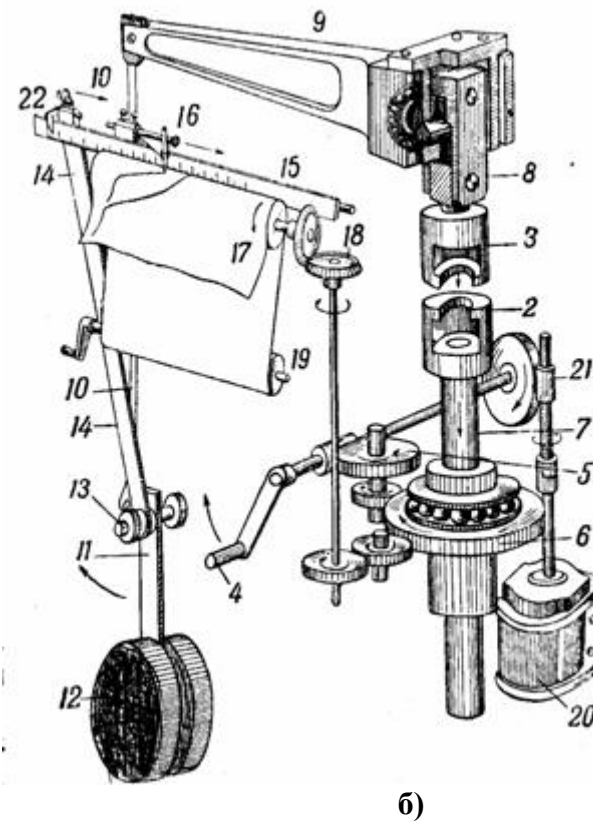
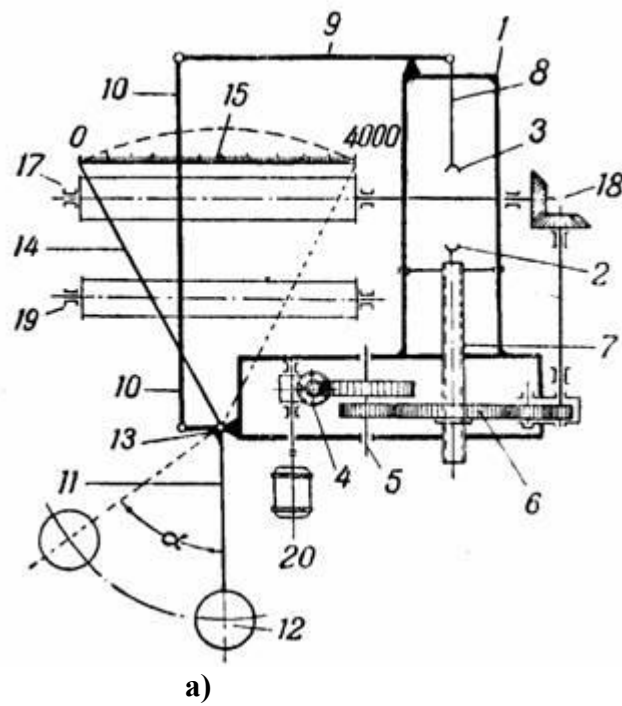


Рис. 1.22. Схема машины ИМ-4Р

На станине 1 смонтированы все устройства машины. Образец при испытании на растяжение устанавливают в захваты 2 и 3. Рукоятью 4 приводится во вращение система зубчатых зацеплений 5, заканчивающихся зубчатой гайкой 6, которая втягивает в себя винт 7. В верхней части винта 7 устроен захват 2.

Создаваемое при этом усилие через образец передаётся захвату 3. От захвата 3 через тягу 8 усилие действует на короткое плечо рычага 9. Тяга 10 соединяет конец длинного плеча рычага 9 с коротким концом коленчатого рычага 11, который вместе с грузами 12 является маятником, уравнивающим своим отклонением возникающее в образце усилие.

Отклонение маятника (пропорциональное силе, растягивающей образец) вызывает поворот рычага 14, насаженного на общую с маятником ось 13. Верхний конец рычага 14 приводит в движение вдоль горизонтальной рейки 15 каретку 16 с указателем и карандашом.

С системой зубчатых зацеплений 4–5–6 связан валик 17 (при помощи вспомогательной зубчатой передачи 18). Вращение всех зубчатых передач пропорционально величине опускания захвата 2.

Опускание захвата 3 мало (оно равно вертикальному перемещению конца очень короткого плеча рычага 9), поэтому можно считать, что карандаш 16 отмечает по окружности валика 17 величины, пропорциональные абсолютной деформации образца. Перемещение же карандаша вдоль деревянного валика пропорционально действующей силе.

Порядок пользования машиной ИМ-4Р

Наматывают рулон диаграммной бумаги на нижний валик 19, вращая его по часовой стрелке (если смотреть со стороны маятника). При заправке бумаги на верхний валик 17 его освобождают от сцепления с приводной системой зубчатых колес 18. Закрепив бумагу, включают сцепление валика 17 с зубчатками 18.

Каретку 16 с карандашом ставят в нулевое положение. Прочерчивают координатные оси: ось абсцисс наносится при холостом ходе машины, т. е. при нулевой нагрузке; ось ординат получается при отклонении вручную рычага 14 с кареткой 16 вправо при неподвижном валике 17.

Заправив бумагу, устанавливают в захватах машины образец. Затем вращением рукояти 4 устанавливают нижний захват 2 на такой высоте, что образец оказывается чуть натянутым. Через систему зубчатых передач 21, действующую от мотора 20 на систему 5–6–7, описанную ранее, пускают в ход электромотор. Переключатель от электромотора можно устанавливать в одно из трёх положений: прямой ход, стоп и обратный ход.

Нагружение можно производить также при помощи ручного привода, вращая рукоятку по часовой стрелке (система передач 21 при этом выключается). Разгружение производится вращением рукоятки против часовой стрелки. Нагружение ручным приводом требует больше времени, чем электромотором.

Автоматическую запись кривой иногда прекращают после прохождения участка текучести; если же запись ведётся вплоть до разрушения образца, то в момент разрыва образца из-за быстрого отклонения маятника 12 вправо связанная с ним каретка с пером также быстро передвигается к началу шкалы и попадает там на защёлку 22; одновременно нарушается сцепление рычага 14 с кареткой 16, и дальнейшие качания маятника происходят независимо от каретки, которая, попав на защёлку, остаётся неподвижной.

При наличии реверсоров на машине можно производить испытание на сжатие и на срез.

Машины для испытаний на усталость

Расчетные критерии прочности, усталости и функционирования (работоспособности), на основании которых проектируют силовые агрегаты новой машины, проверяют экспериментально лабораторными, стендовыми, полигонными и эксплуатационными испытаниями. На этапе опытных работ проводят испытания поисковых образцов, моделей и натурных узлов силовой конструкции или механизмов (см. табл. 1.3 и 1.4). На этапе изготовле-

ния опытных или серийных конструкций несколько экземпляров узла, агрегата или машины передают на статические испытания для определения несущей способности, усталостные и функциональные испытания.

Для механизмов, передач и других отдельно комплектующихся агрегатов проводят стендовые ускоренные испытания на функционирование (работоспособность), которые часто совмещают с изучением жесткости, точности, изнашивания и усталости при максимальных режимах, или задаются реальной циклограммой повторяемости нагрузок (режимов) и осуществляют длительные испытания до выработки назначенного начального ресурса.

Программы на опытные и сертификационные испытания (на прочность, усталость и работоспособность) разрабатывают на объект испытания (техническая характеристика и состав объекта), на испытательный стенд, установку, на приспособление к универсальной машине. Одновременно составляют схему измерений, перечень средств измерений и обработки результатов.

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 7. Выбор приборов, оборудования, приспособлений и инструмента для исследования и испытания машин их узлов и систем.

Программа испытаний на несущую способность содержит первое критериальное условие для силовой конструкции – подтверждение расчетной и определение действительной несущей способности узла при статическом приложении расчетных нагрузок, что является основной целью испытаний.

Как правило, программа предусматривает этапность приложения нагрузок для нескольких расчетных случаев. Сочетание нагрузок, их величины, порядок приложения по расчетным случаям, предельные и критические условия прочности или достижение предельных деформаций (перемещений) задают таблицей, ленточным или трехмерным графиком.

Каждый расчетный случай нагружения делят на два уровня: эксплуатационный и расчетный. Эксплуатационный уровень нагрузки разбивают на 6 - 10 ступеней для выполнения предварительных измерений перемещений и НДС в упругой области и одновременной отработки и контроля воспроизводимости линейного нагружения. При этом уровне на основе исследования НДС определяют зоны и сечения возможного разрушения или появления пластического шарнира. Отмечают области наблюдения при испытании до разрушения, устанавливают и градуируют дистанционную аппаратуру для измерения параметров при разрушении. В зависимости от задачи устанавливают оптические, поляризационно-оптические, муаровые (растровые) средства регистрации НДС, применяют высокоскоростную фото- и кинопередачу, видеоманометрическую запись динамики разрушения или потери устойчивости по этапам. Учитывают специальные меры техники безопасности, особенно при испытании высокопрочных хрупких материалов, и для объектов, накапливающих значительную упругую энергию до разрушения, например, при испытании оболочек больших объемов наддувом сжимаемым газом (воздухом).

Нагружение до расчетных нагрузок проводят однократно, непрерывно повышая уровень нагрузки от эксплуатационного до расчетного, и, не прекращая нагружения, доводят испытания до максимальных нагрузок, отмечая резкое (или плавное) снижение нагрузки при разрушении элементов, потери несущей способности (устойчивости). Скорость нагружения $\Delta P / \Delta t$

оговаривается в программе и в ТУ на энергетические потребности стенда. Для статического нагружения металлических конструкций критической скоростью является такая, когда погрешность воспроизведения нагрузки за счет присоединенных масс нагружающей системы становится больше 1% от заданного текущего значения усилия, а все переходные процессы от начала и до конца диаграммы деформирования зависят только от жесткости системы, а не от ее массы.

Обычно по нескольким точкам или узлам непрерывно записывают диаграммы деформирования $P - \Delta l$, $P - \varepsilon$; $M - w$, $\zeta - \varphi$ с помощью дистанционных динамометров (тензорезисторных или манометрических) и датчиков перемещений (потенциометрических, тензорезисторных и т.д.). Применяют графопостроители – двухкоординатные $X - Y$, самописцы $X - T$, осциллографы с памятью, на которые регистрируют весь процесс до разрушения, отмечая максимальные значения сил (моментов), величин перемещений и т.д. Тензоизмерения проводят с помощью тензорезисторов (ТР) и ИИС с квазистатическим быстродействием (свыше 100 изм/с), применяют ТР, имеющие большие предельные деформации (до

$\varepsilon_{np} = 5-12\%$), например из отожженного константана. Запись деформации в темпе статического нагружения позволяет точнее воспроизвести динамику пластического деформирования, перераспределение сил в многократно статически неопределимых системах, выявить ненужные связи и неучитываемые запасы прочности.

Для неметаллических объектов, изготовленных из вязкоупругих материалов и материалов, чувствительных к скорости деформирования, вследствие значительной ползучести под нагрузкой слишком малая скорость нагружения может исказить результаты. Поэтому в каждом конкретном случае в программе оговаривается скорость нагружения, скорость перемещения захватов машины или скорость деформации.

В случае проведения испытаний на несущую способность при одновременном тепловом воздействии на объект, осуществляемом способом лучистого нагрева или в камерах-термостатах, режимы механического нагружения и скорости нагрева (прогрева) задают специальными графиками, учитывая теплоемкость образца и системы, инерцию регулирования теплопередачи, рассеяние и мощность излучателей. Программу реализуют автоматической системой выхода и поддержания температурного режима на объекте во времени или в функции механической нагрузки. Методология проведения испытаний на несущую способность масштабных моделей больших объектов требует строгого теоретического обоснования и проведения значительных исследований.

Программы усталостных испытаний отличаются по критериальным условиям малоциклового прочностного, многоциклового и сложной многофакторной усталостной прочностного.

Программы малоцикловых усталостных испытаний составляют для высоконапряженных объектов, когда общее число циклов до истощения ресурса невелико и составляет для металлов 10⁴–10⁵ циклов; эксплуатационные напряжения могут достигать пределов текучести. Многие авиационные и энергетические агрегаты работают в режиме малоциклового усталости.

Пример 1. Рассмотрим программу испытаний на малоцикловую усталость крыла тяжелого пассажирского самолета. Один программный блок нагружения был эквивалентен одному типовому полету, нагрузки которого определились как средние из четырех типовых профилей трехчасового полета. Один программный блок при усталостных испытаниях крыла в системе всего планера выполнялся за 8,5 мин, моделируя трехчасовой полет (рис. 1.23). Он состоял из 36 циклов, которые соответствовали наземным циклам (заправка и руление по полосе), взлету, набору высоты с выпущенной механизацией, подъему до высоты крейсерского полета, длительному крейсерскому режиму с учетом типовой болтанки, маневренным предпосадочным режимам и посадке. Таким образом, крыло нагружали циклами с различной асимметрией и изменением знака нагрузки.

Техническая реализация этой программы проводилась при испытании на усталость всего планера самолета «Боинг-747» с помощью электрогидравлической многоканальной системы нагружения (86 каналов), управляемой от цифрового программного устройства с ЭВМ. Стенд для испытания на усталость находился под открытым небом в условиях некоторого подобия реальной окружающей среды. Крыло испытывали на усталость на двукратный срок службы; было выполнено 20 000 эквивалентных полетов, после чего на основные силовые элементы крыла с наиболее высоким уровнем напряжений были нанесены искусственные надрезы и испытания продолжены по типовому спектру на живучесть.

Сложные блочные циклограммы нагружения панелей и образцов обычно упрощают, если известны доминирующие нагрузки, вносящие основное повреждение в конструкцию. Так, при испытании на усталость панелей и стыков герметического фюзеляжа воспроизводят только пульсирующую нагрузку, которую выполняют на усталостных испытательных машинах при невысоких частотах нагружения, поскольку для соединений с герметиком или синтетическим клеем скорость нагружения существенно влияет на долговечность.

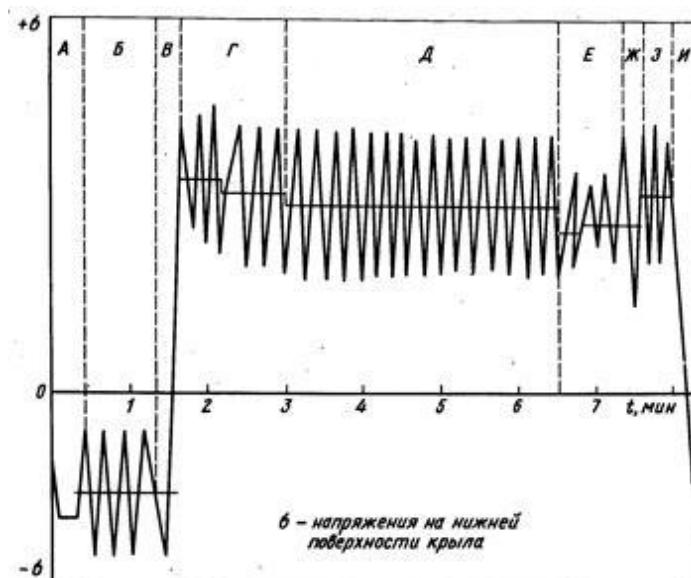


Рис. 1.23. Программный блок вертикальных нагрузок на крыло самолета «Боинг-747» при испытании на усталость: А — заправка топливом; Б — руление по полосе; В — взлет; Г — набор высоты; Д — крейсерский режим; Е–Ж — снижение, выдерживание; З — заход на посадку; И — посадка



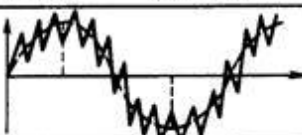
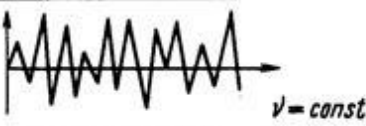

Испытания на усталость образцов материалов для определения пределов усталости и построения кривых $\sigma - N$ проводят при мало- и многоцикловом нагружении. Выбор НДС и тип образца должны соответствовать типу нагружения и НДС реальной конструкции.

Кривые усталости, полученные на образцах материалов, являются эталонными, на них отдельными точками наносят результаты испытания полунатурных панелей и образцов, натурных валов, осей и т.д.

В других случаях блочного программного или случайного нагружения эталонную кривую усталости используют для расчета долговечности детали, проведенного на основании гипотез суммирования усталостных повреждений, после чего результат расчета сравнивают с данными усталостного испытания объекта по сложной программе.

Программы многоцикловых усталостных испытаний наиболее характерны для деталей и агрегатов транспортных и технологических машин, работающих при сравнительно низких напряжениях, но высокой повторяемости (цикличности) нагрузок. Реальные спектры нагрузок, зарегистрированные на агрегате при эксплуатации прототипа, скорректированные для новой машины, или расчётные, полученные на математических моделях, моделируют в программе испытаний типовыми спектрами нагружений (табл. 1.5). Так, при испытании деталей автомобиля нагрузки от двигателя, взаимодействия с неровностями дороги и функциональные нагрузки от операций с полезными грузами создают в целом сложное воздействие на машину, которое моделируют для различных деталей почти всеми типами программного нагружения. Пружины клапанов двигателя, имеющие постоянный ход, испытывают при регулярном периодическом нагружении; детали трансмиссии вала от двигателя до сцепления нагружают характерным блочным спектром; цапфы подвески колес, испытывающие случайное нагружение от неровности дороги, функциональные и тормозные нагрузки, могут быть испытаны при квазистационарном случайном нагружении.

Таблица 1.5

<i>Типовой спектр нагрузки</i>	<i>Вид реализации</i>
<i>Периодический регулярный</i>	
<i>Блочный программный</i>	
<i>Бигармонический (двухчастотный)</i>	
<i>Случайный стационарный</i>	
<i>Случайный нестационарный</i>	

Такие объекты, как подкрановые балки, сварные фермы железнодорожных мостов и ретрансляционных мачт испытывают нагрузки, близкие к бигармоническим, когда на циклическую (периодическую) нагрузку наложены гармоники малых амплитуд, но достаточно высоких частот. Расчет и испытание сварных конструкций мостов ферменного типа проводят на двухчастотное или полигармоническое (стационарное случайное) нагружение.

В задачах оптимизации конструкции на основе усталостных испытаний, которые проводят обычно при регулярных периодических спектрах чаще всего на резонансных машинах при симметричном цикле, важным методическим условием достоверности результатов является их рассеяние. Нормальный закон рассеяния, характерный для свойств материала одной партии, дает разброс 1:2 до 1:3 по долговечности. Но для детали штампованного рулевого рычага автомобиля на разброс результатов влияет технология: изнашивание штампа, появление заусенцев, изменение твердости и структуры поверхностного слоя, дающие разброс 1:5,5 в диапазоне 10–90 % вероятности P значений по долговечности, при общем разбросе в партии из 130 испытанных рычагов – 1:50 (рис. 1.24).

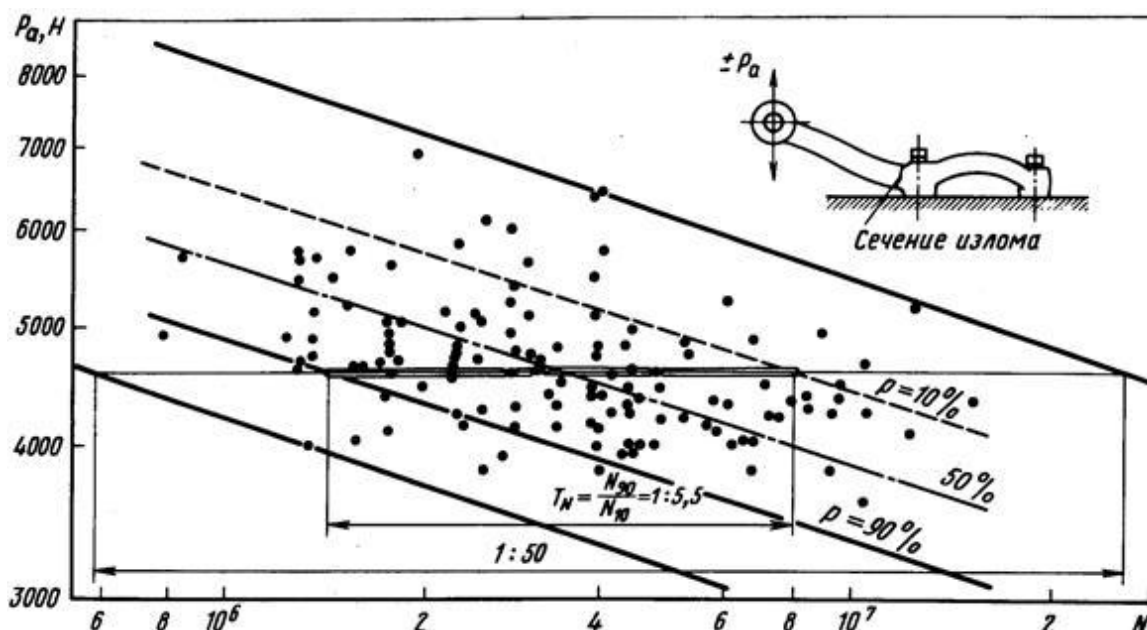


Рис. 1.24. Разброс долговечности N штампованного рулевого рычага автомобиля при многоцикловой усталости ($m = 6$ – тангенс угла наклона)

При каждом цикле оптимизации детали и ее последующем испытании необходимо следить, чтобы разброс результатов следующей итерации не превышал рассеяния результатов предыдущего испытания.

При разработке любых экспериментальных программ необходим полный состав документации: вводная часть программы, дающая описание проблемы и основание для экспериментальной работы, а также ряд обязательных разделов – описание и параметры объекта испытаний; общие и конкретные цели испытаний; объем, порядок (организация) испытаний; условия проведения; перечень необходимой документации для всего цикла работ; конкретное испытательное оборудование, включая перечень приборов, и энергетические потребности; разработка или проверка метрологического обеспечения машин, приборов и систем; материально-техническое обеспечение испытаний; форма отчетности; санитарно-гигиенические требования по технике безопасности.

Методические вопросы усталостных испытаний отражены в ГОСТах.

Лекция 8. Определение величины параметров эксплуатационных свойств машин.

Статические испытания при малых скоростях нагружения проводят на универсальных испытательных машинах (УИМ) и специальных стендах (установках) с помощью одно- и многоканальных систем нагружения. При сложных программных испытаниях используют автоматические системы управления нагружением (АСУН) и полуавтоматические программные устройства. Для управления и обработки результатов применяют мини- и микроЭВМ. Задачи, решаемые на УИМ, состоят в определении механических характеристик материалов, прочности и деформативности соединений, конструктивных элементов, панелей и несложных деталей машин при одно- или двухосном нагружении. В рабочем пространстве машин размещают при необходимости термокамеры, криостаты, коррозионные и вакуумные камеры и т.д.

Разработаны сотни типов стандартных и оригинальных испытательных машин, различающихся по типу НДС (растяжение–сжатие, изгиб, кручение), по значениям нагрузок, набору скоростей перемещений траверсы и системам записи деформаций, перемещений, нагрузок.

Многие УИМ имеют специализированную оснастку для испытаний образцов металлов, пластмасс, резин, тканей, бетона, керамики, стекла, бумаги, а также для сложного нагружения. Силовозбуждение для УИМ обычно электромеханическое или гидравлическое; регистрация сил, моментов, деформаций и перемещений для современных машин – электронная, с первичными преобразователями на тензометрическом, индуктивном или магнитоэлектрическом принципах. В разработке, усовершенствовании и эксплуатации УИМ основными проблемами являются метрологические; они связаны с влиянием жесткости машины, скорости деформирования и демпфирующей способности системы на точность регистрации кривой $P-\epsilon$ при достижении предела текучести материала.

Известно, что некоторые машины не регистрируют площадку текучести с «зубом», а на некоторых скоростях деформирования в пластической области в системе образец – машина возбуждаются колебания (рис. 4.3), связанные с совпадением собственных частот системы с частотой пульсаций сдвиговых деформаций при пластическом течении металла.

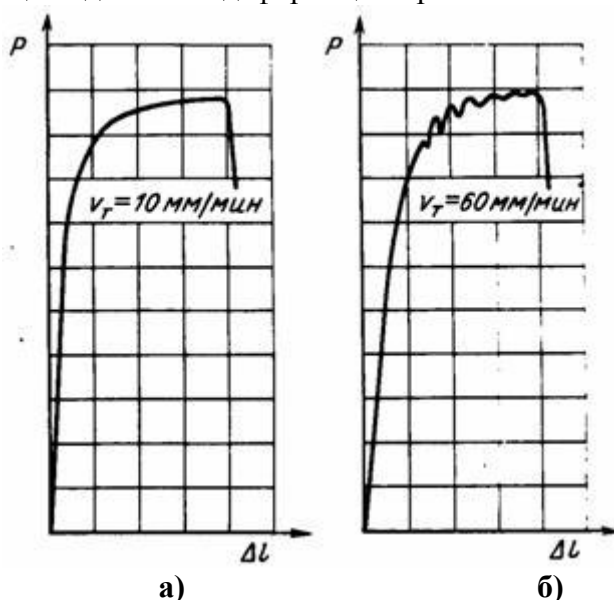


Рис. 1.25. Эффект совпадения собственных частот системы и частоты возбуждения образца при скорости траверсы 60 мм/мин (Δl – перемещение траверсы)

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 9. Определение скоростных, тяговых, тормозных и других характеристик.

Методы и средства измерения деформаций

К настоящему времени установилась групповая классификация экспериментальных методов, ГОСТы по наиболее развитым направлениям закрепили терминологию и определения. К *основным группам методов* исследования (измерения) НДС относят следующие: электротензометрию, оптико-геометрические, поляризационно-оптические, интерференционно-оптические, проникающих излучений. Ко *второй большой группе экспериментальных методов* относят методы измерения деформаций по отдельным точкам использующие преобразователи различного типа, основные из которых: механические, оптико-механические, оптические, (линзовые и растровые) потенциометрические, емкостные, индукционно-трансформаторные, пьезоэлектрические, магнитоупругие (магнитострикционные), фотоэлектрические, струнные, пневматические, электроакустические, ультразвуковые, механотронные, вихретоковые, оптоэлектронные.

Методы электротензоизмерений

Тензометрия – так называют методы электрических измерений механических величин: деформаций, перемещений, сил, давлений, моментов, перегрузок, частот – обладает исключительными качествами, которые явились причиной ее развития как индустриального метода с самым широким применением в машиностроении и практически во всех областях технической деятельности человека. Известно использование тензометрии в биологии и медицине при измерении сил и деформаций мышц человека; в весоизмерительных устройствах порталных кранов, в измерительно-вычислительных комплексах на борту носителей и спутников; в устройствах контроля конструкции атомных реакторов; в информационно-измерительных системах, обрабатывающих тысячи параметров с помощью нескольких ЭВМ при испытании современных самолетов и т.д.

Основы метода. Тензоэффект и тензорезисторы. Метод основан на измерении приращения электрического сопротивления проводника (полупроводника), деформируемого совместно с деталью, к которой он механически прикреплен (приклеен). Сопротивление проводника R пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения F :

$$R = \rho \cdot l / F \quad (1.20)$$

где ρ – удельное сопротивление.

При малой деформации проводника $\Delta l / l = \varepsilon$ его сопротивление изменяется на величину $\Delta R / R$. Это явление называют *тензоэффектом*, а коэффициент, связывающий относительное изменение сопротивления и деформацию, – *коэффициентом тензочувствительности материала*

$$K_M = \Delta R / (R \varepsilon) = (1 + 2\mu) + m, \quad (1.21)$$

где m – коэффициент, зависящий от свойств материала и деформации:

$$m = \Delta \rho / (\rho \varepsilon) = \nu E$$

(ν – продольный коэффициент пьезосопротивления; E – модуль упругости проволоки, фольги или полупроводника).

Для металлических тензочувствительных материалов величина K_M определяется в основном изменением геометрии проводника, т.е. членом $(1 + 2\mu)$ в формуле (1.21); для полупроводников, наоборот, тензоэффект зависит практически от изменения физических свойств материала: $K_M \approx m$, и его величина в 20–50 раз больше, чем для металлов.

Для сплава константана линейная передаточная функция тензорезистора (ТР) сохраняется и для некоторой пластической области, что является одним из замечательных свойств константана как материала для ТР (в упругой и некоторой пластической области $K_M = 2$).

В полупроводниках тензоэффект зависит от кристаллографического направления, в котором вырезана пластина тензорезистора (например, для кремния *n*-типа максимальный $K_M \approx 100$ определяется тензорезистивной чувствительностью). Тензоэффект для полупроводников существенно зависит от температуры, тогда как для константана влияние температуры невелико.

Для крепления чувствительного элемента ТР к поверхности детали, а также для защиты и изоляции проводника и выводных проводников разработано несколько технологий и конструкций ТР.

Проводниковые ТР выполняют на основе тонкой проволоки диаметром 2–30 мкм (проволочные тензорезисторы) и на основе тонколистовой фольги толщиной 5–10 мкм (фольговые тензорезисторы). В зависимости от назначения и выбранной технологии проводниковые ТР выполняют на бумажной, пленочной, тканевой (стеклотканевой) или металлической фольговой подложке. В качестве связующего для закрепления чувствительного элемента и выводных проводников на подложке и ТР на объекте применяют универсальные и специальные клеи, лаки, цементы, а также точечную сварку и пайку.

Некоторые виды проводниковых ТР показаны на рисунке 1.38. Различают проволочные ТР с петлевой константановой решеткой на бумажной подложке (ПКБ, ППКБ). Изготавливают ТР с беспетлевой решеткой на пленочной и бумажной подложке и микропроволочные ТР (МПБ, МПТ) из одной жилы литого микропровода, имеющего диаметр 2–7 мкм.

Проволочные, петлевые ТР стандартного изготовления имеют базы 5–50 мм; наиболее часто применяют базы $l = 10; 15; 20$ мм; беспетлевые ТР имеют более широкий диапазон баз. Номинальный ряд сопротивлений: 50, 100, 200, 400, 800 Ом. Предельная измеряемая деформация для проволочных ТР составляет 0,1–5 %, причем для твердого константана – до 1 % и отожженного мягкого константана на пластифицированной пленке БФ-2 – до 2,5–5 %.

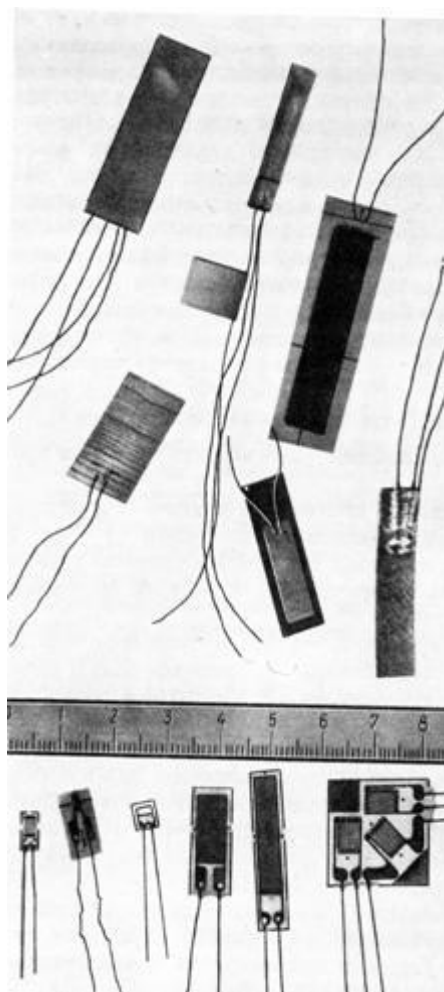


Рис. 1.38. Некоторые виды тензорезисторов и тензорозеток

Фольговые тензорезисторы изготавливают фотохимическим способом из тонкой фольги толщиной 3–10 мкм, что позволяет автоматизировать процесс массового производства ТР и достаточно просто выполнять тензорешетки сложных форм для многоэлементных розеток, датчиков давления и сил. Кроме того, для фольговых ТР технологически просто задать конструкцию теплоотводящих элементов решетки и места спая с проводниками. Фольговые ТР типа КФ4 и КФ5 имеют следующие сопротивления: $R = 100, 200, 400$ Ом для одиночных ТР КФ4П, КФ5П, для тензорозеток КФ4Р, КФ5Р и цепочек КФ4Ц, КФ5Ц. Фольговые одиночные ТР для измерения деформаций в местах концентрации изготавливают малогабаритными: $l = 0,5; 1,0; 3,0; 5,0$ мм.

Полупроводниковые тензорезисторы изготавливают из монокристаллов кремния и германия, реже из других полупроводников. Их практически не используют в исследованиях НДС конструкций, но успешно применяют в динамометрических устройствах в качестве преобразователей. Благодаря новой технологии выращивания полупроводников на подложке из кремния или сапфира, являющихся почти идеальными упругими элементами, созданы интегральные полупроводниковые тензорезисторы. Методом диффузии получают сверхминиатюрные мосты и полумосты, монолитно связанные с упругим элементом. На основе этой технологии выпускают, например, датчики давления для измерения давления крови непосредственно в сосудах.

Схемы измерения деформаций

Для измерения статических и квазистатических деформаций используют мостовые схемы с питанием на переменном или постоянном токе, позволяющие осуществлять схемную термокомпенсацию (рис. 1.39). В связи с широким внедрением микроэлектроники наиболее универсальными являются цепи на постоянном токе. Особенностью схемы на переменном токе является необходимость балансировки по активной и реактивной составляющим сопротивления [введен контур R_c и C (рис. 1.39) справа], поскольку тензорезисторы, наклеенные на металл, и проводники имеют определенную емкость.

Измерительные мосты с усилителями на несущей частоте (от 2,5 кГц) реализованы в большом числе универсальных приборов.

Значительное развитие получили приборы с дискретным уравниванием, цифровым табло и копированием информации для ввода в печатающие и обрабатывающие устройства. Применение импульсного разнополярного питания (прямоугольного вида) позволило повысить напряжение питания, т.е. при прочих равных условиях увеличить выходной сигнал. Быстродействие систем с импульсным питанием ограничивается частотой 20–200 Гц (квазистатические процессы) и определяется скоростью затухания переходного процесса в прямоугольном импульсе и установления $i = const$. Длительность импульса i составляет не менее 5–50 мкс.

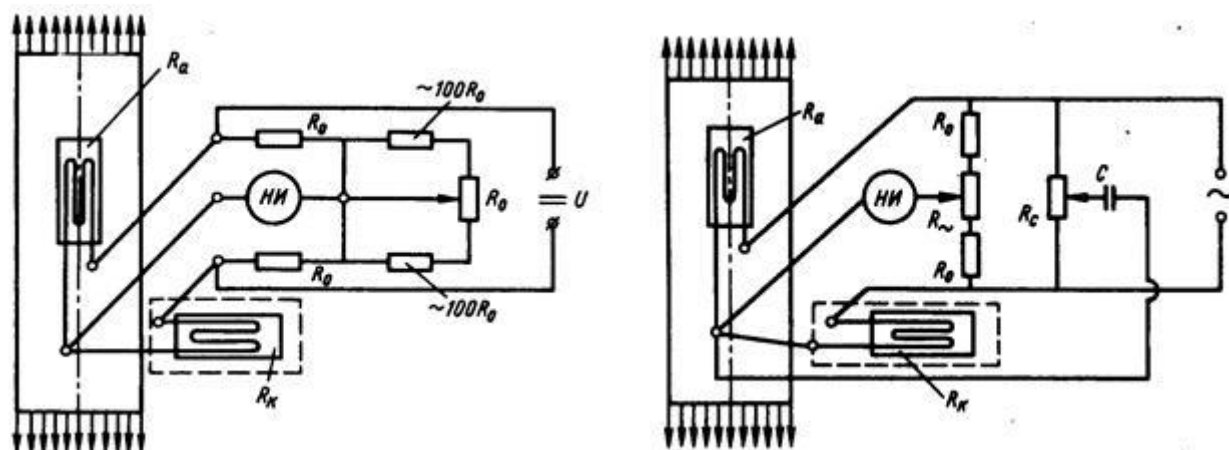


Рис. 1.39. Схемы измерительных мостов: слева – при питании постоянным током; справа – при питании переменным током

(НИ – нуль-индикатор; R_a и R_k – активный и компенсационный ТР)

Информационно-измерительные системы (ИИС). Автоматизация тензо- и термоизмерений на основе ИИС значительно повышает производительность труда при прочностных испытаниях, но одновременно потребует дополнительно высококвалифицированного персонала для обслуживания систем с ЭВМ и затрат на оборудование. Кроме того, ужесточились требования по разбросу метрологических параметров датчиков в партии. ИИС применяют при испытаниях с массивом датчиков (преобразователей) 200–20000. Многие системы оснащены каналами для подключения не только одиночных тензорезисторов, но и полумостов и мостов для тензодинамометров, датчиков давления, перемещения, температуры (терморезисторов), лучистого и теплового потока.

Принципиальная схема ИИС показана на рисунке 1.40. Тензорезисторы ТР, тензодинамометры ТД, датчики давления ДД, датчики перемещения ДП, датчики лучистого и теплового потока ДТП подключены группами к коммутаторам датчиков К, которые в зависимости от экспериментальной задачи последовательно или выборочно передают аналоговый сигнал на соответствующие цифровые измерительные мосты с АЦП и нуль-органом. «Разбаланс» в цифровом коде передается на шины группового коммутатора или коммутатора каналов, который пропускает его в устройство связи (УСО) или сопряжения с ЭВМ непосредственно в память машины или с помощью специальных устройств на носитель информации. Команды от ЭВМ могут содержать элементы интерактивного режима посредством устройства отображения информации и устройств управления.

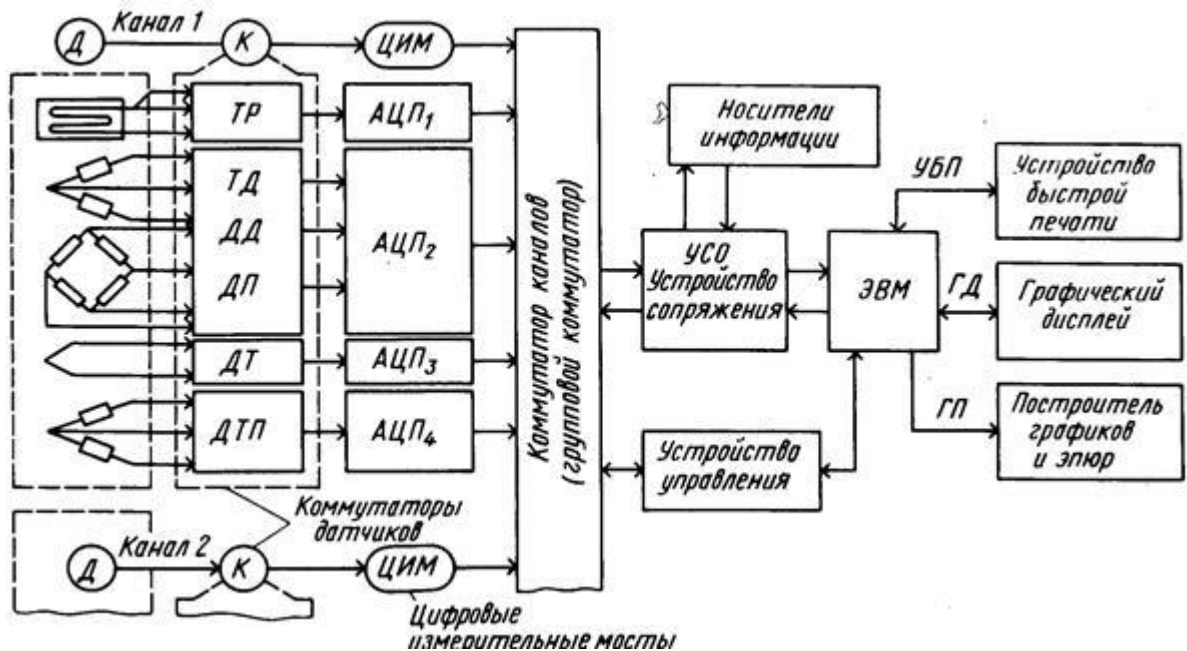


Рис. 1.40. Принципиальная схема ИИС сбора и обработки данных электротензоизмерений

Тарировка датчиков.

Не касаясь подробно зависимостей электротехнических величин от деформации датчика, укажем лишь, как можно установить тарировкой непосредственную связь между деформацией датчика и приращениями отсчётов по шкале прибора.

Для этого из партии одинаковых датчиков берётся несколько штук для тарировки. Тарлируемый датчик наклеивается на тарировочный стальной образец (тарировочная балочка или растягиваемый образец). Затем тарировочный образец загружается ступенями и при каждой загрузке P берётся отсчёт A по шкале прибора. В результате строится график зависимости между нагрузкой P и отсчётами по прибору A и устанавливается отношение

$$k_1 = \frac{\Delta A}{\Delta P}. \quad (1.22)$$

Коэффициент k_1 практически постоянен.

На том же тарировочном образце или параллельно, или заранее при помощи другого типа хорошо проверенных тензометров аналогичным образом устанавливается зависимость между относительной деформацией и приращением нагрузки ΔP , т. е.

$$\varepsilon = k_2 \Delta P.$$

Подставляя вместо ΔP его значение из выражения (1.22), получим:

$$\varepsilon = \frac{k_2}{k_1} \Delta A,$$

или

$$\varepsilon = k \Delta A.$$

Здесь k является ценой деления прибора, выражающей величину относительной деформации при изменении отсчёта по прибору на одно деление.

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений

Открытие Д. Брюстером явления временного двулучепреломления в прозрачных телах при приложении к ним механических напряжений было объяснено Г. Вертгеймом на основании волновых уравнений Неймана – Максвелла, который сформулировал закон о пропорциональности оптической разности хода δ лучей в модели разности главных напряжений:

$$\delta = C_0 (\sigma_1 - \sigma_2) B,$$

где C_0 – оптическая постоянная материала; B – толщина модели.

Важный шаг в создании инженерного метода сделал Т. Леви, который доказал, что для широкого класса задач распределение напряжений не зависит от упругих постоянных материала. Создание высоко оптически активных синтетических материалов для моделей и несложных поляризационных приборов привело к широкому применению метода фотоупругости.

Метод двумерной (плоской) фотоупругости

Плоскополяризованный луч – вектор \vec{J} (рис. 1.41), вошедший в двулучепреломляющий материал нагруженной модели, образует два взаимно перпендикулярных луча J_1 и J_2 , поляризованных в главных направлениях.

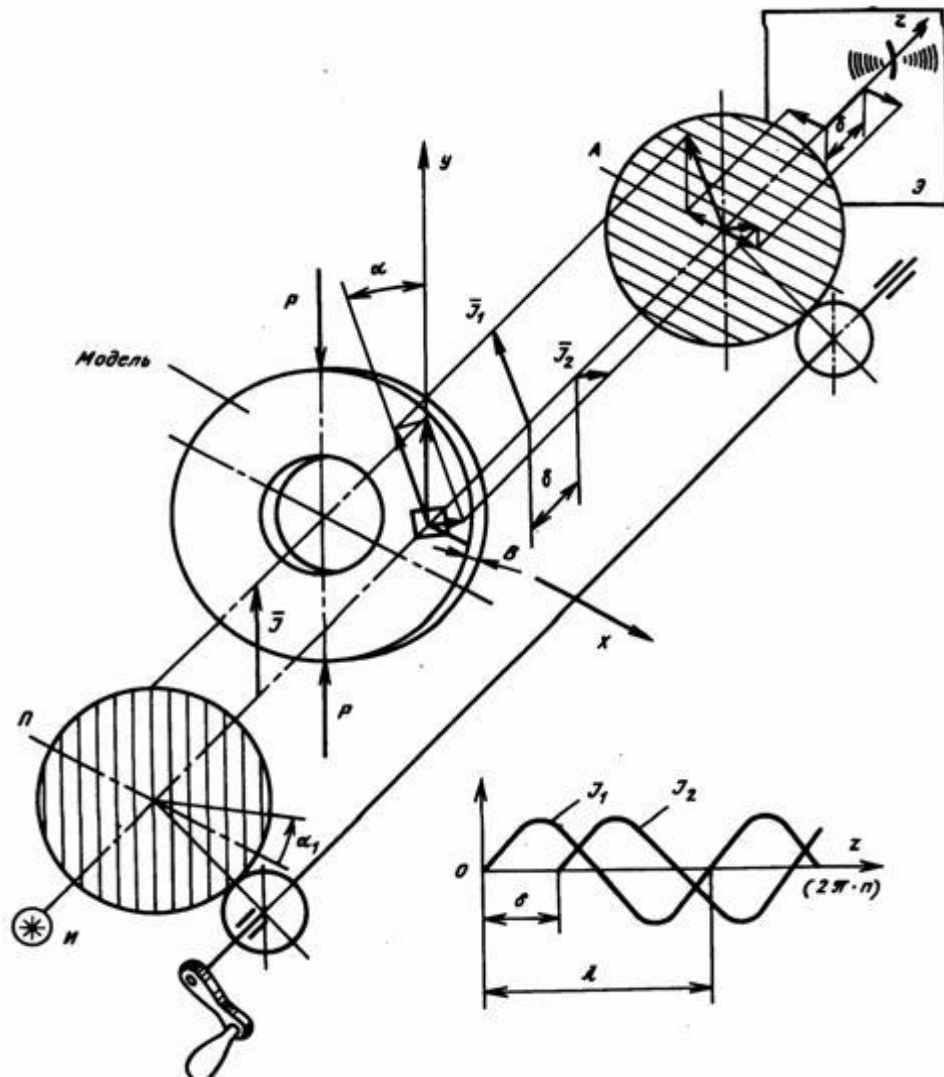


Рис. 1.41. Схема двулучепреломления плоскополяризованного луча в нагруженной модели при скрещенном положении поляроидов P и A

Обозначив показатели преломления (относительные скорости света) в воздухе n_e и в модели по главным направлениям через n_1 и n_2 соответственно, получим для абсолютной разности хода лучей, прошедших толщину плоскости модели B , следующие уравнения:

$$\delta_1 = B(n_1 - n_e); \quad \delta_2 = B(n_2 - n_e).$$

Для относительной разности хода лучей J_1 и J_2 имеем

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = B(n_1 - n_2).$$

Поскольку поляризованный луч представляет гармоническое колебание по оси z , то

$$J = J_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} \cdot z,$$

где λ — длина волны монохроматического света.

Разность хода δ представим в виде сдвига фаз Δ :

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta = \frac{2\pi B}{\lambda} (n_1 - n_2).$$

Для тонкой пластины, когда третье главное напряжение σ_3 практически равно нулю, эллипсоид Френеля, характеризующий связь между показателями преломления и главными напряжениями, сохранит только два уравнения:

$$n_1 - n_2 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2;$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1,$$

где n_0 – показатель преломления ненагруженной модели; C_1 и C_2 – постоянные коэффициенты.

Далее можно получить основные уравнения фотоупругости для плоского напряженного состояния:

$$\delta = C(\sigma_1 - \sigma_2)B;$$

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2)B,$$

где $C = C_1 - C_2$ – оптическая постоянная материала.

Лучи J_1 и J_2 , сведенные в одну плоскость вторым поляроидом-анализатором A , интерферируют между собой с результирующим колебанием, интенсивность которого определяется уравнением

$$I = I_A \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}, \quad (1.23)$$

где α – угол между плоскостью поляризации луча, вышедшего из поляризатора P и одним из главных направлений, например направлением σ_1 ; I_A – интенсивность луча после поляризатора P .

В скрещенном положении поляроидов P и A (установка на темноту) на экране \mathcal{E} прибора по всему полю модели наблюдают две системы полос как результат интерференции, описываемый уравнением (1.23). На экране видна система полос (изохром), зависящая от величины нагрузки (напряжения), определяемая разностью хода δ (рис. 1.42 и 1.43, а), а также система черных полос (изоклин), зависящая от положения поляроидов, способных в

полярископе поворачиваться в скрещенном положении на любой угол $\pm \alpha_i$, отсчитываемый, например, от гравитационной оси.

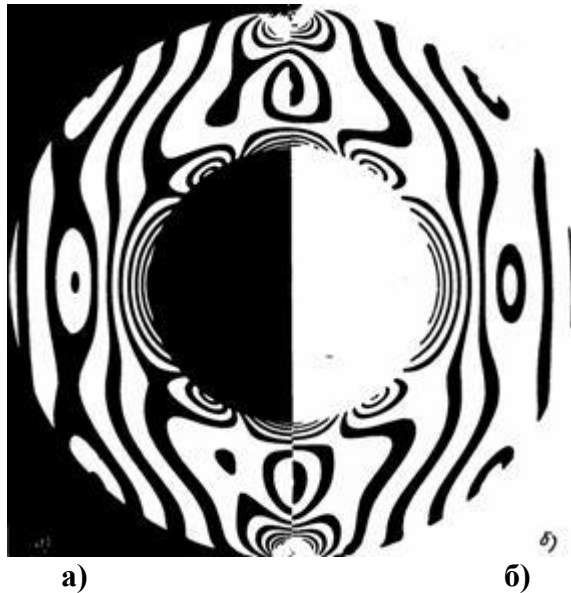


Рис. 1.42. Кольцо сжатое по вертикальному диаметру:
а) изохромы в темном поле; б) изохромы в светлом поле

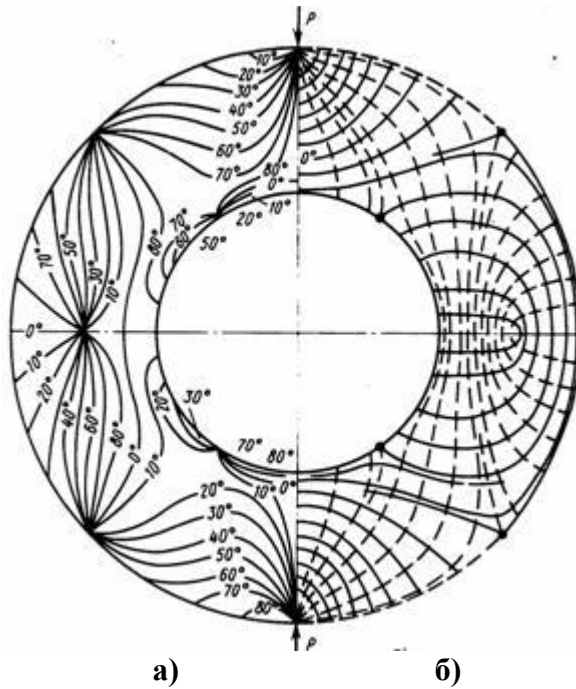


Рис. 1.43. Поле изоклин и изостат для кольца, сжатого по диаметру

Изохромы – чередующиеся темные и светлые полосы в монохроматическом свете или цветные одинаково окрашенные полосы в белом свете – являются геометрическим местом точек (ГМТ), где разность хода $\delta = \text{const}$. Согласно уравнению (1.23), там, где $\delta / \lambda = 0, 1, 2, 3, \dots, n$, наблюдают темные полосы гашения света; там, где $\delta / \lambda = 1/2, 3/2, 5/2, \dots, (n-1)/2$, – светлые полосы усиления света.

Поскольку в белом свете интерференция происходит по всей гамме длин волн источника, то порядок полос n определяют по их одинаковой окраске по таблице цветов. Вдоль изохромы $\sigma_1 - \sigma_2 = \text{const}$ и тогда

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_0^{1,0}}{B} n, \quad (1.24)$$

где $\sigma_0^{1,0}$ – оптическая постоянная материала в размерности напряжений на единицу толщины (1 см) модели, получаемая градуировкой материала на стандартном образце (диске или балочке при чистом изгибе).

Зависимость (1.24) называют *уравнением метода полос*. На свободном контуре модели, где не приложены внешние нагрузки, $\sigma_2 = 0$, тогда

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_0^{1,0}}{B} n.$$

Изоклины – черные линии на экране – образуют вторую систему полос, зависящую от положения P и A , т.е. угла α_i ; они являются ГМТ, где направления главных напряжений σ совпадают с направлением плоскости поляризации. В этом случае $2\alpha = 0, \pi, 2\pi, \dots$. Изоклины служат для определения направления главных напряжений в любой точке модели. Для этого достаточно в белом свете, когда на фоне цветных полос изохром выделяются черные изоклины, повернуть поляроиды на такой угол, чтобы изоклина пересекла исследуемую точку модели. Отсчет по лимбу угла $\alpha_i = \alpha$ определит главные направления в точке.

С помощью изоклин несложно построить систему изостат (рис. 1.43, б) или траекторий главных напряжений, дающих картину силовых потоков в детали.

По картине изохром определяют значение максимального касательного напряжения

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_0^{10}}{2B} n,$$

а по изоклинам или изостатам – его направление; траектория τ_{\max} составляет угол 45° к траектории главных нормальных напряжений.

Круговой полярископ. Пластины $\lambda/4$. Одновременное наблюдение на экране или матовом стекле камеры изоклин и изохром неудобно для экспериментатора, поэтому работу с изохромами методом полос проводят в круговом полярископе, где луч, входящий в модель, поляризован по кругу, и изоклины отсутствуют. Для этой цели за поляризатором устанавливают пластинку $\lambda/4$, имеющую две взаимно перпендикулярные оси пропускания X и Y. Их ориентируют так, что с осями поляроидов П и А они составляют угол 45° . Пластины, обычно слюдяную, изготавливают так, что лучи, проходя через нее, получают относительную разность хода $\lambda/4$.

Уравнения колебаний за пластинкой $\lambda/4$ записывают в виде разложения плоскополяризованного луча J по плоскостям $X-z$ и $Y-z$:

$$X = \frac{\sqrt{2}}{2} J \sin \alpha x$$

$$Y = \frac{\sqrt{2}}{2} J \sin (\alpha x + \Delta_0),$$

где Δ_0 – относительная разность фаз лучей X и Y (рис. 1.44).

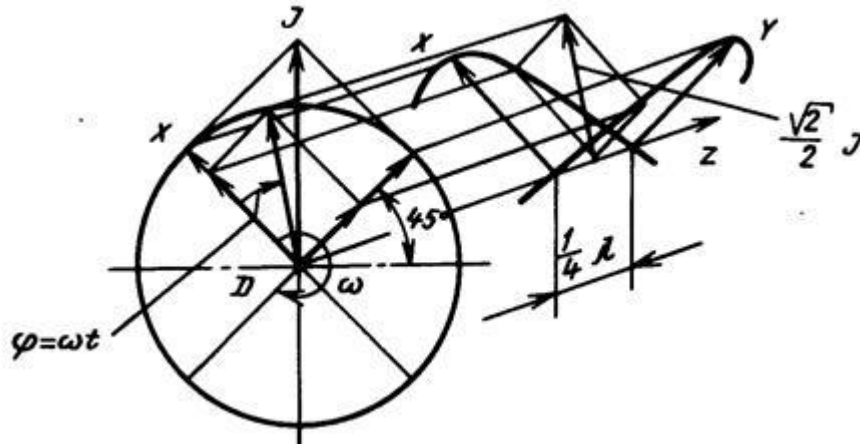


Рис. 1.44. Схема круговой поляризации, осуществляемой пластинкой $\lambda/4$

Результирующее колебание этих лучей после прохождения пластинки $\lambda/4$ вследствие сдвига фаз будет уже пространственное; конец светового вектора будет описывать в направлении Z кривую, уравнение которой несложно получить сложив геометрически два вектора x и y.

Приняв за начало отсчета момент входа лучей в пластинку $\lambda/4$, получим в общем случае

$$X^2 + Y^2 - 2XY \cos \Delta_0 = \frac{1}{2} J^2 \sin^2 \Delta_0. \quad (1.25)$$

Это уравнение определяет проекцию пространственной кривой на плоскость $X-Y$, оно описывает эллипс, поэтому луч называют эллиптически поляризованным. Поскольку разность хода для пластинки составляет $\lambda/4$, то $\Delta_0 = \pi/2$, и уравнение (1.25) описывает круг:

$$X^2 + Y^2 = \frac{1}{2} J^2.$$

Луч называют поляризованным по кругу, но в зависимости от знака вращения направление его будет по или против часовой стрелки, т.е. угловая скорость имеет знаки $\pm \omega$. Лучи X и Y, пройдя нагруженную модель в точке, сохраняют свойства, описываемые законом Вертгейма,

но «размажут» изоклины и изохромы на экране. Чтобы восстановить изображение изохром, за моделью устанавливают такую же пластинку в $\lambda/4$, но с противоположным знаком вращения. Изоклины, как бы сканируя с частотой ω по экрану, наблюдаться не будут.

Для научно-исследовательской работы, прикладного инженерного применения, демонстрационных целей или для контроля серийной продукции на заводах необходимы приборы – полярископы различной конструкции. Для промышленных и исследовательских целей удобен набор, состоящий из полярископа большого поля с диффузионным осветителем, универсального исследовательского полярископа типа ППУ-7 или УИП и полярископа-поляриметра типа ПКС-250.

Одна из конструктивных схем полярископа с диффузионным осветителем (рис. 1.45) имеет рабочее поле 300 мм. Полярископ состоит из осветителя 1, в котором применены U-образные лампы дневного света с алюминиевым полированным отражателем и матовым диффузором (аналогично выполняют сменный осветитель с монохроматическим светом от газонаполненных ламп); поляроидов 2 с лимбами на внешней цилиндрической поверхности оправы, которые вращаются независимо друг от друга; пластинок 3; диафрагмы 5 и зеленого (красного) светофильтра 6, повышающего контраст для наблюдения и съемки полос методом двойной экспозиции; камеры 7, которая имеет затвор с ирисовой диафрагмой. Назначение полярископа большого поля – исследование крупных моделей методом полос. Он оснащен выдвижной жесткой рамой (1500×2000 мм) с несколькими силовыми электроприводами постоянного тока (перемещение штока 80 мм, с максимальным усилием 100 и 250 кН) и с тензодинамометрами 100–500 кН.

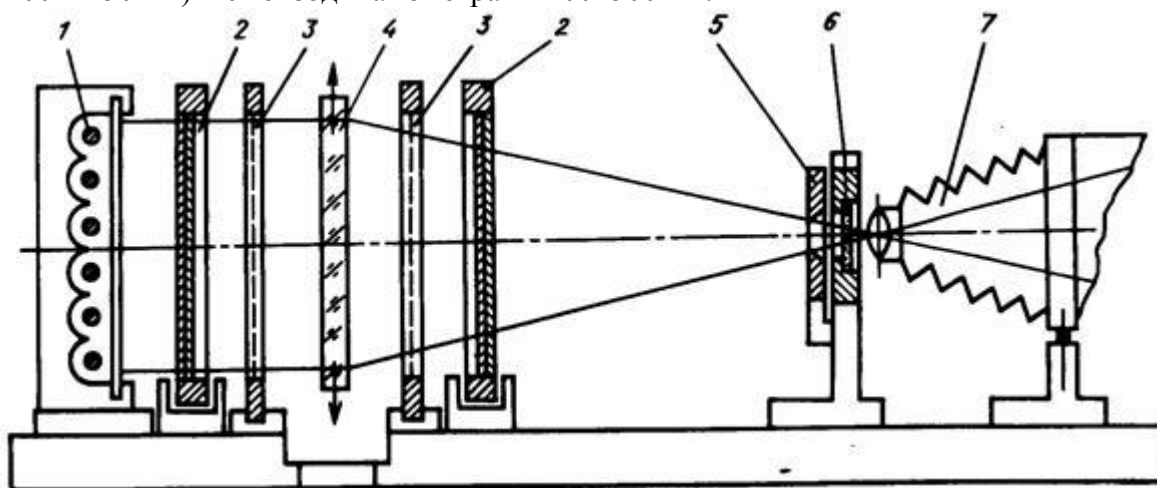


Рис.1.45. Схема полярископа большого поля с диффузионным освещением

Голографическая интерферометрия

Голограммы – это красочные радужные наклейки на аудио и видеокассетах, голограммные товарные и защитные знаки на банкнотах, кредитных картах и ярлыках товаров некоторых фирм. Достигнут большой прогресс в изобразительной голографии и устраиваются уже экспозиции голограммных копий музейных раритетов. Набирает обороты и производство голографических портретов. Голография уже перестала быть экзотикой. Однако некоторые стороны процесса внедрения голографии в современную жизнь все еще остаются за кадром – это проблема распознавания образов, интерферометрические измерения, создание голограммных оптических элементов, вопросы обработки изображений и многое другое.

Естественно, голографическая интерферометрия появилась не на пустом месте. Ее основой является классическая интерферометрия. Поэтому с нее и начнем.

Классическая интерферометрия всегда имела и имеет дело только с прозрачными или зеркально отражающими объектами. Казалось, что это навсегда. И удел интерферометрии – изучение газов и жидкостей, зеркал и линз. Работы, конечно, хватало и там. Были и масштабные практические результаты.

Чего стоят одни только шахтные интерферометры для определения опасной концентрации метана. А контроль при производстве оптических изделий; измерение толщины очень тонких покрытий и сверхточный контроль (с точностью в половину длины волны и меньше) расстояний или перемещений; экспресс-оценка качества обработки поверхностей с помощью специальной стеклянной пластинки. Как еще можно за несколько секунд (одним взглядом!) определить отклонение на несколько микрометров от нужного значения размеров шероховатостей обрабатываемой поверхности?

Разумеется, было, есть и еще будет очень много и других примеров использования и сделанных с помощью интерферометрии открытий. Но, повторяю, речь всегда шла только о прозрачных или зеркальных, слабо искажающих зондирующее излучение объектах.

После появления голографии открылась абсолютно новая возможность проводить интерферометрические измерения не только прозрачных, но и диффузно отражающих объектов. Именно по способу взаимодействия с зондирующим излучением и появилось деление объектов на фазовые (прозрачные) и диффузные (то есть отражающие, но не зеркальные).

Лекция 10. Ресурсные испытания машин, узлов.

Голографическая интерферометрия

Что же такого нового внесла голография в уже привычную интерферометрию?

Голография – это способ записи и восстановления всей оптической информации, пришедшей от объекта.

Если это так, и восстановленная с голограммы волна полностью соответствует рассеянной объектом при записи, то, следовательно, ее (волну) можно исследовать теми же оптическими методами, что и сам объект. То есть проводить теневые, шлирен и интерференционные измерения. Если же записать и поляризационные характеристики (такие способы существуют), то возможности получения информации увеличиваются.

Под понятием же «*голографическая интерферометрия*» подразумевается нечто совсем иное, использующее особенности именно голографических принципов записи информации.

Первые голографические интерферограммы появились из-за ошибки или случайного стечения обстоятельств. Мало того, на это не обратили внимания. Далеко не все экспериментаторы в первые годы появления голографии хорошо разбирались в ее теоретических основах. На первых шагах все усилия были направлены на получение собственно голограммы. Из интерферометрии было, конечно, известно, что сдвиг пучков во время экспозиции уже на половину длины волны делает невозможным запись микроинтерференционной картины, которая и представляет собой голограмму. Поэтому принимались всевозможные меры для обеспечения механической стабильности оптической схемы. В ход шли массивные гранитные и мраморные плиты, не менее массивные держатели оптических элементов. Но первые лазеры, используемые для этих целей, имели очень малую мощность, а фотопластинки – аналогичную чувствительность. Следовательно, стабильность в половину длины волны в течение всего процесса записи голограммы обеспечить было очень и очень трудно. В результате восстановленное изображение иногда покрывалось полосами, которые портили общую картину. Эти голограммы списывали в брак и экспериментаторы с новыми усилиями боролись за обеспечение виброзащиты. В 60-х годах родилось новое направление – голографическая интерферометрия.

Методы голографической интерферометрии

На одну пластинку можно записать несколько волновых фронтов, то есть несколько голограмм. Если эти волны когерентны (а чаще всего так и бывает), то при совместном восстановлении они интерферируют, а в результирующей интерферограмме останется только то, что в этих волнах было разным. Этот метод голографической интерферометрии получил название *метод двух экспозиций*.

Можно сделать и по-другому. Отснятую голограмму объекта после обработки устанавливают с высокой точностью на прежнее место – чаще пластинки обрабатывают прямо на месте съемки. При последующем экспонировании голограммы в схеме, использованной при ее же записи, объектная волна, восстановленная с голограммы опорным пучком, будет интерферировать с новой волной, идущей от объекта. В результате можно в реальном режиме времени отслеживать динамику процессов, происходящих в объекте исследования. Такой метод голографической интерферометрии так и называется – *метод реального времени*.

Для более полной ясности можно подчеркнуть, что в классической интерферометрии интерферируют волны, которые *в один момент времени прошли по разному пути*.

В голографической интерферометрии интерферируют волны, которые *в разные моменты времени прошли по одному и тому же пути*.

Интерферометрия фазовых объектов

Реальные объекты, с которыми приходится иметь дело в экспериментах, изменяют и фазу, и амплитуду, и направление распространения зондирующего излучения. Это приводит к

тому, что основным критерием применимости каждого конкретного метода становится величина ошибки, вносимой им в конечный результат.

Принято считать, что для прозрачных объектов применение интерферометрических методов диагностики допустимо, если максимальная рефракция на объекте не превышает 0,1 мрад, а влиянием поглощения можно пренебречь. Именно такие прозрачные объекты и получили название фазовых, то есть изменяющих только фазу зондирующего излучения.

Всегда следует помнить, что *и классическая, и голографическая интерферометрия* дают правильные результаты только для чисто *фазовых* объектов

Виды настройки интерферометров

Внешний вид и способы расшифровки интерференционной картины, полученной любым способом интерферограммы (голографической или классической), зависят от настройки интерферометра.

Бесконечно широкая полоса

Если после регистрации первой опорной голограммы ни рабочий ни опорный пучок не трогали, то все изменения в результирующей интерференционной картине будут обусловлены только набегом фазы в каждой точке волнового фронта, вызванным процессами, произошедшими в объекте между экспозициями (в методе двух экспозиций) или в течение съемки (в методе реального времени). В этом случае говорят, что интерферометр настроен на *бесконечно широкую полосу*.

При таком способе настройки изменения в объекте между экспозициями проявятся в появлении замкнутых интерференционных полос, как оконтуривающих неоднородность, так и находящихся внутри нее. Однако расшифровать такую интерференционную картину можно только априори, зная знак изменения набега фазы при переходе от одной полосы к другой. В получаемой картине эта информация отсутствует.

Полосы конечной ширины

Если в интервале между экспозициями или рабочий, или опорный пучок, или сама пластинка были повернуты на какой-то угол, то результирующая интерференционная картина будет наблюдаться на фоне регулярной системы равно отстоящих друг от друга параллельных полос. Шаг этих полос определяется величиной угла поворота, а ориентация полос зависит от способа их создания. Такая настройка интерферометра называется *настройкой на полосы конечной ширины*. В этом случае неоднородности в объекте проявляются в виде искривления опорной системы полос.

Для расшифровки такой интерференционной картины априорная информация не нужна. Знак изменения набега фазы, то есть направление счета полос, задается направлением сдвига оптических элементов схемы при создании системы этих полос.

Подготовка и обработка галогенидосеребряных эмульсий при голографической интерферометрии

Записать и восстановить голографическую интерферограмму – это еще полдела. Далее требуется полученную картину расшифровать. А чтобы расшифровка принесла ожидаемые результаты, необходимо учесть ряд особенностей, которые сильно влияют на степень достоверности получаемой информации с голографической интерферограммы.

Технология получения информации с помощью голографических интерферограмм очень чувствительна к малейшим проявлениям усадки эмульсии, которая может приводить к искажению записанной интерференционной картины и получению неверных результатов при ее расшифровке. Поэтому приходится принимать специальные меры, если не к полному устранению усадки, то хотя бы для сведения ее к минимуму.

Оптические схемы голографических интерферометров

Классические интерферометры изготавливались для решения конкретной задачи и почти не подлежали переналадке. В отличие от них голографические интерферометры почти

универсальны – одна и та же схема может использоваться для работы с абсолютно разными объектами.

При большом разнообразии вариантов оптических схем голографических интерферометров (ГИ) для фазовых объектов все они сводятся к двум основным: с диффузным и с коллимированным рабочим пучком. Каждая из этих схем имеет свои особенности и применяется в зависимости от поставленной задачи.

ГИ с диффузным рабочим пучком

Диффузный рабочий пучок (рис. 1.46) позволяет наблюдать интерференционную картину на объекте невооруженным глазом на освещенном фоне. В этом случае в пределах апертуры голограммы можно выделить как бы несколько направлений просвечивания и увидеть соответствующие изменения в интерференционной картине. При этом каждая часть голограммы будет нести информацию о каждой точке объекта, и небольшой кусочек пластинки будет восстанавливать весь объект целиком. Такая схема одинаково хороша и для симметричных и для несимметричных объектов, поскольку позволяет при пересъемке выделить несколько направлений просвечивания под разными углами. Из-за использования рассеивателя в этом случае на восстановленное изображение накладывается спекл-шум, параметры которого обусловлены не только свойствами лазерного излучения, но и характеристиками рассеивателя, и регулировке не поддается. Кроме того, использование рассеивателя заставляет направлять в рабочий пучок значительно большую, чем в опорный, часть энергии лазерного пучка.

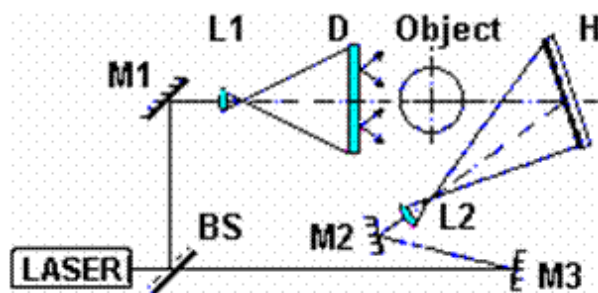


Рис. 1.46. Диффузный рабочий пучок: BS – светоделитель; M1–M3 – глухие зеркала; L1 и L2 – короткофокусные линзы; D – прозрачный рассеиватель; H – голограмма

На рисунках 1.47 и 1.48 показаны два снимка, сделанных с одной голограммы под разными углами. ГИ был настроен на бесконечно широкую полосу.



Рис.1.47

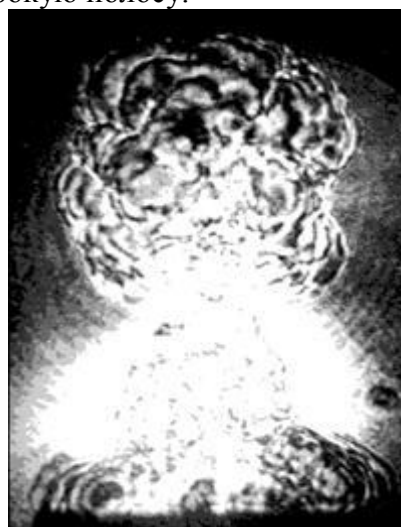


Рис.1.48

ГИ с коллимированным рабочим пучком

Коллимированный рабочий пучок (рис.1.49) выделяет четко фиксированное направление, которое изменить уже нельзя. В этом случае не вооруженным глазом изображение наблюдается на фоне яркой светящейся точки. Нормальное изображение можно увидеть только через объектив, например фотоаппарата.

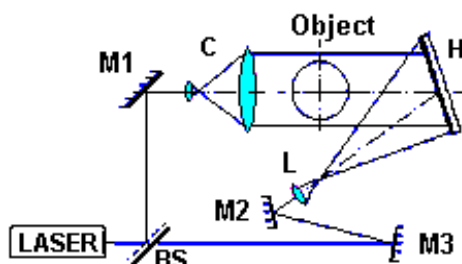


Рис. 1.49

На рисунке обозначено: BS – светоделитель; M1–M3 – глухие зеркала; L – короткофокусная линза; C – коллиматор; H – голограмма.

Размывающий интерференционные полосы спекл-шум при такой схеме съемки значительно меньше, чем при работе с диффузным рабочим пучком. Этот способ съемки удобен для осесимметричных, плоских или однородных по направлению просвечивания объектов. Энергии в рабочем пучке он требует также меньше, чем способ на схеме (рис. 1.46).

Если объединить схемы с рисунков 1.46 и 1.49, то можно получить и заданное заранее направление зондирования и удобство наблюдения картины не вооруженным глазом на фоне освещенного рассеивателя. Эта схема приведена на рисунке 1.50.

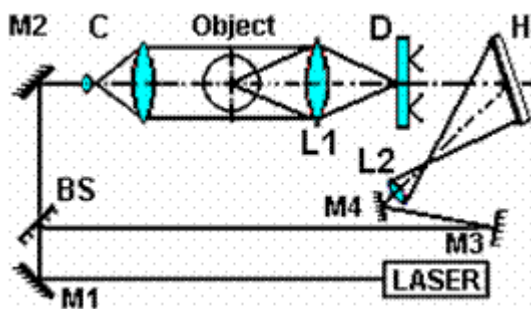


Рис. 1.50

На рисунке обозначено: BS – светоделитель; M1–M4 – глухие зеркала; D – прозрачный рассеиватель; C – коллиматор; L1 – объектив; L2 – короткофокусная линза; H – голограмма.

Подобная схема регистрации голографических интерферограмм позволяет спроецировать нужное сечение объекта на плоскость рассеивателя. Это улучшает привязку интерференционных полос к объекту и делает более удобной дальнейшую расшифровку полученной картины.

Объектив в схеме (рис.1.50) можно не использовать, но тогда объект должен располагаться вплотную к рассеивателю.

На рисунках 1.51 и 1.52 показаны две интерферограммы однотипных объектов, полученные при разных настройках интерферометра.

Существуют и другие варианты оптических схем для голографической интерферометрии фазовых объектов. Все их модификации определяются спецификой конкретного объекта исследования.

В случае работы с полосами конечной ширины все схемы могут содержать дополнительные оптические элементы, регулирующие настройку системы опорных полос.



Рис. 1.51. Настройка на бесконечно широкую полосу

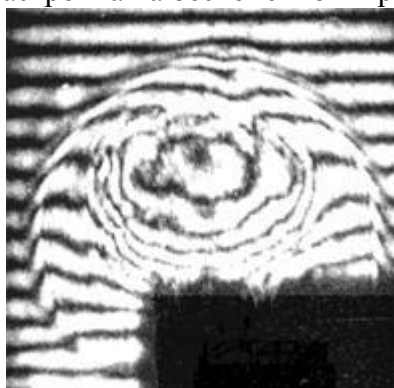


Рис. 1.52. Настройка на полосы конечной ширины

ГИ сфокусированного изображения

ГИ построены по схеме голограмм сфокусированного изображения (ГСИ). Они также могут применяться и с рассеивателями и без них. Но применение рассеивателя в данном случае не целесообразно. Дело в том, что интерферограммы, снятые по схеме ГСИ (рис. 1.53) удобно восстанавливать в белом свете. Спекл-структура, зависящая только от свойств лазерного излучения и объектива, усредняется. В результате отдельных спеклов не видно и контраст интерференционных полос несколько повышается. Если же использовать рассеиватель, то на уже имеющееся спекл-поле накладывается дополнительное поле, сгенерированное рассеивателем. Ситуация ухудшается особенно при малых размерах неоднородности. Какой пучок (расходящийся или плоский) использовать в качестве опорного – зависит от требований эксперимента и имеющихся оптических элементов. ГИ по схеме ГСИ позволяют исследовать тонкую структуру интерференционных полос, включая пересъемку через микроскоп. Для примера на рисунке 1.54 показана интерферограмма, а на рисунке 1.55 – ее увеличенный фрагмент.

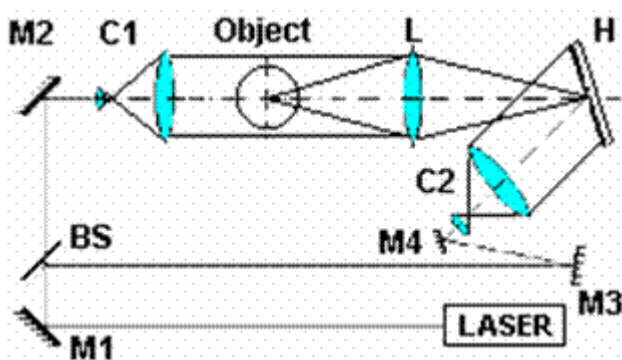


Рис. 1.53

На рисунке обозначено: BS – светоделитель; M1–M4 – глухие зеркала; C1, C2 – коллиматоры; L – объектив; H – голограмма



Рис. 1.54



Рис. 1.55

Оптико-геометрические методы измерения деформаций и перемещений

Оптико-геометрические методы применяют для бесконтактного исследования НДС на поверхности плоских и объемных деталей машин, моделей и образцов полуфабрикатов. Общим классификационный признак этих методов – наличие оптической бесконтактной связи объекта исследования с регистратором искажения (деформации) базового геометрического элемента, нанесенного на объект, спроецированного или зеркально отраженного в нем. Каждый из оптико-геометрических методов эффективен для определенной группы задач, имеет, как правило, несколько разновидностей и областей применения, различается видом базовых элементов, типом регистрации и обработки.

Метод делительных сеток

Исследования пластических деформаций при разрушении материалов методом делительных сеток, выполненные в 40–60-х годах прошлого столетия, показали влияние концентрации напряжений (отверстий и целевых надрезов) на прочность деталей из конструкционных материалов. На их основе рассмотрены технологические задачи деформирования тонкостенных деталей из алюминиевых сплавов. Развитие техники нанесения микросеток позволило исследовать упругопластические деформации в области вершины трещины при циклическом нагружении. Исключительно эффективным оказалось приложение метода делительных сеток к задачам пластического деформирования металлов при обработке давлением. Метод оказал значительное влияние на проектирование нового инструмента и режимов штамповки, прессования, вытяжки, прокатки и т.д. Современные технологические методы повышения усталостной прочности и вязкости разрушения (трещиностойкости) полуфабрикатов из штампованных заготовок и проката опираются на экспериментальные исследования, выполняемые методом делительных сеток и другими оптико-геометрическими методами.

Другое направление исследований – это изучение НДС в упругой области на резиновых и полимерных моделях при малых и больших деформациях (до 18%). Пусть, например, в плоскости симметрии пластически деформируемой цилиндрической заготовки размещены ортогональные сетки с перфорированными отверстиями, центры которых совпадают с угловыми точками квадрата. Будем считать материал заготовки изотропным, несжимаемым, а деформации в пределах ячейки сетки однородными, причем вычисляемые компоненты деформаций отнесем к центру ячейки, считая их средними между базовыми точками.

Рассмотрим осесимметричную объемную задачу с тремя плоскостями симметрии, например конечные формоизменения при штамповке цилиндрической поковки с прямой горизонтальной осью (рис. 1.56).

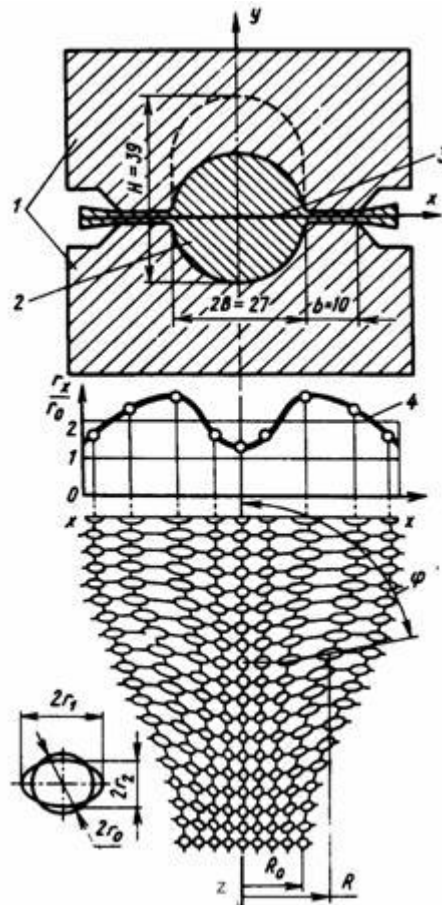


Рис. 1.56. Схема штампа с цилиндрической поковкой и сетка в плоскости заусенца после деформирования:

1 – штамп; 2 – поковка с исходной высотой H (мм); 3 – плоскость сетки;

4 – зависимость $r_x/r_0 = f(x)$ в сечении «xx» (исходная длина поковки $2l=100$ мм)

В методе сеток, когда размечены базовые элементы, удобно использовать главные деформации в логарифмической форме. Окружности сетки в плоскостях симметрии штамповки после деформирования преобразуются в эллипсы с осями по главным направлениям, поэтому

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{r_2}{r_0}; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{r_3}{r_0}, \quad (1.26)$$

где r_1, r_2, r_3 – полуоси эллипсов; r_0 – радиусы исходных окружностей сетки.

В случае деформирования тел вращения по оси z главные деформации в плоскости сетки определяются теми же зависимостями (1.26), но окружная деформация в меридиональном сечении

$$\varepsilon_{\oplus} = \ln \frac{R}{R_0},$$

где R, R_0 – расстояния от оси симметрии z до рассматриваемой точки до и после деформирования соответственно.

Для вычисления осевой и радиальной логарифмической деформации используют зависимости

$$\varepsilon_z = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{\oplus} + \ln \frac{r_1}{r_2} \cos 2\varphi \right), \quad \varepsilon_{\rho} = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{\oplus} - \ln \frac{r_1}{r_2} \cos 2\varphi \right),$$

где φ находят экспериментально замером угла между направлением большой полуоси эллипса и осью z заготовки.

Измерение деформаций и перемещений с помощью сетки с квадратными ячейками, когда в общем случае базовый элемент превращается в параллелепипед или четырехугольник, выполняют оптическими средствами с последующим вычислением абсолютных приращений граней параллелепипеда и соответствующих углов на основании достаточно громоздких формул, полученных из геометрических соотношений.

Расчет напряжений выполняют на основе гипотез теории пластичности. В зависимости от поставленной задачи и типа материала вычисления проводят по теориям малых упруго-пластических деформаций, пластического течения, сопротивления материалов пластическому деформированию.

Нанесение сеток, растров и фигур на образцы, детали и экраны

В зависимости от поставленных исследовательских задач, а также от материала детали, от заданных предельных деформаций и внешних условий (температуры, влагостойкости, контакта со средой и т.д.), разрабатывают технологию нанесения сеток, растров и фигур. При нанесении базовых фигур учитывают и метод измерения деформаций, поскольку контрастность воспроизведения или наблюдения, фактура материала, светопрозрачность, ширина черных и светлых линий и другие факторы влияют на точность и трудоемкость обработки результатов.

Царапание сеток и растров применяют при механических испытаниях материалов и при исследовании технологических задач обработки металлов давлением. Операцию проводят с помощью игл, специально заточенных победитовых резцов, корундовых и алмазных инденторов и наконечников. Растры с линиатурой до 10 лин./мм изготавливают на делительных машинах линованием парафинированной поверхности стекла, после чего выполняют химическое травление линий в стекле и заполнение их краской. Эталонные растры и сетки, изготовленные на прецизионных делительных машинах, служат в качестве шаблонов для снятия реплик и фотокопий, которые затем используются в качестве контрольных растров и сеток сначала для нанесения фотоспособом рабочего растра на детали, а затем в качестве базового для измерения методом сеток или методом муаровых полос.

В задачах обработки металлов давлением сетки и растры наносят иногда непосредственно на металл; в этом случае поверхность полированных образцов, как правило, перед царапанием покрывают тонким слоем контрастного металла способами вакуумного напыления или гальваническим, чтобы создать цветовое различие и контраст в линиях сетки. Хороший эффект получают, например, меднением стальных образцов.

Накатка координатных сеток, фигур и растров используется для нанесения базовых элементов при изучении пластических деформаций и разрушения. Оригинал сетки изготавливают в виде цинкового клише с рельефом сетки заданного рисунка. Для перенесения сетки с матрицы на деталь применяют упругие валики, в том числе сложной формы (для нанесения сеток на тела вращения и сложные поверхности). На зеркальное стекло или мраморную плиту валиком тонким слоем раскатывают типографскую краску и переносят ее на матрицу, а затем другим валиком переносят рисунок сетки на деталь. Шаг базовых фигур находится в пределах 0,25–5 мм при толщине линий в сетках 0,02–0,08 мм.

Офсетный способ изготовления формы-клише значительно упрощает технику нанесения сеток и растров и позволяет покрыть большую площадь на плоских и небольшой кривизны деталях из жестких и мягких материалов (каучук, резина). Офсетная печать основана на принципе избирательного смачивания формы (изображения сетки или растра), согласно которому печатающие элементы хорошо воспринимают типографскую краску, но отталкивают воду, а пробельные – наоборот. Перенос изображения с офсетной формы на исследуемую поверхность осуществляют, как и с цинкового клише, – эластичным резиновым цилиндрическим валиком. Офсетную форму изготавливают фотохимическим способом с применением эталонных пленочных фотонегативов по стандартной технологии.

Выдавливание или штампование сеток на поверхность пластических материалов осуществляют жесткой матрицей, затем материал отжигают и из заготовки с сеткой вырезают образцы.

Фотосетки и фоторастры – наиболее распространенные современные элементы оптико-геометрических методов. Изготовленные на стеклянных подложках, они являются эталонами при измерениях и репродуцировании. Фотокопии на пленке служат для контактной печати, а также для переноса эмульсии с растром по так называемому «способу расслаивающихся пленок».

Двойной экспозицией со сдвигом эталонного раstra на $1/4$ и $1/2$ шага можно получить решетку с частотой линий вдвое большей, чем исходная; этим способом, например, получили сетку с размером ячейки 100 мкм и толщиной линий 10 мкм последовательной пересъемкой раstra со сдвигом и поворотом на 90° .

Высокочастотные растры получают методом неподвижного интерференционного поля или голографического мультиплицирования на голографические фотопластинки. При правильном выборе фотопроцессов и материала возможно получение растров с частотой до 1000 лин./мм.

Зеркально-оптический метод

При исследовании изгиба пластин в полунатурном и модельном эксперименте зеркально-оптическим методом измеряют с помощью отраженной координатной сетки углы поворота нормали φ_x, φ_y , прогибы w и кривизны $k_{x,y}$ поверхности объекта. В этом случае плоская или почти плоская поверхность детали или модели должна быть зеркальной. Ортогональную сетку на плоском экране располагают параллельно плоскости объекта на некотором расстоянии от него. Отражение сетки в деформируемом объекте регистрируют фотокамерой или кинокамерой для процессов, происходящих во времени (рис. 1.57).

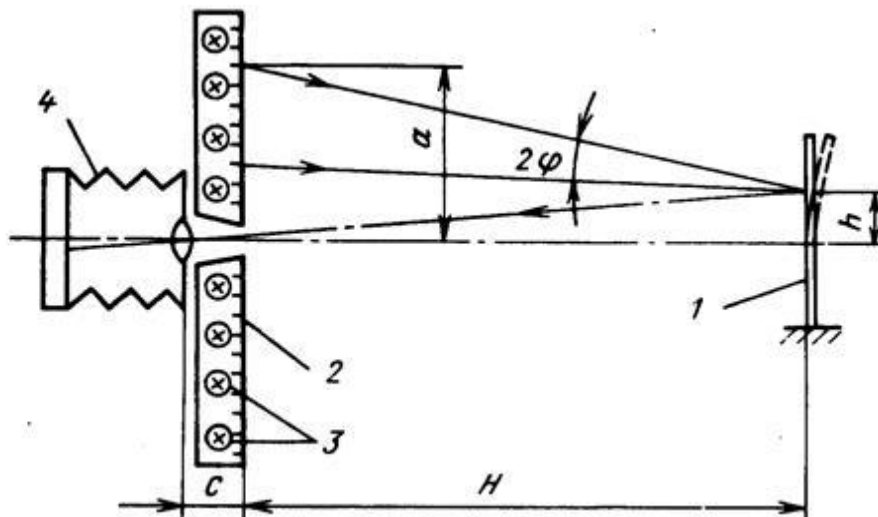


Рис. 1.57. Схема зеркально-оптической установки: 1 – модель; 2 – экран с сеткой; 3 – лампа; 4 – фотокамера

Обычно на один негатив выполняют две экспозиции – до и после нагружения, а затем оба изображения обрабатывают, как и в методе делительных сеток, на измерительном микроскопе по специальной методике. Для регистрации нестационарных процессов (например, при сварочном нагреве алюминиевой пластины) искажение отраженной сетки от температурного коробления поверхности фотографируют во времени по мере продвижения электрода.

Зеркально-оптическая установка, схема которой показана на рисунке 1.57, имеет зачерненный экран из оргстекла размером 1200×1200 мм с прозрачными линиями ортогональ-

ной сетки 20×20 мм и толщиной линий 2 мм. Сетка подсвечивается изнутри люминесцентными лампами для создания контрастного и яркого изображения квадратов. Основная расчетная зависимость для плоского экрана выводится из геометрических соотношений:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \left[\frac{\alpha - 2h}{H} + \frac{hC}{H(H+C)} \right] \cdot \left[1 + \frac{(\alpha - h)h}{H(H+C)} \right]^{-1}. \quad (1.27)$$

При малых углах поворота нормали $\operatorname{tg} 2\varphi \approx 2\varphi$. При отношении $\alpha/H \approx 0,1-0,25$ и реальных соотношениях габаритного размера модели и оптического рычага $h/H \approx 0,1$ формулу (1.27) упрощают:

$$\varphi \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha - 2h}{H} + \frac{hC}{H(H+C)} \right].$$

Погрешности будут допустимыми, если в сравнительных испытаниях углы поворота нормали к соответствующим осям вычислять по формулам

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_x \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_x + 2h_x}{H} \right);$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \varphi_y \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_y + 2h_y}{H} \right).$$

Погрешности при вводимых допущениях и конкретных параметрах установки оценивают несложными вычислениями и по номограммам.

Получив зависимости изменения угла поворота нормали по соответствующей координате, их дифференцируют для нахождения величины кривизны k_x, k_y, k_{xy} или интегрируют для получения прогибов w .

Следует отметить основные преимущества метода – простоту технической реализации и возможность бесконтактной регистрации нестационарных процессов деформирования с одной экспозиции.

Метод муаровых полос

Метод, использующий муаровый эффект для измерения деформаций и перемещений на поверхности плоских деталей и реже – в объемных прозрачных моделях, применяют при упругопластическом и пластическом деформировании металлов и для решения упругих задач на низкомодульных материалах. В задачах изгиба пластин, деформирования мембран и оболочек, а также изучения закритического поведения тонкостенных конструкций после потери устойчивости применяют другие разновидности метода муаровых полос, использующие принципы оптического рычага при отражении или проецировании растров. Используя стробоскопическое освещение и способ оптического совмещения растров с помощью муаровых картин, визуализируют формы колебаний пластин и оболочек. Метод применяют для технологического контроля формы поверхности крупных деталей малой и средней кривизны типа аэродинамических поверхностей, а в оптическом производстве – для контроля деталей оптики. Поточный контроль формы плоского проката и лент в металлургическом производстве осуществляют в режиме листовой прокатки непосредственно на стане. Известно применение муарового эффекта в растровых оптических приборах, а также в муаровых датчиках положения, регистрирующих линейные и угловые перемещения в средствах автоматизации.

Муаровый эффект – явление механической интерференции, возникает при наложении двух или более систем линий, сеток, растров или точек как картина чередующихся темных и светлых полос. Одно из свойств муарового эффекта как мерительного инструмента состоит в том, что он обладает большим и регулируемым коэффициентом передаточной функции, связывающей шаги (частоты) исходных растров с шагом (частотой, скоростью

перемещения) муаровых полос. Этот коэффициент достаточно велик, что позволяет согласовать разрешающую способность зрения человека или инструмента, заменяющего его при визуальном наблюдении поля муаровых полос, с соответствующими микроперемещениями объектов.

Муаровые полосы при наложении двух растров (рис. 1.58) образуются при малой разности $(a_1 - a_2)$ в шагах, при малом относительном повороте двух растров, но не более чем на угол $\alpha = 30^\circ$. При наложении кругового растра на линейный (рис. 1.58, в) особенно заметна область, где пропадает муаровый эффект и вместо него наблюдается сетка из четырехугольных элементов. Геометрический анализ и математическое описание интерференции проводят для любых видов растров, получая аналитические формулы, связывающие параметры исходных растров и муаровых полос. Наложением и относительными сдвигами растров пользуются как аналогами математических операций, выполняя, например, дифференцирование, интерполяцию, умножение.

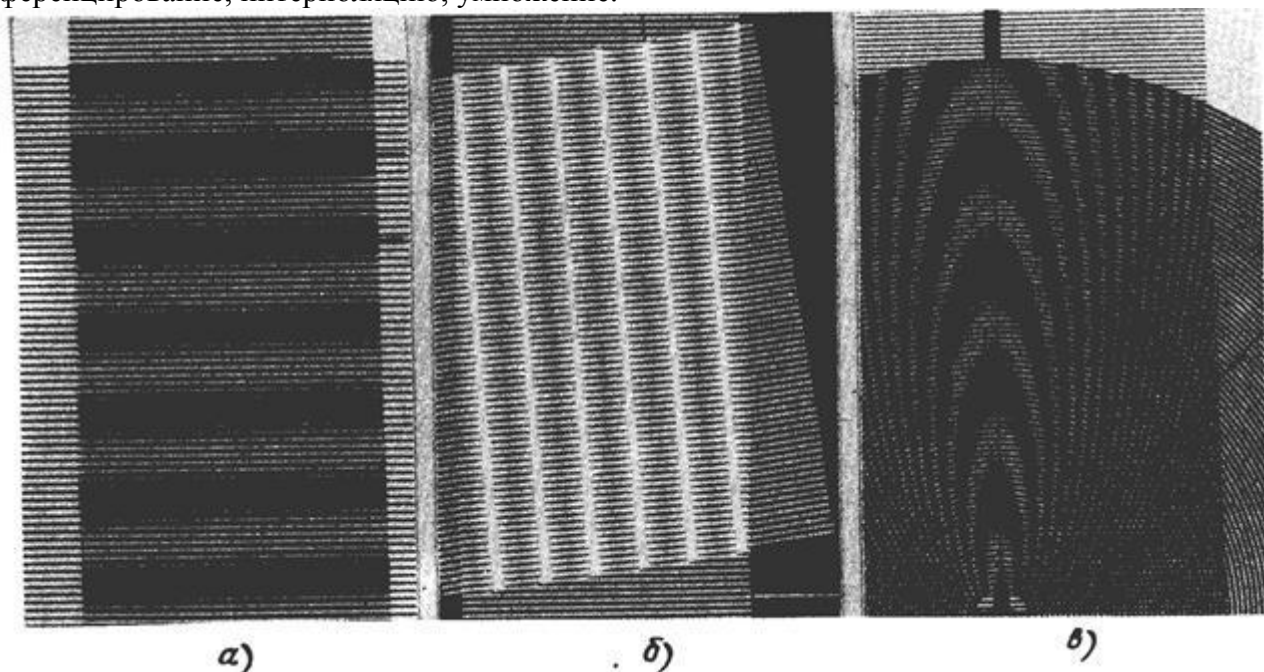


Рис. 1.58. Муаровый эффект при наложении растров: а) растры при небольшой разнице в шаге; б) одинаковые растры, повернутые на угол α ; в) шаг линейного растра больше шага кругового растра

Методы измерения деформаций и перемещений, основанные на муаровом эффекте, предполагают наличие эталонного, контрольного (базового) растра и растра, связанного с деталью, испытывающей деформацию. При наложении двух растров образуется поле муаровых полос, однозначно характеризующих линейные или угловые перемещения точек исследуемой детали (поверхности) по определенным направлениям.

Оптические схемы для исследования деформаций на плоских поверхностях непрозрачных деталей, а также в плоских срезах или сечениях прозрачных моделей из пластмасс, оргстекла, полиуретанов используют три типа наложения растров (рис. 1.59). По схеме *А* реализуется способ двойной экспозиции одного растра на детали, выполняемой сначала до деформирования (контрольный растр) и затем после деформирования. Совмещение растров для упругих и упругопластических задач выполняют на одном негативе; для пластического деформирования – раздельной экспозицией по этапам. Базу крепления камеры при работе по способу двух экспозиций выбирают непосредственно на образце, обеспечивая ее постоянство относительно зоны измерения.

По схеме *Б* используют контрольный растр, наложенный с весьма малым зазором на рабочий растр, нанесенный на деталь. Контрольный растр базируется непосредственно на об-

разце по осям симметрии или в точках, где известны перемещения. Вариантом схемы *Б* является схема *В*, предназначенная для прозрачных объектов. В этом случае модель с рабочим растром освещается коллимационным пучком света; между контрольным и рабочим растром обычно вводят иммерсионную жидкость.

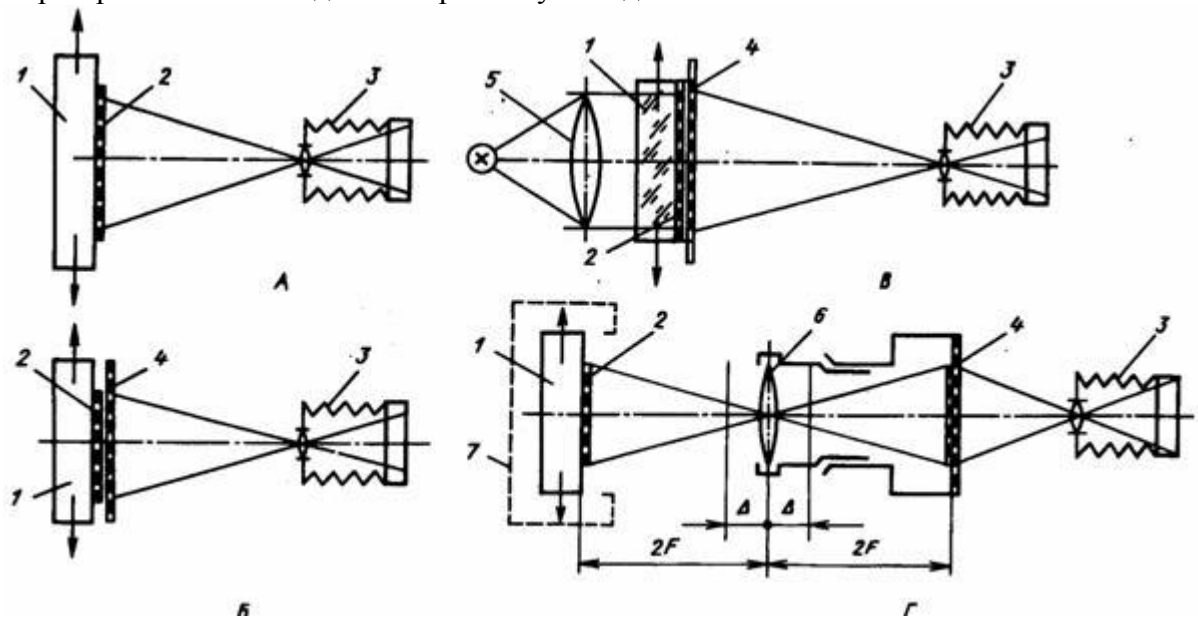


Рис. 1.59. Оптические схемы наложения растров и образования муаровых полос (рабочий растр нанесен на поверхность рабочей детали):

1 – деталь; 2 – рабочий растр; 3 – фотокамера; 4 – контрольный растр; 5 – коллиматор; 6 – объектив; 7 – термокамера

По схеме *Г* реализуют оптическое совмещение рабочего и контрольного растров с помощью длиннофокусного объектива и поворотного экрана. Эту схему применяют для бесконтактных измерений при повышенных температурах, в условиях динамических нагрузок, в агрессивных средах, а также при исследовании объемных прозрачных моделей с вклеенными растрами.

Если по схемам *Б*, *В* и *Г* камера регистрирует муаровые полосы и к разрешающей способности задиафрагмированного объектива не предъявляется высоких требований, то для схемы *А* камерой фотографируют растры, а для схемы *Г* проекционный объектив должен обладать, кроме высокой разрешающей способности, свойствами телецентрической системы, т.е. при некотором изменении расстояния объектива до объекта незначительно изменять размер изображения и иметь достаточную глубину резкости.

Независимо от схемы совмещения двух растров в плоских задачах (за исключением схемы *А*) применяют два способа отсчета муаровых полос: способ дифференциального муара и способ простого муара. В первом случае предварительно создают статическую исходную муаровую картину, например, с помощью малого поворота контрольного растра или изменения масштаба рабочего растра, чтобы вести относительный отсчет полос приращення. Во втором случае используют начальную нулевую картину муаровых полос, выявляющую в основном несовершенства модели или предварительную нагрузку на нее.

Муаровые полосы являются геометрическим местом точек, получающих одинаковое перемещение в направлении, перпендикулярном к линиям контрольного растра.

Обычные линейные, регулярные растры используют для измерений перемещений в декартовых координатах x, y ; тогда муаровые полосы, полученные, например, при расположении линий растра параллельно оси y , будут соответствовать линиям уровня поверхности $u=u(x, y)$ и разница в значениях u для соседних муаровых полос на плоскости будет равна шагу контрольного растра α_k .

Метод хрупких тензочувствительных покрытий

Для исследования НДС на поверхности детали методом хрупких тензочувствительных покрытий на нее наносят тонкое покрытие специального состава, которое под действием растягивающих напряжений-деформаций и остаточных технологических двухосных растягивающих напряжений в самом покрытии растрескивается по закону изостат, т.е. по линиям равных главных напряжений. Приближенно принимают, что трещины распространяются вдоль второго главного напряжения и

$$\sigma_1 = E \sigma_n^*, \quad (1.28)$$

где σ_1 и E – главное напряжение и модуль упругости материала детали соответственно; σ_n^* – предельная деформация в момент появления трещины, получаемая при градуировке покрытия.

Принимая различные теории прочности для хрупкого покрытия, можно получить другие соотношения, связывающие деформации в детали с предельной деформацией для покрытия, но обычно ограничиваются соотношением типа (1.28). Эксперимент проводят при плавном нагружении детали, наблюдая за появлением и распространением трещин. Иногда покрытие наносят в нагруженном (сжатом) состоянии детали, чтобы при разгрузке получить трещины от деформации растяжения в зонах концентрации напряжений. Применяют несколько типов покрытий: малостабильные покрытия для качественных исследований на основе обработанной канифоли, растворенной в сероуглероде; стабильные покрытия канифольного типа, наносимые газопламенным напылением, для количественных измерений НДС; высокотемпературные наклеиваемые оксидные и эмалевые покрытия.

Градуируют покрытия на плоских балочных образцах при чистом или поперечном изгибе, многократно повторяя градуировочный эксперимент и выполняя статистическую обработку результатов для снижения разброса данных в основном эксперименте. Точность эксперимента, проводимого методом хрупких тензочувствительных покрытий, обычно оценивают в 7–15%. Обработку проводят для двухосного НДС в упругой и упругопластической области по известным уравнениям с учетом различия упругих постоянных детали и покрытия. Метод эффективно применяют в различных областях машиностроения.

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 11 Предварительные, прямо-сдаточные и периодические испытания машин.

Диаграммы испытаний

Для проведения испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84) используют стандартные образцы круглого или прямоугольного сечения, у которых отношение расчетной длины l_0 к диаметру поперечного сечения d_0 равно десяти (рис.1.26, а). В случае некруглого сечения вместо диаметра принимают $\sqrt{A_0}$. Если по каким-либо причинам изготовить стандартные образцы невозможно, применяют так называемые пропорциональные образцы – меньшего сечения, но с тем же соотношением размеров (табл.1.6). При испытаниях на малых машинах с автоматической записью диаграммы пользуются малыми (кратными) образцами, у которых $l_0/d_0 = 5$ (рис.1.26, б). Для испытания листовых материалов используют плоские образцы (рис.1.26, в). Во всех случаях на концах образцов имеются головки для захвата их машиной, форма и размеры которых зависят от конструкции приспособлений для захвата. Между рабочей частью и головками образца обеспечиваются плавные переходы размеров. Поверхность рабочей части выполняется ровной, чистой.

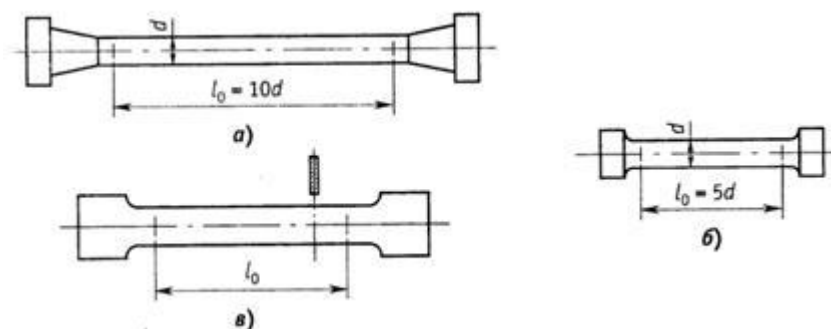


Рис.1.26

Образцы для других видов испытаний материалов (сжатие, срез) имеют круглое или прямоугольное (квадратное) постоянное сечение без головок по концам; соотношение расчетной длины и размеров сечения оговаривается ГОСТ 9017-74, 10180-78, 25503-80 и др. (табл.1.6)

Таблица 1.6. Типы образцов для испытаний

Материал	Образец	Форма образца	Расчетная Длина l_0 , мм	Поперечные размеры, мм
Растяжение				
Сталь	Стандартный	Цилиндр	100	10
	Короткий	Произвольная	$11,3\sqrt{A_0}$	-
		Цилиндр	50	10
	Пропорциональный	Произвольная	$5,65\sqrt{A_0}$	-
		Цилиндр	30	6
Сжатие				
Чугун		Цилиндр	20	30...60
Камень		Кубик	70	70
Цемент		Кубик	70	70

Материал	Образец	Форма образца	Расчетная Длина l_0 , мм	Поперечные размеры, мм
Бетон		Кубик	100; 150	100; 150
Кирпич		Параллелепипед	120	120x160

Наиболее ценные сведения при изучении характера деформируемости каждого материала можно получить из диаграмм испытания образцов. В процессе его исследования на машине специальным приспособлением записывается диаграмма испытания, связывающая нагрузку P на образец с его продольной деформацией Δl . По данным, полученным из опытной диаграммы, или же по результатам наблюдений за опытом строят *диаграмму растяжений*.

Диаграммой растяжения называется график, показывающий функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией при статическом растяжении образца до его разрыва.

На рис. 1.27 показан примерный вид параметрической диаграммы растяжения малоуглеродистой стали в координатах: абсолютное удлинение $\Delta l(t)$ – нагрузка $F(t)$. В качестве параметра здесь выступает время нагружения, которое для простоты обычно не показывают.

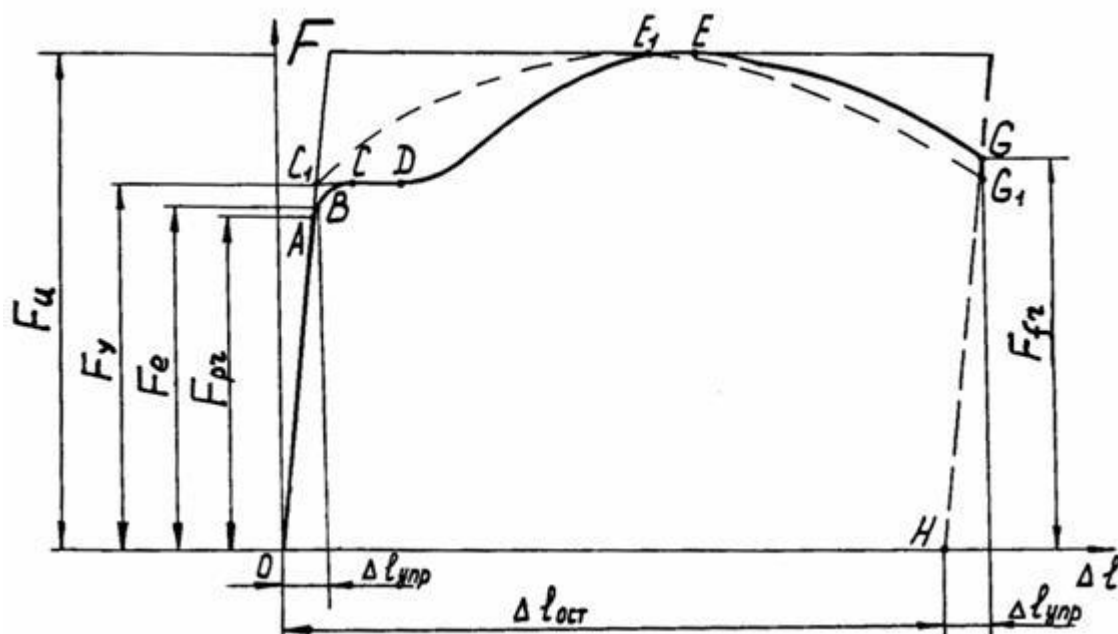


Рис. 1.27. Диаграмма растяжения пластичного материала

Так как испытание проводят на гидравлической машине, в которой деформация является первичной ($d\Delta l / dt = \text{const}$), а нагрузка вторичной ($dF / dt = \text{var}$), то осью абсцисс (аргументом) является абсолютное удлинение Δl , а осью ординат (функцией) – нагрузка F , т.е. фактически мы имеем зависимость $F = f(\Delta l)$, интерпретированную Гуком, проводившим опыты в упруго-пропорциональной зоне нагружения: «каково удлинение, такова сила». Однако в современной трактовке, с учётом того что в реальных условиях эксплуатации машин и сооружений первичной является нагрузка, функциональную зависимость образуют, полагая, что $\Delta l = f(F)$, и обсуждают, как изменяется деформация образца в зависимости от нагрузки (какова сила, такова удлинение).

На диаграмме растяжения $OABCDEG$ показаны 7 характерных точек, соответствующих определённому уровню нагрузки и ограничивающих 6 различных зон деформирования:

OA – зона пропорциональности (линейной упругости);

AB – зона нелинейной упругости;

BC – зона упругопластических деформаций;
 CD – зона текучести (пластических деформаций);
 DE – зона упрочнения;
 EG – зона закритических деформаций.

На участке OA смещение атомов монокристаллов пропорционально приложенной нагрузке. Дефекты кристаллической решётки практически не проявляются.

Прямолинейный отрезок диаграммы соответствует состоянию материала образца, описываемому законом Гука; наклон прямой OA к оси абсцисс характеризует степень сопротивляемости материала деформированию в упругой стадии, т.е. его жесткость. В пределах закона Гука тангенс угла наклона прямой $F = f(\Delta l)$ к оси Δl определяется величиной E :

$\operatorname{tg} \alpha = F / \Delta l = E$. Точка A соответствует его *пределу пропорциональности* σ_{ny} , т.е. наибольшему напряжению, до которого материал следует закону Гука, которое определяется как отношение силы, при которой эта пропорциональность еще не нарушается, к начальной площади поперечного сечения образца

$$\sigma_{ny} = \frac{F_{ny}}{A_0}.$$

На участке OB материал ведёт себя упруго. Поведение кристаллической решётки на участке AB характеризуется небольшой нелинейностью. Нужно заметить, что на участке пропорциональности OA материал ведёт себя одновременно и как абсолютно упругий (т. В всегда выше т. А). Точка B соответствует пределу упругости. Под *пределом упругости*

σ_y понимается такое наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных деформаций, т.е. после полной разгрузки последняя точка диаграммы совпадает с начальной точкой 0. Численные значения пределов пропорциональности и упругости получаются очень близкими, поэтому при испытаниях часто ограничиваются определением только предела пропорциональности.

На участке BC наблюдается нарастающая нелинейность в деформировании кристаллической решётки. Для выхода новых дислокаций (нарушений строения кристаллов) на поверхность монокристаллов требуется всё меньшее приращение внешней нагрузки ΔF .

На участке CD , называемом площадкой текучести, происходит лавинообразный выход дислокаций на поверхность, что приводит к значительному удлинению образца при почти постоянном уровне нагрузки, когда $\Delta F \cong 0$. Такое состояние материала названо *текучестью*. Образование пластической деформации в отдельных кристаллах образца происходит уже в начальной (упругой) стадии испытания. Однако эти деформации настолько малы, что не обнаруживаются обычными приборами для измерения малых деформаций. С увеличением нагрузки пластическая деформация начинает накапливаться в микрообъемах образца, а с наступлением текучести эти очаги пластической деформации, сливаясь, захватывают уже макрообъемы образца металла. Необратимо деформированные области образца оказывают повышенное сопротивление дальнейшему деформированию (материал упрочняется), и поэтому пластические деформации начинают развиваться в зонах, еще не подверженных этим деформациям. В дальнейшем пластическая деформация, переходя от одной зоны к другой, распространяется на весь объем рабочей части образца. Особенно наглядно фронт распространения пластической деформации вдоль образца можно наблюдать при испытании плоских полированных образцов. На поверхности таких образцов в момент возникновения очагов пластической деформации появляются темные наклонные полосы, которые, как правило, с осью образца составляют углы, приблизительно равные 45° (линии Чернова-Людерса). Эти линии представляют собой микроскопические неровности, возникающие вследствие необратимых сдвигов, происходящих в кристаллах под действием наибольших касательных напряжений. При текучести у образца повышается температура, изменяются электропроводность и магнитные свойства.

Ордината точки σ на диаграмме соответствует *пределу текучести* σ_y материала образца. Под пределом текучести понимается то напряжение, при котором происходит рост деформаций без заметного увеличения нагрузки и определяется как отношение силы, соответствующей точке σ к начальной площади поперечного сечения образца

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}.$$

Если площадка текучести на диаграмме сильно наклонена к оси абсцисс или не совсем прямолинейна, различают верхний и нижний предел текучести. У материалов, не имеющих на диаграмме явно выраженной площадки текучести, принимают условный предел текучести $\sigma_{y,0.2}$, при котором остаточное удлинение образца Δl достигает 0,2%.

На участке DE после выхода на поверхность большей части дефектов кристаллической решётки материал самоупрочняется, и образец всё ещё способен воспринимать некоторое приращение нагрузки. Указанный участок диаграммы называется *зоной упрочнения*. Однако расстояние между атомами постепенно достигает критического значения (приблизительно в два раза больше первоначального), за которым происходит «разрыв» внутренних связей. При подходе к т. E деформации начинают локализоваться в области наиболее слабого сечения, где зарождается шейка образца.

Точка E на диаграмме характеризуется наибольшей ординатой, соответствующей *пределу прочности*, или *временного сопротивления*, материала σ_u , т.е. отношению максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0}.$$

На участке EG заканчивается формирование шейки. Происходит лавинообразное разрушение связей, когда процесс деформирования уже необратим и временное равновесие между внутренними силами и внешней нагрузкой возможно только при уменьшении последней. В т. G происходит разрыв образца. Его размеры восстанавливаются на величину упругой деформации, которая на 2 – 3 порядка меньше остаточных пластических деформаций. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки. Сила, соответствующая точке G , называется разрушающей $F_{\text{р}}$, а напряжение – *истинным сопротивлением разрыву* (истинным пределом прочности). Этот предел не имеет особого практического значения и используется только при изучении процесса образования трещин. Разрушающие напряжения делятся на условные и истинные:

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{с}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_0} \quad \text{условное}; \quad \sigma_{\text{р}}^{\text{и}} = \frac{F_{\text{р}}}{A_1} \quad \text{истинное},$$

где $F_{\text{р}}$ – разрушающая нагрузка; A_1 – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Так как первоначальная площадь A_0 приблизительно в два раза превышает площадь разрыва A_1 , а разрушающая нагрузка $F_{\text{р}}$ составляет приблизительно 80 % от наибольшей нагрузки F_u , то

$$\sigma_{\text{р}}^{\text{с}} < \sigma_u; \quad \sigma_{\text{р}}^{\text{и}} > \sigma_u.$$

Например, для низкоуглеродистой стали Ст3 $\sigma_u = 380$ МПа; $\sigma_{\text{р}}^{\text{и}} = 800 \dots 1000$ МПа.

Истинное напряжение в месте разрыва образца к моменту его разрыва наиболее полно характеризует силу взаимодействия между частицами перед их отрывом друг от друга. При этом отрыв частиц происходит по центральной части поперечного сечения шейки, осталь-

ная часть скалывается под углом 45° , с образованием по периметру сечения характерного венчика (рис.1.28, а). Такая форма разрушения наблюдается только у пластичных материалов.

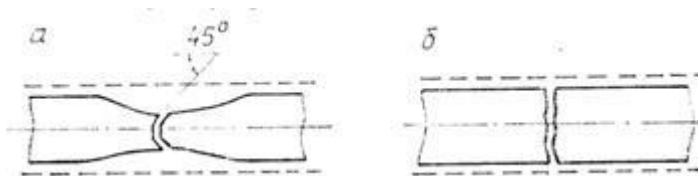


Рис.1.28

Рассмотренные выше пределы пропорциональности и упругости характеризуют упругие свойства материала. Пределы текучести и прочности являются характеристиками прочности материала. Пластичность материала оценивают относительными остаточными деформациями, накопленными образцом до его разрушения: относительным остаточным удлинением

$$\varepsilon_r = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

и относительным остаточным сужением ψ площади сечения образца при разрыве

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%$$

где l_0 и A_0 - начальные длина и площадь сечения образца; l_1 , A_1 - длина и площадь сечения образца, измеренные после его разрушения.

Сложенные части разорванного образца из пластичного материала длиннее исходного на величину остаточной деформации. Упругая часть деформации при разрушении образца исчезает. О ее величине можно судить по диаграмме (см. рис.1.27), если спроецировать точку G на ось абсцисс по направлению линии OA (точка H). Наличие в материале упругих деформаций при его работе за пределом упругости подтверждается в опытах наклонном линии к оси абсцисс, которая появится на диаграмме, если в процессе опыта прекратить нагружение и произвести разгрузку образца с той же скоростью. После исчезновения упругой деформации образец окажется удлиненным на величину остаточной деформации. Повторное нагружение разгруженного образца позволяет получить укороченную диаграмму, являющуюся продолжением начального участка полной диаграммы. Линия повторного нагружения практически совпадает с линией разгрузки. Аналогичная картина наблюдается при разгрузке и повторном нагружении образца для любой точки, выбранной на участке BG диаграммы.

Лекция 12. Испытания машин с целью определения фактических величин трудоемкости технических обслуживаний и ремонтов машин и простоев в ремонте.

Укороченная диаграмма характерна для образцов, изготовленных из материала, в результате холодной обработки (ковки, штамповки, вытяжки) получившего *наклеп (упрочнение материала)*. Модуль упругости материала при этом практически не изменится, точки *A* и *B* на укороченной диаграмме окажутся намного выше, площадка текучести исчезнет. Это означает, что при наклепе повышаются прочностные свойства материала, но снижаются свойства пластичности и он становится ближе к хрупким материалам, у которых диаграмма испытаний очень короткая, так как образцы разрушаются при весьма малых остаточных деформациях.

Наклеп наблюдается не у всех материалов и даже не у всех металлов, таких, например, как свинец, олово и др. Явление наклепа широко используют в технике – упрочняют детали, подвергая их при изготовлении пластическому деформированию. Например, цепи и канаты подъемных машин подвергают предварительной вытяжке, чтобы устранить остаточные удлинения, которые могут возникнуть во время их работы. Аналогичной обработке подвергают также некоторые виды арматуры железобетонных конструкций, цилиндры гидравлических прессов, турбинные диски, пружины и другие элементы машин и механизмов.

Следует заметить, что после предварительной вытяжки металла в некотором направлении его механические свойства изменяются (металл наклепывается) при работе на растяжение только в том же направлении; при работе на сжатие в этом же направлении его свойства почти не изменяются. Последнее обстоятельство имеет большое значение для материала, который подвергается действию переменных напряжений.

В некоторых случаях явление наклепа является нежелательным. Например, оно встречается во многих технологических процессах – прокатке стержней, резании листового материала, штамповке тонкостенных изделий, пробивании отверстий в листах под заклепки и т.п. Для устранения вредного влияния наклепа материала обычно отжигают или удаляют ту часть материала, которая получила наклеп.

В зависимости от характеристик пластичности материалы подразделяют на пластичные и хрупкие. К хрупким относят материалы с малым относительным остаточным удлинением при разрыве ($\varepsilon_r < 2...5\%$), например чугун, бетон, стекло. Диаграмма растяжения хрупких материалов, например чугуна, не имеет площадки текучести. Для хрупких материалов при

испытании на растяжение определяют в основном только предел прочности σ_b . Образец из хрупких материалов разрушается без образования шейки и зон сдвига. В результате отрыва частиц на нем появляется поперечная трещина, способствующая мгновенному разрушению (рис.1.28, б). На поверхности излома видна крупнозернистая структура материала.

Считают, что источником хрупкого разрушения являются различного рода структурные (микроскопические трещины с острыми углами и др.) и возникающие в ходе деформации дефекты. Трещиноподобные дефекты в материале способствуют более быстрому процессу разрушения, так как создают увеличение (концентрацию) напряжений в углах трещины. Концентрация напряжений может появиться и в местах включений, например в сером чугуне около включений графита в виде чешуек. Чтобы избежать концентрации напряжений у таких включений графита, им придают шаровидную форму, что достигается модифицированием чугуна магнием и некоторыми другими элементами. Напряжения, возникающие около концентраторов напряжений, создают благоприятные условия для распространения трещины разрушения по всему сечению, перпендикулярному оси образца.

Деление материалов на пластичные и хрупкие вообще условно, так как механические свойства их зависят от состояния, обусловленного условиями эксплуатации. Пластичные

материалы при низких температурах разрушаются хрупко, а хрупкие при высоких давлениях проявляют незаурядные свойства пластичности.

Для испытаний на сжатие изготавливают короткие образцы: для металлов - цилиндры с отношением высоты к диаметру в пределах 1,5...3, для других материалов - кубики (см. табл.1.6 и рис.1.29). Применение более длинных образцов недопустимо, так как такие образцы могут искривляться и тем самым искажать результаты испытаний. Следует обратить внимание на некоторую условность получаемых результатов из-за наличия сил трения в опорных поверхностях образца. Поэтому стараются ослабить влияние сил трения введением различных смазок или приданием конусной формы торцевым поверхностям образца.

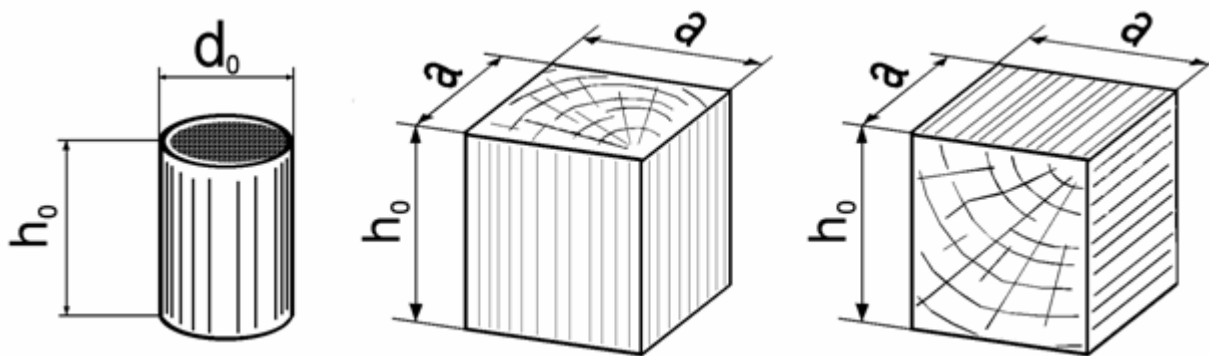


Рис.1.29. Образцы для испытаний на сжатие

Испытание на сжатие осуществляется обычно при помощи тех же испытательных машин с применением специальных приспособлений (реверсоров).

Образец закладывается между плитами испытательной машины и постепенно нагружается непрерывно возрастающей нагрузкой. При этом на диаграммном барабане машины вычерчивается диаграмма сжатия (рис. 1.30).

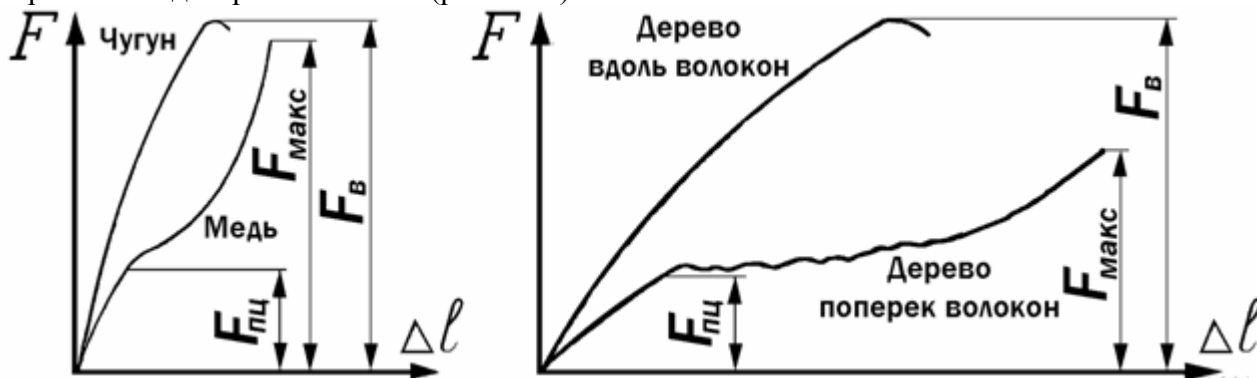


Рис.1.30. Диаграммы сжатия различных материалов

Результаты испытаний на сжатие зависят от условий проведения эксперимента. Практически очень трудно добиться приложения сжимающей силы точно по оси образца. Поэтому образец будет не только сжиматься, но и изгибаться. Чем длиннее образец, тем больше влияние изгиба (попробуйте сжать длинный и тонкий прутик). Для уменьшения влияния изгиба рекомендуется применять образцы, длина которых не более чем в два раза превышает их поперечные размеры. Применение слишком коротких образцов тоже нежелательно. При сжатии образца продольные размеры уменьшаются, а поперечные увеличиваются (по закону Пуассона).

Для *пластичного материала* (медь) диаграмма сжатия (рис.1.30) до предела текучести совпадает с диаграммой растяжения, однако ярко выраженной площадки текучести не наблюдается. После прохождения стадии текучести происходит быстрое возрастание деформаций, а увеличивающееся поперечное сечение образца становится способным выдержать все большую нагрузку. Образец принимает бочкообразную форму из-за наличия

сил трения на торцах (рис.1.31, а) и может быть сплюснен в тонкую пластинку без признаков разрушения, иногда даже без образования трещин. Поэтому в процессе испытания обычно определяют только предел пропорциональности

$$\sigma_{ny} = \frac{F_{ny}}{A_0}.$$

Для пластичных материалов модуль упругости E , предел упругости σ_y и предел текучести σ_m при сжатии примерно те же, что и при растяжении. Предел прочности при сжатии нельзя определить практически, т.к. образец не разрушается, поэтому его принимают равным пределу прочности при растяжении. Характеристики, аналогичные относительному удлинению и относительному сужению при разрыве, при испытании на сжатие также получить невозможно.

Если первоначально растянуть пластичный материал за предел текучести, а потом разгрузив сжать его, то наблюдается понижение величины предела текучести. Такое явление, называемое *эффектом Баушингера*, связано с анизотропным упрочнением материала, т.е. упрочнением, зависящим от направления нагружения.

Хрупкие материалы (чугун, бетон, кирпич и др.) лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению и поэтому они применяются для изготовления материалов, работающих на сжатие (к примеру у бетона предел прочности на сжатие раз в 10 больше предела прочности на растяжение). В силу чего хрупкие материалы применяются в основном в сжатых элементах конструкций, поэтому основным видом испытаний хрупких материалов является испытание на сжатие. Поэтому для их расчета на прочность необходимо знать механические характеристики, получаемые при испытании на сжатие.

Для чугуна на диаграмме сжатия (рис.1.30) почти отсутствует прямолинейный участок, т.е. закон Гука выполняется лишь приближенно в начальной стадии нагружения. Разрушение происходит внезапно при максимальной нагрузке F_{max} с появлением ряда наклонных трещин, расположенных приблизительно под углом 45° к образующим боковой поверхности образца, т.е. по линиям действия максимальных касательных напряжений (рис.1.31, б). Предел прочности при сжатии определяется по зависимости

$$\sigma_B = \frac{F_{max}}{A_0}.$$

Предел прочности чугуна на сжатие превышает предел прочности на растяжение в 4-5 раз и предел прочности на изгиб в 2 раза.

Следует заметить, что характер деформации и разрушения образца зависят от сил трения между торцами образца и опорными плитами испытательной машины. Путем периодической парафинной или графитовой смазки торцов можно устранить силы трения; при этом чугунный образец в течение всего испытания остается цилиндрическим и разрушается по плоскостям, параллельным диаметральной плоскости из-за недопустимо больших растягивающих деформаций.

При сжатии бетона (цементного раствора, камня), рост нагрузки сопровождается упругими деформациями вплоть до разрушения, что вообще свойственно для хрупких материалов. Характер разрушения образцов из бетона зависит от наличия сил трения между плитами машины и торцами образца. При их наличии, т.е., когда образец без смазки, разрушение происходит путем выкрашивания материала у боковых поверхностей в средней части образца, а трещины образуются под углом 45° к линии действия нагрузки (рис.1.31, в). При сжатии образца со смазанными торцами разрушение имеет вид продольных трещин, т.е. материал расслаивается по линиям, параллельным действию сжимающей силы (рис.1.31, г). Сравнение механических характеристик бетона показывает, что предел прочности при сжатии в 10-20 раз превышает предел прочности при растяжении.

При испытании на сжатие образцов из дерева, имеющего волокнистую структуру, ярко проявляются его анизотропные свойства. Так при сжатии дерева вдоль волокон (рис.2) образец претерпевает небольшие остаточные деформации, могут образовываться поперечные складки и продольные трещины, а разрушение возникает вследствие сдвига одной части образца относительно другой (рис.1.31, д). При сжатии поперек волокон после достижения некоторой нагрузки (рис.1.30) кубик продолжает деформироваться почти без увеличения сжимающей силы, подвергается прессованию (рис.1.31, е) и не всегда можно точно определить нагрузку, соответствующую началу разрушения. Поэтому предел прочности условно определяют при нагрузке, когда образец сжимается на одну треть от своей первоначальной высоты. Так для сухой древесины (с влажностью равной 15% при температуре 20°C) предел прочности на сжатие вдоль и поперек волокон отличается в 8-10 раз. Предел прочности на растяжение больше предела прочности на сжатие примерно в 2 раза. При расчете конструкций необходимо учитывать особенности сопротивления растяжению и сжатию пластичных и хрупких материалов.

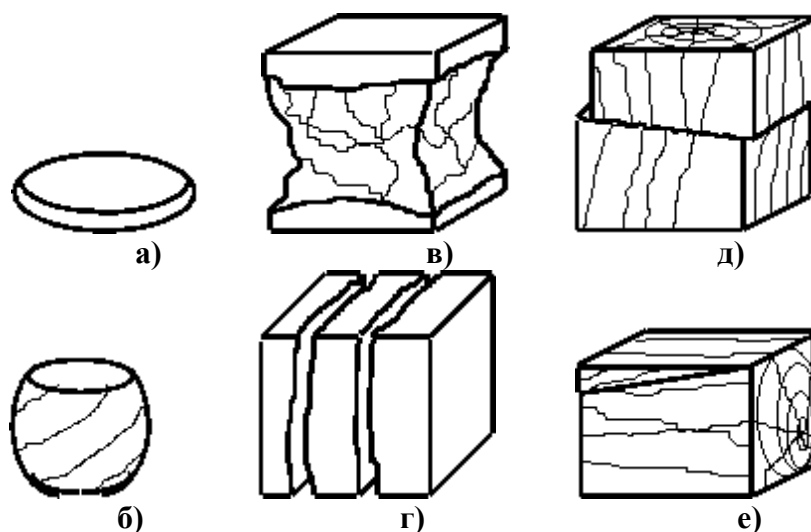


Рис.1.31. Характер разрушения различных материалов при сжатии
а - медь; б - чугун; в, г - бетон без и со смазкой торцов;
д, е - дерево вдоль и поперек волокон соответственно

Испытание пластмасс производится в основном на растяжение. Образцы для опытов формуются или штампуются. Только при использовании волокнистых или слоистых пластмасс они вытачиваются. Диаграммы термопластов, получающих в процессе формования обратимые свойства, напоминают диаграммы пластичных материалов. Диаграммы реактопластов, при отверждении получивших необратимые свойства, ближе к диаграммам хрупких материалов. Реактопласты обладают более высокой прочностью и жесткостью. Свойства пластмасс в значительной степени зависят от наполнителей.

На практике часто возникает необходимость оценить механические свойства не материала, а готовой детали. При изготовлении детали свойства материала могут значительно измениться, например, после термообработки. Так как вырезать из детали образец для испытаний, как правило, невозможно, используют косвенный способ оценки предела прочности материала детали по его твердости.

Под *твердостью* материала понимают его способность оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твердого тела – индентора. Метод испытания на твердость относится к неразрушающим методам контроля материала. Для целого ряда материалов установлена корреляционная связь твердости с прочностью, поэтому на практике для определения предела прочности пользуются определением числа твердости, что в ряде случаев имеет свои преимущества. Они могут быть использованы вне лаборатории. Просто, легко и быстро, без повреждения детали (конструкции), даже с многократной по-

вторностью можно определить твердость, а по ней прочность. И хотя характеристики твердости не используются непосредственно при расчете конструкций, они нашли широкое применение для оценки свойств материала.

Для определения твердости металлов используют несколько способов испытания. Наибольшее применение получили методы определения твердости по Бринеллю (HB), Роквеллу (HR) и Виккерсу (HV). Во всех случаях о величине твердости судят по величине полученного отпечатка. Различие заключается в виде используемого индентора и уровня прикладываемой к нему нагрузки. Выбор метода часто определяется твердостью испытываемого материала. В испытаниях по Бринеллю в поверхность испытываемой детали вдавливается стальной шарик. Число твердости HB равно отношению силы вдавливания шарика P к площади поверхности полученного отпечатка (рис.1.32). При определении твердости стали используется закаленный шарик диаметром $D=10$ мм при силе $P=30$ кН.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

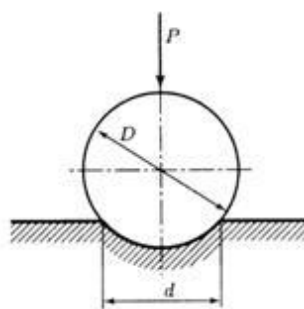


Рис.1.32

Метод Бринелля применяется для металлов и сплавов, твердость которых не превышает 450 единиц. При большей твердости испытываемого материала наблюдается деформация индентора (шарика), что приводит к искажению получаемых результатов. Для сталей существует связь между числом твердости и временным сопротивлением, выражаемая следующим образом:

$$\sigma_B \approx 0,36 HB$$

Аналогичная пропорциональная связь существует и для цветных металлов.

По методу Роквелла в поверхность исследуемой детали вдавливаются алмазный конус с углом при вершине 120° или стальной шарик диаметром 1,588 мм ($1/16''$). При нагрузках 60 и 150 кгс в качестве индентора используется алмазный конус, и определяемая твердость обозначается соответственно HRA и HRC . При нагрузке 100 кгс в качестве индентора используется стальной шарик. Определяемая при этом твердость обозначается HRB . Выбор индентора и нагрузки связан в основном с твердостью испытываемого материала. Мерой твердости является глубина проникновения индентора, которая выражается в условных отвлеченных единицах.

В испытаниях по Виккерсу производится вдавливание в испытываемый объект алмазного наконечника, имеющего форму квадратной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° . Число твердости по Виккерсу определяется делением нагрузки P в кгс на площадь боковой поверхности получившегося пирамидального отпечатка A в $мм^2$. Применяются нагрузки 5, 10, 20, 30, 50 и 100 кгс. Нагрузка выбирается в зависимости от толщины и твердости испытываемого материала. С помощью оптической системы с большой точностью измеряется диагональ отпечатка d . Далее по таблицам находят число твердо-

сти или подсчитывают по формуле $HB = \frac{P}{A} = \frac{1,8544P}{d^2}$. Для этого метода, отличающегося

высокой точностью измерения диагонали отпечатка, очень важна чистота поверхности образца, которая должна быть достаточно высокой. Важную роль играет также время выдержки под нагрузкой. При обозначении числа твердости по Виккерсу обязательно указывается время выдержки, например, $540HV_{20/30}$ обозначает число твердости 540, полученной при нагрузке 20 кгс, действующей в течение 30 сек.

Определение твердости по Виккерсу является более совершенным, чем определение ее методами Бринелля и Роквелла. К числу основных преимуществ указанного метода следует отнести: полное геометрическое подобие отпечатков в зависимости от прилагаемой нагрузки, т.е. независимость измеренной твердости от величины используемой нагрузки при испытании; возможность определения твердости на азотированных, цементированных поверхностях, а также на тонких листовых материалах; хорошее совпадение значений твердости по Виккерсу и Бринеллю в пределах 100-450 единиц.

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 15. Ускоренные испытания машин их узлов и систем.

Универсальные испытательные машины применяют также для усталостных испытаний наряду со специальными усталостными машинами. Обычно для малых нагрузок (до 10 т) используют электрическое нагружение шариковинтовой парой. Наибольшее распространение получили гидравлические УИМ с сервоуправлением. Схема, приведенная на рисунке 1.33, дает представление о принципах управления испытаниями с обратной связью по силе, перемещению или деформации. Измерительные усилители передают от тензодинамометра, индуктивного датчика перемещений или тензоэкстензометра сигнал в селектор обратной связи (универсальный усилитель-регулятор), в котором сравниваются заданные значения силы, перемещения или деформации с фактическими, полученными от первичных преобразователей. Разность аналогового сигнала усиливается, и рассогласующая величина подается на сервоклапан управления – распределитель гидроцилиндра для отслеживания поправки. Заданные значения передает на селектор генератор функций и задатчик. В качестве универсального программирующего устройства применяют микро- и миниЭВМ. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи имеют несколько выходов и входов в интерфейс (устройство связи с ЭВМ). С измерительных усилителей информация о параметрах также подается на устройства регистрации и считывания. При работе с ЭВМ используются печатающий терминал и другие устройства.

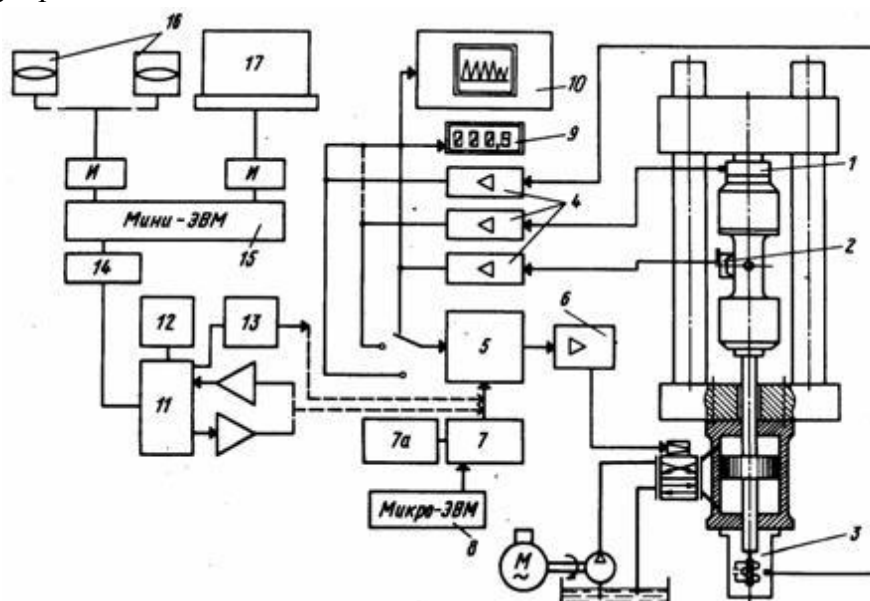


Рис. 1.33. Блок-схема сервогидравлической УИМ: 1 – тензодинамометр; 2 – экстензометр; 3 – датчик перемещений; 4 – измерительные усилители; 5 – селектор обратной связи; 6 – усилитель; 7 – задатчик формы цикла; 7а – генератор функции; 8 – программатор; 9 – цифровой индикатор; 10 – осциллограф или графопостроитель; 11 – интерфейс с АЦП и ЦАП; 12 – программирующие часы; 13 – сегмент-генератор; 14 – интерфейс связи; 15 – ЭВМ (процессор); 16 – внешняя память с управлением; 17 – печатающий терминал

Стенды для статических испытаний внутренним давлением проектируют, основываясь на пневматическом или гидравлическом принципах. Для кратковременных испытаний давление подают из баллонов со сжатым воздухом через ресивер. Системы могут быть снабжены сервоклапаном и программным устройством (рис. 5.2). Для длительных испытаний, например повторно-статических, используют пневмосистемы с компрессорами. В качестве датчика обратной связи и регистратора процесса применяют электроконтактные манометры, индуктивные датчики давления, тензорезисторные манометры. При проведении усталостных испытаний трубопроводов, патрубков, баков и других элементов топливных, гидравлических и пневматических систем машин используют, как правило, стенды с гидравлическим нагружением пульсирующим давлением и электронным задатчиком сигналов с изменяемой частотой и формой цикла.

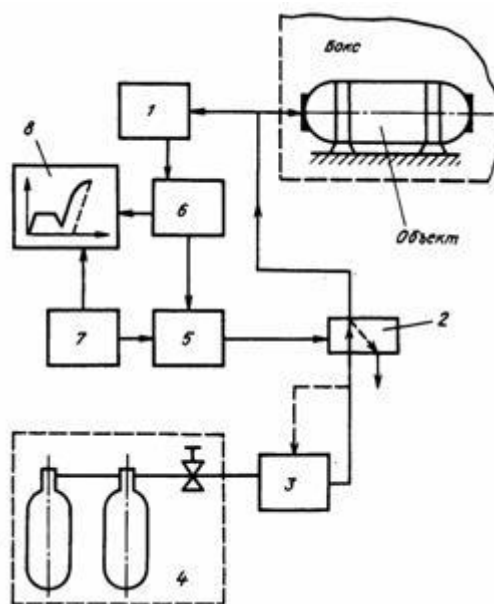


Рис. 1.34. Схема пневматического нагружения давлением с обратной связью: 1 – датчик давления; 2 – пневмосервоклапан; 3 – регулятор давления; 4 – система баллонов и компрессор; 5 – блок сервоуправления; 6 – усилитель; 7 – программатор; 8 – устройство записи процесса

В зависимости от целей и объектов испытаний, а также рабочей частоты процесса усталостные машины с программным нагружением строят с электромеханическим и резонансным возбуждением; на них осуществляют блочные, бигармонические и стационарные случайные спектры нагружения.

Схема устройства (рис. 1.35), успешно работающего непрерывно более 5 лет при испытании сложных сварных патрубков, содержит задатчик сигналов с плавно регулируемой частотой 0,1–20 Гц и счетчиком циклов, маслонасосную станцию. Четыре гидроклапана с электрическим управлением подают давление в полость патрубка попарно, навстречу друг другу от сигналов задатчика, отрегулированных по времени (частоте). Развертку цикла и давление контролируют на осциллографе по сигналу индуктивного датчика давления и стандартной усиливающей аппаратуры. Частота испытаний зависит от суммарного объема рабочей жидкости в полостях образцов, мощности маслонасосной станции (МНС) и диаметра проходных сечений гидропроводов и кранов.

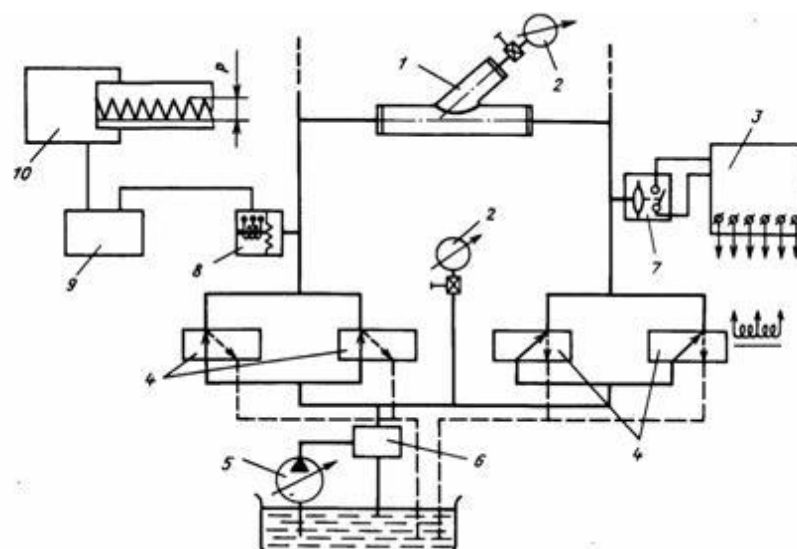


Рис. 1.35. Схема испытания пульсирующим давлением тонкостенных патрубков: 1 – объект испытания; 2 – манометры; 3 – задатчик сигналов на катушки гидроклапанов; 4 – гидроклапаны; 5 – гидронасос; 6 – клапан сброса давления; 7 – сигнализатор давления; 8 – датчик давления индукционного типа; 9 – усилитель; 10 – осциллограф

Лекция 16. Лабораторные и стендовые исследования и испытания машин их узлов и систем.

Стенды для испытания больших объектов при статическом и усталостном нагружении проектируют в виде замкнутых пространственных рам, связанных с силовым полом и потолком лаборатории, широко применяют также порталные системы для испытания, например, самолетов, которые устанавливают не только в залах лабораторий, но и на открытых площадках. Нагружение распределенными и сосредоточенными силами осуществляют с помощью гидроцилиндров и рычажных систем, крепление которых к объекту выполняют ложементами и тросами. В области распределенных нагрузок на поверхность приклеивают систему брезентовых лямок, каждая из которых может передать нагрузку до 1,5 кН. Одним из требований к системе испытаний является возможность приложения знакопеременных нагрузок.

Управление многоканальными системами нагружения осуществляют с помощью электронных и сервогидравлических устройств с использованием управляющей миниЭВМ. Схема типичной многоканальной системы нагружения на 20 каналов показана на рисунке 1.36.

При создании новых устройств для испытательной техники необходим анализ существующих систем и элементов, которые должны быть приняты как прототипы. Рассмотрим один характерный объект универсальной испытательной системы (машины) – тензодинамометр. Стержневые, цилиндрические и кольцевые (изгиб в плоскости) упругие элементы не обладают одинаковыми упругими характеристиками на растяжение и сжатие. Для кольца, нагруженного в плоскости, вследствие геометрической изменяемости, различие деформаций при растяжении и сжатии особенно заметно. Естественно, для деформаций одного знака эти элементы могут быть применены.

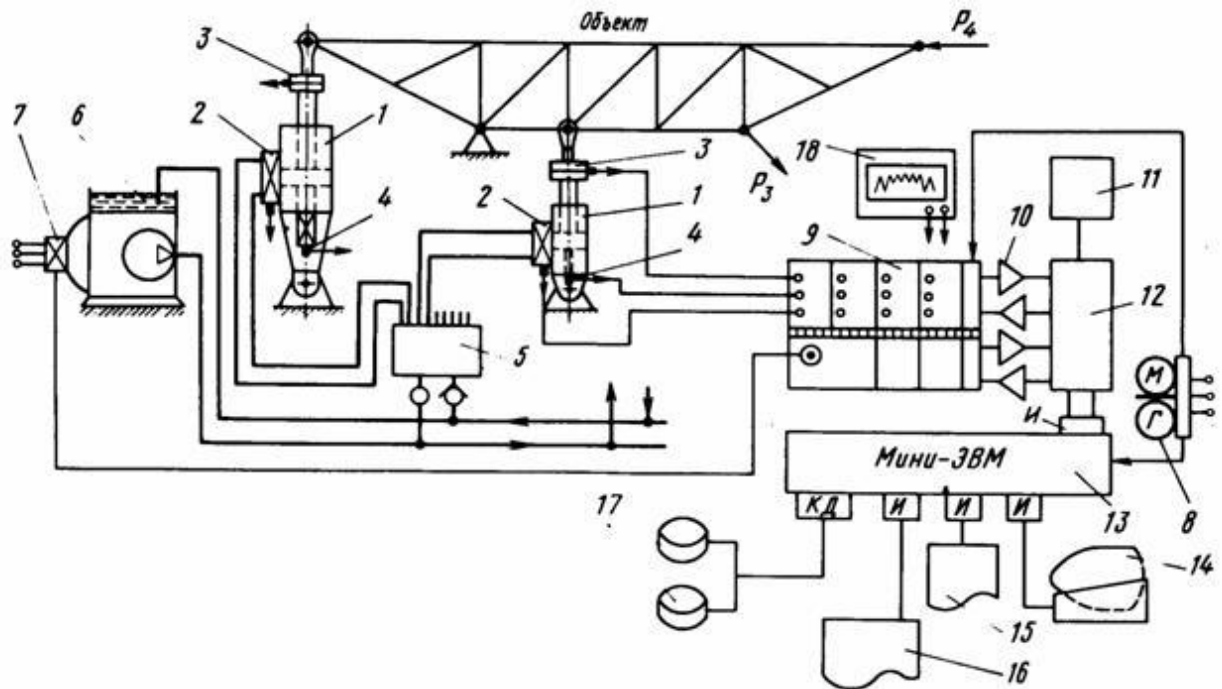


Рис. 1.36. Блок-схема многоканальной системы сервогидравлического нагружения с управлением от миниЭВМ: 1 – гидроцилиндры; 2 – сервоклапаны;

- 3 – тензодинамометры; 4 – датчики перемещений; 5 – гидроблок-распределитель с фланцами; 6 – гидроагрегат; 7 – пусковое устройство;
 8 – мотор-генератор питания электронных устройств; 9 – модульная система аналоговых усилителей; 10 – АЦП и ЦАП; 11 – программируемые часы;
 12 – устройство связи с ЭВМ; 13 – миниЭВМ; 14–16 – устройства быстрой печати; 17 – внешняя память; 18 – осциллограф

Фирма Шенк (ФРГ) запатентовала форму профиля жесткого кольца, нагруженного кручением (рис. 1.37), где на торцах размещены напыляемые тензорезисторы, собираемые в схему полного моста. Эти ТД практически не изменяют характеристики при растяжении и сжатии, имеют собственную частоту 2,5–7,0 кГц.

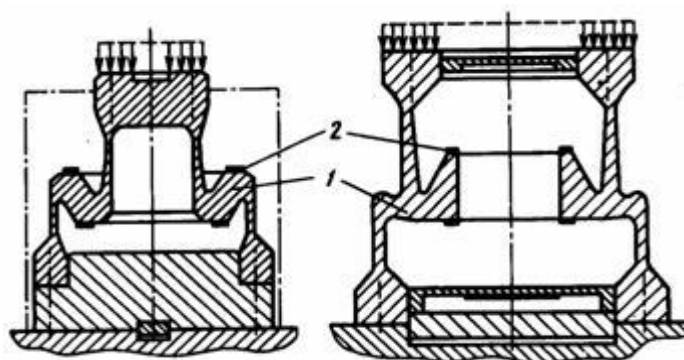


Рис. 1.37. Тензодинамометры системы Шенк: 1 – упругий элемент «профилированное кольцо при кручении»; 2 – тензорезистор

Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

Лекция 15 Экспериментальное определение производительности различных типов машин.

Методы механики разрушения и неразрушающие методы контроля

Развитие механики разрушения явилось результатом постановки и анализа тонких экспериментов на образцах и конструкциях с трещинами. Прочность конструкции с трещинами существенным образом зависит от длины трещины, свойств материала, размеров и формы детали, исходного НДС, скорости деформации, среды и т.д. Материалы в разной степени обладают свойством трещиностойкости или вязкости разрушения, но объективные критерии оценки трещиностойкости были изучены и приняты только после отработки методики определения критических коэффициентов интенсивности напряжений K_{IC} и K_{Ic} , а для пластичных материалов – критических значений длины трещины и J-интеграла.

Одним из направлений в механике разрушения явилось развитие экспериментальных методов для нахождения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) с применением фотоупругости, метода каустик и интерферометрии. Получила развитие техника измерения скорости роста трещин усталости (СРТУ) и определения критической длины трещины a_k при циклическом нагружении. Изучение закономерностей СРТУ привело к обобщенной диаграмме усталостного разрушения (уравнению Париса) и к методике нахождения ее коэффициентов, на основании которых можно сравнивать свойства материалов с высокой достоверностью и полнотой. Развитие концепции о «критической длине трещин» или заложенном в конструкции дефекте определенного размера означало, что возможна безопасная эксплуатация машины или конструкции с трещинами, если трещины найдены и за их ростом до определенного размера можно наблюдать. Эта концепция привела к созданию целой отрасли приборостроения – технических средств неразрушающих методов контроля (НМК).

С появлением растрового электронного микроскопа, позволяющего вести высококачественное наблюдение и фотографирование структур изломов с разрешением до $\times 10000$, фрактография стала мощным средством выявления структурных дефектов, динамики возникновения и развития микротрещин усталости, бороздок, зон долома и пластических деформаций. Анализ эксплуатационных повреждений и сложных разрушений при эксперименте стал научно обоснован и документален, а появление альбомов по фрактографии различных металлов и сплавов облегчило идентификацию изломов.

Методы обнаружения усталостных трещин

Интенсивная эксплуатация машин потребовала объективных средств контроля изделий, обеспечивающих надежное обнаружение трещины, простоту и портативность в применении, универсальность различных типов приборов и методов. Требования повышения качества традиционных материалов и сплавов, а также значительное развитие новых видов неметаллических композиционных материалов и полуфабрикатов определили создание методов и средств дефектоскопии применительно к современной технологии и производству новой продукции. Неразрушающие методы контроля (НМК) используют при обнаружении трещин и дефектов при технологическом и эксплуатационном контроле сварных, клеевых, болтовых и других соединений, конструкций и изделий, широко применяемых в судостроении, строительстве, авиастроении, энергетике, нефтегазовых трубопроводных системах и т.д.

Методы обнаружения трещин классифицируют по физическому принципу взаимодействия искателя с изделием. Их выбор, эффективность и область применения зависят от при-

роды материала, геометрии изделия, места возникновения трещины, условий ее зарождения и роста, наличия коррозии, фреттинга и т.д.

Различают методы визуально-оптические, капиллярные, магнитные (электромагнитные), вихревых токов, радиационные (радиографический, радиоскопический, радиометрический), ультразвуковые, акустической эмиссии, импедансный (вибрационный, звуковой), СВЧ-методы, интерферометрические (голографические) и инфракрасные (тепловизионные).

Визуально-оптическим методом начинают, как правило, поиск и обнаружение трещин, если на это есть основания и имеется возможность приложить к детали нагрузку, чтобы раскрыть трещину. Кроме простейших оптических приборов типа лупы и микроскопа, применяют бороскопы с местным подсвечиванием, эндоскопы с фотоприставками и гибкими световодами, которые значительно упрощают осмотры зон предполагаемых трещин в труднодоступных местах.

Капиллярный метод применяют для обнаружения поверхностных трещин в металлических и неметаллических изделиях. Он основан на искусственном повышении контрастности зоны трещины или дефектов относительно неповрежденной области до такой степени, что трещина может наблюдаться невооруженным глазом. Это достигается заполнением трещин и других дефектных полостей на поверхности детали цветоконтрастными веществами вследствие капиллярных свойств малых дефектов. Применение люминофоров и красителей в сочетании со специальным освещением, например ультрафиолетовым, позволяет выявить поверхностный дефект по яркому свечению люминесцирующего раствора.

Магнитный порошковый метод применяют для обнаружения трещин и других дефектов на поверхности или вблизи ее в деталях из ферромагнитных материалов любой формы, независимо от вида термообработки. Метод основан на выявлении искажения магнитного поля около трещины или подповерхностного дефекта с помощью мелкодисперсных ферромагнитных частиц, выполняющих роль индикаторов. Эти частицы под действием магнитных сил перемещаются в места наибольшей концентрации силовых линий – к зонам дефекта – и образуют контрастные накопления в виде линий или пятен. Намагничивание деталей проводят при определенном направлении магнитного потока, создаваемого полюсными электромагнитами, или пропусканием электрического тока через деталь. Направление силовых линий в детали выбирают перпендикулярным ожидаемому направлению трещин. Порошок или суспензию в зависимости от магнитных свойств материалов наносят в присутствии намагничивающего поля (магнитомягкие материалы) или в условиях остаточной намагниченности (магнитотвердые материалы). Магнитный контроль трещин широко применяют в машиностроении и двигателестроении для контроля стальных деталей после финишных технологических операций и термообработки.

Метод вихревых токов (электромагнитный метод) применяют для контроля электропроводящих материалов, заготовок и деталей на различных этапах производства и эксплуатации. Им обнаруживают поверхностные и подповерхностные трещины и дефекты, локальные коррозионные поражения (межкристаллитную коррозию), особенности структуры после термообработки. Измерением проводимости определяют зону, поврежденную огнем, или область коррозионных повреждений, а также осуществляют разбраковку материалов по маркам. С помощью вихретоковых дефектоскопов измеряют толщину листов, стенок, различных защитных покрытий, остаточных толщин после химического фрезерования и коррозии. Новые разработки по вихретоковому методу привели к созданию приборов для контроля многослойных неразъемных конструкций. Метод основан на индукционном возбуждении вихревых токов в электропроводящем материале объекта и регистрации изменений электромагнитного поля этих токов в связи с трещиной или дефектом в поверхностном слое детали. Источником и приемником электромагнитных колебаний является одна или несколько катушек индуктивности.

Радиационные методы обнаружения трещин и дефектов, а также нарушений внутренней конфигурации и взаимного расположения деталей, не доступных для осмотра при изго-

товлении, сборке, ремонте и эксплуатации, применяются для контроля слитков и отливок, сварных соединений, паяных и клепаных соединений, железобетонных изделий, неразъемных деталей самолетов, агрегатов и узлов конструкций.

ГОСТ 20426-82 на радиационные методы классифицирует их по принципу регистрации и наблюдения дефектов, а не по принципу жесткости излучения: радиографический (рентгеновское, гамма- и бета-излучение); электрорадиографический (рентгеновский); радиоскопический (рентгеновский, бетатронный); радиометрический (применение рентгеновских аппаратов, радиоактивных источников, бетатронов).

Радиационные методы выявляют подповерхностные и внутренние трещины и дефекты в деталях из любых материалов на основе ослабления или усиления ионизирующего излучения, вызванного дефектом и зафиксированного преобразователями излучений: радиографической пленкой, фотобумагой, электрорадиографической пластиной, флуороскопическим экраном, сцинтилляционным монокристаллом с электронно-оптическим преобразователем, рентгенотелевизионной установкой с рентгеновидиком, с помощью ксерографии.

Акустические ультразвуковые (УЗ) методы и их разновидности эффективно применяют для обнаружения, измерения и определения координат трещин и дефектов. На их основе созданы и серийно выпускаются УЗ-дефектоскопы, интроскопы, полуавтоматические системы массового контроля. В УЗ-дефектоскопах используют методы, различающиеся по принципу действия и устройству приборов, а также по характеру измеряемых величин и мест расположения искателей (пьезодатчиков).

Теневой метод (метод сквозного прозвучивания, метод звуковой тени впервые был предложен в 1928 г. С.Я. Соколовым). Излучатель и приемник размещают по разным сторонам изделия. Трещина или другой дефект, находясь на пути ультразвуковой волны, ослабляют ее энергию (поглощают или рассеивают), что регистрируется приемником и определяется индикатором.

Импульсный эхо-метод. Излучатель генерирует короткий ультразвуковой импульс, который отражается от дефекта, поверхности и «дна» изделия. Часть лучей возвращается на искатель, который теперь работает в режиме приемника. Поскольку «донные» отраженные сигналы поступают на искатель позднее, чем сигналы от дефектов, их различают на индикаторе. По амплитуде эхо-сигналов судят о величине трещины (дефекта), а по времени от момента излучения импульса до момента приема эхо-сигнала определяют расстояние до обнаруженной трещины. Этот метод широко применяют практически для любых материалов и конструкций, выявляя трещины и другие несплошности в сварных соединениях, трубах, сосудах, паяных и клееных соединениях, при контроле сотовых конструкций и композиционных материалов. Конструкция искателей определяется формой изделия, направлением прозвучивания и способом контакта с поверхностью. Обычно для надежного контакта с целью обеспечения приема – передачи ультразвука без значительных потерь в контактную щель, соизмеримую с длиной УЗ-волны, вводят иммерсию – минеральные масла, глицерин или воду. В некоторых случаях зазор увеличивают для обеспечения иммерсии при непрерывном истечении струи под движущийся искатель. Некоторые схемы прозвучивания и виды искателей показаны на рисунках 1.60 и 1.61.

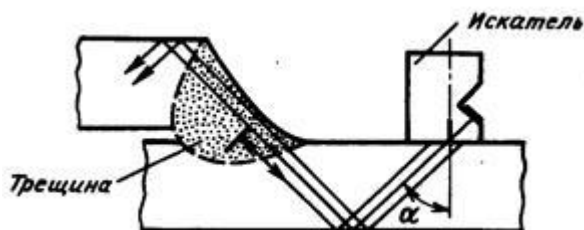


Рис. 1.60. Схема УЗ-контроля сварного соединения внахлестку с трещиной в шве

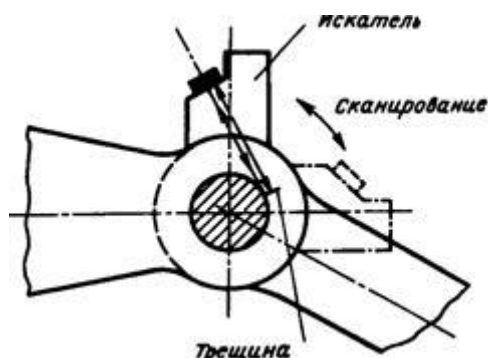


Рис. 1.61. Схема УЗ-контроля проушины шарнирного узла со специальными насадками для искателя и наклонной осью луча

Метод акустической эмиссии (АЭ). Процесс микротрещино-образования в деталях машин непосредственно связан с технологией производства материала и деталей, с режимами и условиями эксплуатации изделий. Излучение волн напряжений, обусловленное возникновением и развитием микродефектов (микротрещин) в материале, независимо от причины их появления (усталость, текучесть, термообработка, НДС, старение, вибровоздействие и т.д.), может быть обнаружено и зарегистрировано с высокой точностью современной акустической аппаратурой. Поэтому еще в начале 50-х годов началось интенсивное изучение «деформационных шумов». Физические причины возникновения упругих волн в структуре твердых тел связаны с поликристаллическим строением металлов и сплавов, их фазовым составом, а в неметаллических материалах – неидеальными связями между элементами многомерных структур и внутренним трением.

Экспериментально исследованы некоторые источники АЭ в твердых телах. Показано, что упругие волны напряжений возникают при движении скопления дислокации, двойниковании в кристаллах, фазовых превращениях в металлах и сплавах, образовании усталостных микротрещин, сопровождающемся эффектом динамической разгрузки материала в вершине трещины, пульсациями скоростей трещины и ее ветвления. Одновременно возникающие пластические деформации в вершине связаны со скольжением и двойникованием в кристаллах; кроме того трение поверхностей без смазочного материала, когда «слипание» по вершинам микронеровностей приводит к местным пластическим деформациям также регистрируется, как сигналы АЭ.

Начало трещинообразования связано с сигналами АЭ различной интенсивности и амплитуды. Поэтому для решения задачи обнаружения момента зарождения микротрещины проводится селекция сигналов АЭ по амплитудным, временным и спектральным параметрам. Во всех случаях нужны калибровка датчиков и аппаратуры и определение пороговых значений сигналов, на которые настраиваются приборы оповещения.

Определение местоположения вершины трещины по сигналам АЭ осуществляют на основе четырех пространственно разнесенных на объекте датчиков – пьезопреобразователей, осуществляющих локацию по измерению времени задержки между моментами поступления сигнала в соответствующие каналы приема и регистрации.

При циклическом нагружении конструкций толкование сигналов АЭ значительно усложняется вследствие шумовых помех, вызванных самой испытательной техникой, и физических особенностей. «Эффект Кайзера», заключается в невозпроизводимости сигналов АЭ при повторном нагружении до уровня напряжений первого нагружения, значительно снижается уровень сигналов АЭ, которые становятся близки по амплитудам к внешним помехам.

Несмотря на недостатки метода АЭ, заключающиеся в сложности аппаратуры и анализа результатов, в привлечении к работам высококвалифицированного персонала, в необходимости подавления активных помех, требующих ряда дополнительных мероприятий, методу АЭ присущ ряд уникальных свойств: высокая чувствительность определения сигналов АЭ; возможность следить только за активным развивающимся дефектом, представ-

ляющим опасность для конструкции; использование неподвижных (без сканирования) датчиков, устанавливаемых на значительных расстояниях от трещины; универсальность в применении к твердым телам при возникновении в них упругих колебаний.

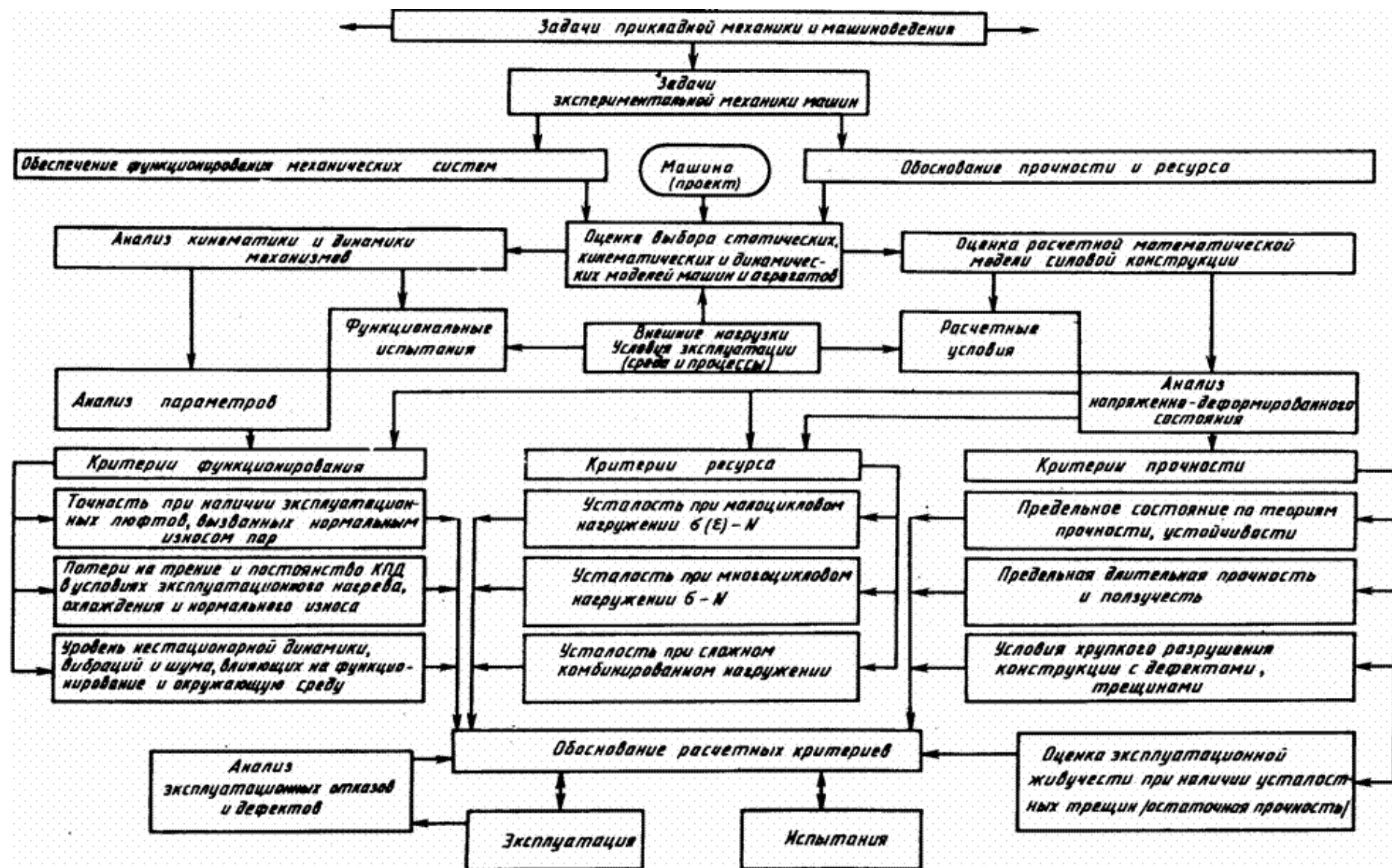


Рис. 1.1. Схема решения основных задач экспериментальной механики машин

Исходным этапом для проектирования силовых конструкций и механизмов является получение следующих данных: 1) о функциональном назначении, режимах, технико-экономических параметрах машины, рассматриваемых при составлении технического задания (ТЗ); 2) о внешних нагрузках и условиях эксплуатации, позволяющих сформулировать расчетные условия для проектирования; 3) о конструктивных схемах, расчетных статических, кинематических и динамических моделях конструкций и механизмов, их математическое описание; 4) о предположительном комплексе расчетных критериев прочности, ресурса и функционирования, относящихся к рассматриваемому классу машин и условиям эксплуатации; 5) о возможном наборе конструкционных материалов, полуфабрикатов, технологий деталей и типах соединений.

Перечисленные сведения и данные получают на стадии прогнозирования и в начале разработки проекта на этапах технического задания, технического предложения и аванпроекта (эскизного проекта) и затем уточняют на всех последующих этапах создания и эксплуатации машины.

В создании современных машин важнейшими, длительными и трудоемкими стадиями разработки являются первые этапы, включающие этап рабочего (технического) проектирования.

На этапе технического проектирования и постройки опытных экземпляров машины изменяется содержание экспериментальных исследований. Завершается опережающая разработка принципиально новых узлов, соединений, деталей, проводятся сравнительные испытания их с целью получения ожидаемых лучших характеристик по прочности, долговечности, изнашиванию и т.д. и сопоставление с данными известных технических решений. Испытания натурных и полунатурных элементов конструкции, узлов и агрегатов планируют и выполняют, как правило, в период, когда опытная машина комплектуется системами и оборудованием.

Подготовка серийного производства связана с доработками конструкции, принятыми в результате стендовых и натурных испытаний, и введением изменений в серийную документацию. Первые серийные машины, предназначенные для ведомственных или государственных испытаний и последующей эксплуатации, отличаются от первого опытного экземпляра, поэтому требуются испытания серийных натурных агрегатов и узлов.

На этапе эксплуатации парка машин проводят расчетные и экспериментальные работы по анализу дефектов и отказов с принятием обоснованных решений; по сравнению программного эквивалента и действительного расходования ресурса; темпов эксплуатационного изнашивания, появления предельных люфтов, потери кинематической точности механизмов; по возможному продлению ресурса изделия, проведению регламентных работ, осмотров, дефектации; а также исследование возможной модернизации машины или проектов создания модификаций.

**Методические рекомендации по подготовке реферата по дисциплине
«Исследования и испытания наземных транспортно-технологических
машин»**

В содержание реферата обязательно входит:

- краткая аннотация на русском языке (до 0,5 страницы),
- введение, где указываются актуальность, цель, задачи и методологическая база их решения в реферате, объект, предмет и методы исследования, научная новизна, практическая ценность, возможность апробации на предстоящих конференциях (до 2 страниц),
- первая глава. Она может быть представлена как теоретическая часть, в которой подробно описываются используемые методы научных исследований по выбранной теме с обязательным указанием источников научной информации,
- вторая глава. Может быть представлена как практическая часть, где приводятся обработанная информация в удобном для восприятия виде с расчетами, таблицами, графиками и рисунками, проект решений и рекомендация мероприятий, влияющих на повышение эффективности коммерческой деятельности,
- заключение по реферату, в которое обязательно входят выводы по практической значимости полученных результатов и их ценности в дальнейшем совершенствовании коммерческой деятельности предприятий и предпринимателей,
- список использованных источников, содержащий не менее 10 наименований по стандартным правилам
- приложение, которое оформляется в реферате при необходимости помещения дополнительного, вспомогательного демонстрационного материала, который загромождает текст, с целью более полного раскрытия содержания темы научного исследования при курсовом проектировании.

Общий объем реферата должен составлять примерно 20–25 машинописных страниц, формат листа – А-4 (210 × 297), набранных 14 шрифтом «Times New

Roman» через один интервал с полями сверху и снизу по 25 мм, справа 15 мм и слева 30 мм, выравнивание текста осуществляется по краям. К реферату готовится презентация, содержащая 7-10 слайдов. Общий объем защиты реферата не должен превышать 7 минут.

Выполненная магистрантами реферата регистрируется на кафедре, проверяется в срок до 10 дней преподавателем-руководителем работы.

При оценке реферата учитываются содержание работы, его актуальность, научная и практическая значимость, степень самостоятельности, оригинальность выводов и предложений, качество используемого материала, а также уровень грамотности (общий и специальный по дисциплине). Одновременно рецензент отмечает его положительные стороны и недостатки, а в случае необходимости обязательно указывает конкретно, что надлежит доработать.

Реферат защищается перед преподавателями на очередном заседании кафедры, которые определяют уровень теоретических знаний и практических навыков магистранта, соответствие работы предъявляемым к ней требованиям.

При защите реферата магистрантам необходимо грамотно показать знания терминологии, теоретических положений и практических методов основ научных исследований, основных процедур проведения научных работ, направления использования достигнутых результатов в материалах реферата.

При постановке зачета учитываются уровни самостоятельности, творческой активности и оригинальности при выполнении магистрантами реферата в плановые сроки, а также выступления на конференциях и подготовка к публикации тезисов доклада.

Тематика рефератов.

- «Измерение количественных физических величин (*прямые и косвенные*) при проведении исследований и испытаний наземных транспортно-технологических машин».
- «Учет погрешностей (*случайных, модельных, приборных и др.*) при проведении исследований и испытаний наземных транспортно-технологических машин».
- «Приемы статистической обработки экспериментальных данных (*метод наименьших квадратов и др.*) при проведении исследований и испытаний наземных транспортно-технологических машин».
- «Анализ результатов (*проверка справедливости гипотез*) исследований и испытаний наземных транспортно-технологических машин с помощью математической статистики».
- «Планирование и проведение эксперимента (*необходимое число измерений, требования к лабораторному журналу и научному отчету*) при исследованиях и испытаниях наземных транспортно-технологических машин».
- «Порядок и методика проведения испытаний наземных транспортно-технологических машин (*на примере грузоподъемных*

Виды изнашивания деталей и узлов машин. Показатели технического состояния деталей, узлов и агрегатов машин.

Практическое занятие 1.

Согласно ГОСТ 27674-88 установлены следующие виды и разновидности изнашивания деталей машин: механическое, происходящее в результате механических воздействий; коррозионно-механическое, происходящее при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой; окислительное; при фреттинг-коррозии; электроэрозионное. В данной классификации изнашивание представлено следующим образом:

- *абразивное* – механическое воздействие частицами и продуктами износа, попавшими извне на поверхности трения;
- *гидро- и газо-абразивное* – изнашивание в результате действия твердых частиц, увлекаемых потоками жидкости или газа;
- *усталостное* – следствие циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей;
- *адгезионное* – изнашивание, связанное с интенсивным молекулярным взаимодействием, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом;
- *окислительное* – разрушения пленок окислов, образовавшихся при взаимодействии кислорода воздуха с материалами трущихся поверхностей;
- *фреттинг-коррозия* – многостадийный процесс изнашивания, протекающий при незначительных колебательных перемещениях контактирующих поверхностей в результате вибраций или пластических деформаций элементов конструкции. На участках, подверженных фреттинг-коррозии, протекают процессы схватывания, абразивное разрушение, усталостно-коррозийные явления. На первой стадии происходит пластическая деформация микровыступов, схватывание ювенальных участков металла и разрушение окисных пленок. На второй стадии (инкубационной) развиваются коррозионно-усталостные процессы, и формируется коррозионно-активная среда вследствие адсорбции на окислах влаги и кислорода. Износ связан с образованием и удалением из зоны контакта окисных пле-

нок. Третья стадия характеризуется высокой интенсивностью изнашивания путем разрушения разрыхленных усталостными и коррозионными процессами слоев металла. Эта стадия недопустима при эксплуатации.

Эрозионное и кавитационное изнашивания отнесены к процессам разъедания.

Разрушение материала детали может произойти как в результате возникновения недопустимых статических или динамических нагрузок, так и при длительном действии переменных нагрузок, приводящих к усталостным разрушениям. В первом случае имеют место внезапные отказы, не связанные с длительностью предшествующей эксплуатации детали, а усталостные разрушения относятся к постепенным отказам, так как время предшествующей эксплуатации (число циклов нагружения) уменьшает несущую способность материала, что влияет на вероятность отказа.

Процесс усталостного разрушения рассматривается как три последовательные стадии:

- накопление в металле упругих искажений кристаллической решётки от действия циклических напряжений;
- после определённого числа циклов нагружений упругие искажения кристаллической решётки достигают критической величины и появляются субмикроскопические трещины;
- субмикроскопические трещины развиваются до размеров микротрещин и происходит окончательное разрушение испытуемого образца.

Согласно обобщенной диаграмме усталости (рис.2.2), где ABC – кривая выносливости (кривая Велера), при напряжениях ниже длительного предела выносливости σ_w микротрещины не развиваются. $A'B'C'$ – линия начала появления субмикроскопических трещин и $A'C$ – линия начала образования микротрещин или линия необратимой повреждаемости (линия Френча). При критическом напряжении усталости $\sigma_k > \sigma_w$ разрушение происходит через N_k циклов (приближенное число циклов). Если предположить, что наличие в

образце трещины определённого размера характеризует некоторую степень повреждения, то на диаграмме можно нанести ещё ряд линий, определяющих достижение усталостной трещиной заданной длины. Усталостное разрушение материала не обязательно приводит к поломке детали. Возможно возникновение усталостных трещин,

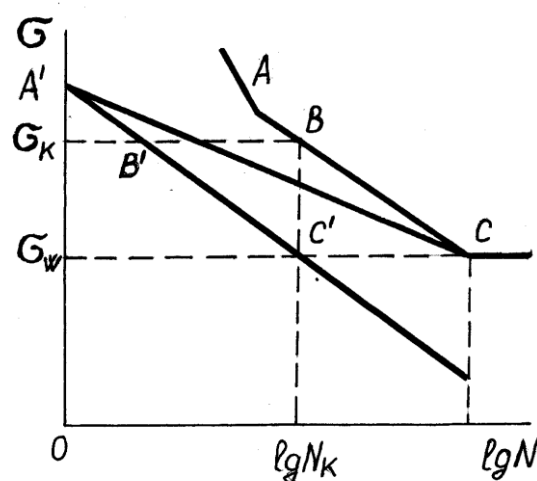


Рис.2.2. Обобщенная диаграмма усталости (по В.С. Ивановой)

которые до определенных размеров незначительно снижают работоспособность объекта, но опасность представляет их быстрый рост. Современные методы расчета позволяют в ряде случаев оценить скорость развития трещин и, следовательно, указать период времени, в течение которого они будут находиться в допустимых пределах.

Методики испытания узлов, систем и машин. Выбор параметров испытаний.

МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В результате использования метода статистических испытаний разработан алгоритм и получены результаты исследования при следующих исходных показателях процесса изменения параметров элементов:

1. Функция изменения параметра:

$$u_{ij} = v_{cj} \left(\sum t_{ij} \right)^\alpha + z_{ij} + u_1, \quad (3.2)$$

где t_{ij} – j -я межконтрольная наработка при i -й реализации;

$\left(\sum t_{ij} \right)^\alpha$ – координатная функция (приведенная наработка);

j – число межконтрольных периодов в одной реализации.

С помощью уравнения воспроизводились линейные реализации (1-й случай – $\sigma_z = 0$, $\alpha = 1$), параболические реализации (2-й случай – $\sigma_z = 0$, $\alpha \neq 1$) и реализации в виде ломаных возрастающих кривых (3-й случай – $\sigma_z \neq 0$).

2. Ресурсы элементов распределены по закону Вейбулла (коэффициент вариации ресурса $v = 0,3 \div 1$) или нормальному закону ($v < 0,33$). Их значения исчислялись в единицах межконтрольной наработки: $t^0 = t_{cp} / t_m$.

3. Межконтрольная наработка принималась либо постоянной (1-й вариант – $v_m = 0$), либо случайной величиной, распределенной по универсальному закону Вейбулла (2-й вариант – $v_m > 0$).

4. Предельное изменение параметра принималось как постоянной, так и переменной величиной с $v_n \neq 0$.

Найденные зависимости вероятности отказа $Q(D_0)$ и фактического ресурса $t_{\phi}^0(D_0)$ были аппроксимированы уравнениями

$$Q(D_0) = D_0^d; \quad (3.3)$$

$$t_{\phi}^0(D_0) = t_0 D_0^n, \quad (3.4)$$

где D_0 – допустимое изменение параметра в долях предельного;

t^0 – нормированный средний ресурс совокупности одноименных элементов в единицах t_m .

Вид уравнений был принят на основе анализа внешнего вида найденных кривых и их построения в прямоугольных координатах с неравномерными шкалами (способ спрямления). Окончательный вид уравнений был установлен с учетом того, что при $D_0 = 1$ должны выполняться условия:

$$Q(D_0=1) = 1 \quad \text{и} \quad t_\phi^0(D_0=1) = t^0.$$

Каждая точка уравнений получалась в результате 200–500 реализаций. Кривые вероятности отказа аппроксимировались только в пределах интервала, в котором $Q(D_0)$ изменяется в зависимости от D_0 , т. е. при 1-м варианте ($v_m = 0$) в установленном в результате исследования интервале $0,5^a \leq D_0 \leq 1$. При 2-м варианте ($v_m \neq 0$) нижнее значение интервала понижается при $v_m = 0,4$ до $0,25^a$. Заменяв в целевой функции (48) $Q(D)$ и $t_\phi(D)$ на аппроксимирующие выражения (4.3) и (4.4), взяв производную по D_0 , и приравняв ее нулю, получаем уравнение оптимального допустимого изменения параметра:

$$D_0^{opt} = d \sqrt{\frac{n}{(d-n)(N-1)}}, \quad (3.5)$$

где $N = A/C$

Показатели степени n и d уравнений (4.3) и (4.4) находили методом наименьших квадратов, после чего проверяли погрешность аппроксимации. Она оказалась равной в среднем 3% для $t_\phi(D_0)$ и 5% для $Q(D_0)$.

Метод статистического моделирования имеет еще одно достоинство. Он позволяет проверить результаты аналитического исследования по определению функций $Q(D)$ (4.2) и $t_\phi(D)$ (4.4). Использование этого метода дает возможность вместо проведения испытаний значительного числа элементов (деталей, сопряжений) в производственных условиях, что связано с большими материальными затратами и длительностью испытаний, осуществить физическое моделирование этих испытаний на ЭЦВМ.

В табл. 4.2 помещены результаты определения $C(D)$ двумя методами: аналитическим и статистического моделирования. Анализ данных таблицы свидетельствует о достоверности выведенных аналитически формул. Сред-

неквадратическая погрешность результатов моделирования по сравнению с аналитическим расчетом по выведенным формулам составила:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [C(D)_{ан}^i - C(D)_{мод}^i]^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,0166}{12}} = 0,031$$

или
$$\frac{\sigma}{\frac{\sum C(D)_{ан}}{n}} = \frac{100 \cdot 0,031}{1,868} = 1,66\%$$

Таблица 3.2

D_0	Значение $C(D)$ при $\nu = 0,5; t^0 = 1; N = 3$		Относительная погрешность при моделировании, %
	Аналитический расчет $C(D)_{ан}$	Моделирование $C(D)_{мод}$	
0,40	1,915	1,932	0,09
0,45	1,890	1,909	1,00
0,50	1,844	1,888	2,38
0,55	1,821	1,880	3,24
0,60	1,806	1,870	3,54
0,65	1,802	1,827	1,39
0,70	1,808	1,830	1,22
0,75	1,823	1,840	0,93
0,80	1,846	1,855	0,49
0,85	1,875	1,873	0,10
0,90	1,911	1,908	0,16
0,95	1,952	1,954	0,10
1,00	2,000	2,000	0,00

$$\frac{\sum C(D)_{\hat{a}i}}{n} = 1,868.$$

Результаты расчета обоими методами оказались практически одинаковыми. Некоторое рассеивание результатов (в среднем на 2%) объясняется вариацией средней по 200 реализациям, полученной при статистическом моделировании, а также округлением чисел.

Подготовка узлов, систем и машин к испытаниям.

Практическое занятие 4.

Целью испытания машин является проверка правильности работы и взаимодействия всех механизмов машины, проверка ее мощности, производительности и точности. Таким образом, испытание машины является проверкой общего качества Машин, полученного в результате всего производственного процесса ее изготовления. В зависимости от вида, назначения и масштаба выпуска машины, машины проходят испытание на холостом ходу (проверка работы механизмов и паспортных данных), в работе под нагрузкой, а так же испытания на производительность, жесткость, мощность и точность.

Испытания на холостом ходу. При этом испытании проверяют все включения и переключения органов управления и механизмов машины. Определяют правильность их взаимодействия и надежность блокировки. Проверяют безотказность действия и точность работы автоматических устройств. Вместе с тем проверяют соблюдение норм правильности работы подшипников, зубчатых колес и так далее.

Испытания машины под нагрузкой. Должны выявить качество ее работы в производственных условиях. Поэтому, для работы машины создаются условия, близкие к условиям эксплуатации.

Испытания на производительность. Подвергают обычно не все машины, а лишь машины специального назначения и опытные образцы. В процессе испытания выявляют: достаточно ли полно отвечает изготовленная машина по производительности требованиям заказа, обеспечен ли выпуск требуемого количества изделий в единицу времени, обладает ли машина требуемой скоростью.

Испытания на жесткость. Проходят, главным образом, станки. Сейчас испытания машины на жесткость стандартизированы.

Испытания на мощность. Этим испытаниям подвергают все машины, выпускаемые единичным порядком и все или выборочно машины, выпускаемые серийно. Не испытывают на мощность машины простейшей конструкции, а так же машины, которые заведомо обладают большим запасом мощности. Испытания машины на мощность имеют целью определить ее КПД при максимальном значении нагрузки. Нагрузку машине создают при помощи специальных тормозных устройств, воспроизводящих максимальные силы и моменты, соответствующие тем, что возникают при эксплуатации машин.

Испытания на точность. Испытывают машины, производящие, сортирующие и контролирующие продукцию (станки, прессы, сортирующие и контролируемые машины). Контроль машин на точность должен дать заключительную оценку качества машины. Ее способность производить продукцию требуемого качества. Поэтому, оценку точности машины при проведении испытаний дают по результатам ее действия, а это по точности обрабатываемых деталей, по точности выполнения сортировки, по контролю.

Выбор планов испытаний. Выбор приборов, оборудования, приспособлений и инструмента для исследования и испытания машин их узлов и систем.

Практическое занятие 5.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ОЧИСТНОГО КОМПЛЕКСА

При испытаниях очистного комбайна производятся измерения и устанавливаются: техническая производительность комбайна (сменная, суточная) и месячная добыча из лавы; мощность привода в различных режимах работы; скорость подачи; условия подачи в зависимости от скорости; количество угля, остающегося на почве после прохода комбайна; удельное пылеобразование и запыленность воздуха; уровень шума на рабочих местах; температура и расход масла в редукторах и гидравлической системе и контроль его загрязнения; хронометраж работы комбайна с установлением затрат времени на основные и вспомогательные операции; показатели сопротивляемости угля и пород почвы и кровли отбойке; расход резцов на 1000 т добываемого угля за весь период испытаний; неполадка при работе и недостатки конструкции; производительность труда по лаве; оценка эффективности комбайнов (компоновочная схема, удобство управления, устойчивость).

При измерениях используются осциллографы, самопишущие киловаттметры, счетчики энергии, расходомеры, кино- и фотоаппаратура. На осциллограммах рекомендуется одновременно регистрировать максимальное число параметров.

При проведении хронометража работы комбайна и обслуживающего его персонала наблюдения должны вестись не менее четырех суток в период стабильной работы комбайна.

Электрические измерения проводятся при выемке не менее четырех полос – по две в каждую сторону движения комбайна.

Скорость подачи определяется с помощью специальных датчиков (индукционного, емкостного или тахогенераторного типа) или как средняя по прохождению комбайном заранее отмеченных интервалов пути с регистрацией времени.

Удельная энергоемкость выемки угля устанавливается расчетным путем как отношение количества фактически израсходованной энергии к количеству фактически добытого угля. Количество израсходованной энергии определяется по показаниям счетчика или находится планиметрированием записи мощности на осциллограмме, а количество отбитого угля – по пути, пройденному комбайном за то же время, ширине захвата и вынимаемой мощности пласта.

Усилия подачи, крутящие моменты в элементах трансмиссии определяются тензометрированием с записью результатов на ленте осциллографа.

Показатели сопротивляемости углю определяются динамометрическим сверлом СДМ по нижней, средней и верхней пачкам пласта не менее чем в четырех-пяти участках лавы.

Сортность добываемого угля определяется путем рассева стандартной пробы на классы: 0–6; 6–13; 13–25; 25–50 и 50–100 мм. Отбор проб производится с забойного конвейера.

Уровень шума измеряется на рабочих местах машиниста, его помощника, рабочих очистного забоя и в пункте перегрузки шумомерами.

Устойчивость комбайна оценивается по результатам тензометрирования реакций, а также киносъемкой через координатную сетку во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для измерений ускорений используются акселерометры. Нагрев масла определяется термометром после длительной работы комбайна, расход – по его доливке до контрольного уровня (относится к общей добыче за период доливки).

Область применения комбайна устанавливается по мощности и углу падения пласта, изменению его гипсометрии, сопротивляемости угля, возможности работы на пластах с твердыми включениями и другими факторами.

При испытаниях забойного конвейера определяется фактическая производительность при различных режимах работы комбайна. Измерение мощности на каждом приводе производится при холостом ходе, а также в режимах установившейся работы и максимальной нагрузки. Скорость движения тяговой цепи определяется тахогенератором или секундомером, предварительное натяжение динамометрическим датчиком или другими способами.

Исследование средств передвижки и удержания конвейера производится путем замеров усилия на штоке гидроцилиндра, хода поршня, давления в гидросистеме, усилия распорных устройств.

Зачистка почвы лемехом конвейера оценивается фиксацией величины неподвижки конвейера до забоя и количеством угля, остающегося не погруженным после передвижения.

Запыленность воздуха определяется при работающем конвейере и работающих комбайне и конвейере.

При хронометражных наблюдениях определяются: среднее значение минутной производительности по чистому машинному времени и по объему добытого и доставленного за время хронометража угля; затраты времени на обслуживание конвейера, учет числа отказов, износостойкость узлов; затраты времени на устранение отказов; удобство монтажа, обслуживания, управления.

При промышленных испытаниях перед каждым полным циклом замеров и после него обязательно производятся маркшейдерские замеры в лаве (длина лавы; длина и ширина ниши; гипсометрия пласта; мощность пласта и прослоев), в которой ведутся испытания.

Область применения забойного конвейера устанавливается по углу падения, мощности и гипсометрии пласта, по длине лавы, крупности угля, обводненности забоя и другим факторам.

Испытаниям механизированных гидравлических крепей должно предшествовать подробное изучение горно-геологических условий испытаний. Проводятся наблюдения за: состоянием, устойчивостью и движением боковых пород в призабойном пространстве; характером деформаций; обрушением пород за крепью и проникновением их в призабойное пространство со стороны выработанного пространства и в зазоры между перекрытиями. Наблюдения проводятся до первичного обрушения кровли при подвигании очистного забоя и в период установившегося режима работы лавы.

При наблюдении за характером деформаций и обрушения пород за крепью фиксируются: время с момента обнажения кровли до ее обрушения; длина зависающих консолей; мощность обрушающихся пород, площадь обрушения; последовательность обрушения и другие факторы.

Наблюдения за состоянием кровли в лавах с механизированными крепями, имеющими коэффициент затяжки кровли менее 0,8, ведутся на участках длиной 1–2 м через каждые 10 м по длине лавы.

Оценка состояния кровли производится по методу ДонУГИ, исходя из степени ее нарушенности:

вывалами
$$K_B = \frac{\sum S_B \sum V}{S_0^2}; \quad (13.2)$$

уступами
$$K_y = \sum l_y \frac{h_y}{H} / S_0; \quad (13.3)$$

трещинами
$$K_T = \sum l_T / S_0, \quad (13.4)$$

где $\sum S_B$ – суммарная площадь вывалов на участках наблюдений м^2 ; $\sum V$ – суммарный объем вывалов, м^3 ; S_0 — суммарная площадь участков наблюдений, м^2 ; l_y – протяженность уступов, м; h_y – высота уступа (смещение), м; H – мощность пласта, м; l_T – протяженность трещин, м.

Относительное сближение боковых пород при наличии в лаве участков с открытыми поверхностями кровли и почвы фиксируется специальными измерительными стоками СУ-П, профилометрами, самопишущими приборами

СПШ-67, СП-72, С-П. При отсутствии участков с открытыми поверхностями почвы и кровли относительные сближения боковых пород могут быть замерены по величине податливости гидростоек секций за цикл.

Скорость смещения боковых пород определяется с помощью измерительных стоек СУИ-П (стойка СУ-П с индикатором) и секундомера, а также по результатам измерений самописцами С-П и СПШ-67.

Податливость гидростоек секций измеряется металлическими линейками или самописцами СП-65.

Фактическое сопротивление гидростоек от начального распора до предельного сопротивления измеряется манометрами, подключаемыми к поршневой полости гидростоек. При необходимости непрерывной регистрации величин давления в гидростойке применяются самопишущие манометры типа МГ-410 в комплексе с гидроредуктором и самопишущие манометры типа М-66А конструкции ИГД им. А.А. Скочинского.

По замерам оценивается работа в единицу времени системы крепь - боковые породы, т. е. произведение фактических нагрузок на стойки и скорости их просадки.

Герметичность стоек определяется по утечкам рабочей жидкости индикаторами давления ИД.

Усилия передвижки крепи измеряются при различных величинах остаточного подпора без него манометрами, встроенными в штоковую и поршневую полости гидроцилиндров передвижения или самопишущими манометрами М-66А.

Значительный объем исследований отводится гидросистеме крепи. Основными задачами этих исследований являются: определение скорости крепления по длине очистного забоя; установление режима работы гидропривода; определение машинного времени, необходимого для передвижки крепи по операциям; определение гидравлических потерь при передвижке секции, забойного конвейера, базы и других элементов; определение расхода эмульсии на 100 т добычи угля.

Характер взаимодействия перекрытий крепи с кровлей определяется профилем кровли и конструкцией перекрытия. Контактруемость перекрытий с кровлей оценивается по методу ИГД им. А.А. Скочинского и характеризуется коэффициентами: вероятности контактирования K_B ; площади контактирования K_{Π} ; контактирования K_K . Коэффициент K_B определяется отношением числа участков перекрытия, контактирующих с кровлей, к общему числу наблюдаемых участков перекрытия. Коэффициент K_{Π} представляет собой отношение средней площади контактирования перекрытия к общей его площади. Коэффициент $K_K = K_B K_{\Pi}$.

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КОМПЛЕКСА

В процессе испытаний опытного образца комплекса проводятся наблюдения за работой машин и механизмов, входящих в его состав, их взаимодействие между собой, наблюдения за местами сопряжений выемочной машины и крепи с забойным конвейером, крепи сопряжений с лавной крепью и конвейером, конвейера с кабелеукладчиком. Оцениваются: работоспособность

пускорегулирующей аппаратуры, средств освещения, сигнализации, удобства монтажа оборудования; трудоемкость монтажа и ориентировочно демонтажа оборудования комплекса; условия комфортности при его работе; правильность выбора технологической схемы работы. Выявляются условия безопасности при работе комплекса и его элементов, дается оценка средств пылеподавления, удобства ремонта и эксплуатации, возможности контроля состояния элементов тяговых цепей комбайна, сопротивления гидростоек крепей.

Устанавливается трудоемкость обслуживания и ремонта комплекса и машин, входящих в его состав (чел-смен на 1000 т добычи угля), затраты на ежесуточное техническое обслуживание.

Определяются фактические технико-экономические показатели работы (добыча угля: среднесуточная и максимальная суточная, среднемесячная и максимальная месячная; среднесуточное и среднемесячное подвигание очистного забоя; производительность труда рабочего на выход) и экономическая эффективность комплекса. Проводится оценка по действующим методикам уровня качества оборудования, входящего в его состав и уточняется область применения комплекса по его основным элементам и в целом.

При оценке надежности оборудования опытного образца комплекса устанавливаются: полный перечень всех отказов (отдельно комбайна, конвейера, крепи), включая отказы электрооборудования; показатели надежности комплекса в целом и отдельно комбайна, конвейера крепи лавы и крепи сопряжений и их основных частей и узлов; перечень узлов, за которыми необходимо продолжить наблюдения после завершения испытаний в заданном объеме (узлов, которые в период испытаний не отказывали и по которым не определены показатели надежности).

В процессе испытаний должны быть определены следующие показатели надежности машин и узлов: наработка на отказ, коэффициент готовности, удельная трудоемкость межремонтного технического обслуживания и плановых текущих ремонтов, коэффициенты неисправности, среднее время восстановления, процент простоев узлов машин, параметр потока замен элементов из-за отказов.

На основе анализа результатов испытаний опытного образца комплекса и его основных машин устанавливается целесообразность продолжения работ по дальнейшему совершенствованию и доводке. Разрабатываются рекомендации по корректировке чертежей на серийное производство или на изготовление повторного образца.

**Определение величины параметров эксплуатационных свойств машин.
Определение скоростных, тяговых, тормозных и других характеристик.**

Практическое занятие 6.

АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА.
СКОРОСТНЫЕ СВОЙСТВАГОСТ
22576—90

Методы испытаний

Motor vehicles. Speed characteristics.
Test methods

(СТ СЭВ 6893—89)

ОКП 45 1000, 45 2000

Дата введения 01.01.92

Настоящий стандарт распространяется на автотранспортные средства (АТС) всех типов, кроме внедорожных.

Требования настоящего стандарта являются обязательными, за исключением требований п. 2.5.1.1 и п. 4.3 в части определения поправочного коэффициента.

1. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Устанавливаются следующие показатели и характеристики скоростных свойств АТС:

- 1.1 — максимальная скорость;
- 1.2 — время разгона на заданном пути;
- 1.3 — время разгона до заданной скорости;
- 1.4 — скоростная характеристика «Разгон-выбег»;
- 1.5 — скоростная характеристика «Разгон на передаче, обеспечивающей максимальную скорость».

Применимость показателей и характеристик по видам испытаний и типам АТС определяется соответствующими программами.

Пояснения применяемых в настоящем стандарте терминов приведены в приложении 1.

2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Требования к объекту испытаний

2.1.1. АТС, предназначенное для испытаний, должно быть исправным, укомплектованным, заправленным ГСМ в соответствии

Издание официальное



© Издательство стандартов, 1991

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без разрешения Госстандарта СССР

с нормативно-технической документацией. Двигатель, трансмиссия и шины должны пройти надлежащую обкатку в соответствии с инструкцией предприятия-изготовителя и иметь пробег, включая обкатку, не менее 3000 км.

2.1.2. Износ шин на АТС не должен превышать 50%.

Шины не должны иметь повреждений. Давление в шинах должно отвечать требованиям предприятия-изготовителя.

Давление измеряют и регулируют на «холодных» шинах. В процессе испытаний АТС регулирование давления не допускается.

2.1.3. Окна и вентиляционные люки при проведении испытаний должны быть закрыты, мягкий откидной верх или тент должен находиться в рабочем положении.

Агрегаты и механизмы (дополнительный ведущий мост, коробка отбора мощности и др.), не применяемые во время движения по дороге с усовершенствованным покрытием, должны быть выключены; при наличии лемультипликатора должна быть включена его повышающая передача.

2.1.4. Устройство для подогрева воздуха системы питания, не имеющее автоматического управления, должно быть установлено в положении «Лето». Системы отопления салона (кабины) и кондиционирования воздуха должны быть выключены. Допускается использование этих систем при сравнительных испытаниях зимой.

2.1.5. Допускается определение показателей скоростных свойств на стенде с беговыми барабанами, обеспечивающем воспроизведение сопротивлений движению АТС на дороге.

2.2. Масса груза

2.2.1. При испытаниях должна применяться:

полная масса груза — для АТС полной массой свыше 3,5 т;

половина массы груза, но не менее 180 кг — для АТС полной массой до 3,5 т включительно.

2.2.2. В качестве груза применяют негигроскопичные балласт или натуральные грузы для грузовых автомобилей и манекены или балласт (мешки с сыпучим наполнителем) для легковых автомобилей и автобусов.

Допускается применять в качестве балласта гигроскопичные грузы при условии их надежной защиты от атмосферных воздействий.

Балласт (манекены) должен быть надежно закреплен. Массу водителя и контролера, а также массу оборудования и креплений включают в массу груза.

Распределение массы по осям (колесам) должно соответствовать требованиям технической документации.

2.3. Измерительные участки

2.3.1. Измерения проводят на твердом гладком чистом и сухом участке дороги с хорошим сцеплением.

2.3.2. Показатель 1.1 можно измерять на прямом участке дороги или на горизонтальной кольцевой дороге. Показатели 1.2—1.5 измеряют на прямом участке дороги.

2.3.3. Характеристика прямого участка дороги должна быть следующей:

продольный уклон — не более 0,5% на участке длиной не более 50 м;

поперечный уклон — не более 3%;

длина измерительного участка не должна быть менее 1000 м для определения показателей 1.1 и 1.2 и менее 2000 м для определения показателя 1.3 и характеристик 1.4 и 1.5.

Подъездные дорожные участки должны иметь аналогичное покрытие и длину, достаточную для разгона и стабилизации максимальной скорости АТС.

Прямым участком дороги считают участок кольцевой дороги, если центробежная сила не превышает 20% первоначальной массы автомобиля и компенсируется поперечным уклоном пути.

2.3.4. Характеристика кольцевой дороги должна быть следующей:

кольцевая дорога должна быть расположена в горизонтальной плоскости и иметь вид выпуклой кривой, включающей криволинейные участки с радиусом кривизны не менее 200 м;

длина измерительного участка пути не должна быть менее 2000 м;

действие центробежной силы должно компенсироваться поперечным профилем поворотов так, чтобы движение АТС на повороте осуществлялось без воздействия на рулевое колесо.

2.4. Средства измерений

2.4.1. Средства измерений должны быть компактными, простыми в установке и пользовании, вибростойкими и обеспечивать необходимую точность измерений при температуре воздуха $\pm 40^\circ\text{C}$ на всех режимах движения АТС, включая максимальную скорость; установка их на АТС не должна влиять на сопротивление движению.

2.4.2. Погрешность средств измерений не должна превышать значений, приведенных в табл. 1.

2.5. Атмосферные условия

2.5.1. При дорожных испытаниях АТС должны соблюдаться следующие требования. Средняя скорость ветра, измеренная на высоте 1 м над поверхностью дороги, не более 3 м/с (при порывах до 5 м/с). Плотность воздуха не должна отличаться более чем на 7,5% от плотности воздуха, определенной при нормальных атмосферных условиях (атмосферное давление $P_0=1000$ гПа (760 мм рт. ст.). Температура воздуха $T_0=293$ К (20°C). Плотность воздуха при испытаниях (d_1), кг/м^3 , вычисляют по формуле

$$d_1 = d_0 \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}, \quad (1)$$

Таблица 1

Наименование	Погрешность, не более
Время	0,1 с
Путь	0,5 %
Скорость АТС	1 %
Скорость ветра	0,5 м/с
Частота вращения вала двигателя	1 %
Температура воздуха	1 °С
Атмосферное давление	3,0 гПа
Относительная влажность воздуха	7 %
Масса АТС	0,3 %

где d_0 — плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, равная 1,189 кг/м³;

H_1 — атмосферное давление при проведении испытаний, гПа;

T_1 — температура при проведении испытаний, К.

При этом d_1 не должна отличаться более чем на 7,5 % от d_0 .

Температура воздуха не должна быть ниже 276 К (3 °С), атмосферное давление ниже 910 гПа и относительная влажность воздуха выше 95 %.

2.5.1.1. Допускается проведение испытаний АТС (кроме межведомственных, приемочных и предварительных) при температурах ниже 3 °С с последующей корректировкой результатов согласно рекомендуемому приложению 2.

2.5.1.2. Включение в нормативно-техническую документацию показателя 1.4, полученного при корректировке результатов испытаний при температуре ниже 3 °С (приложение 2), не допускается.

3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Общие положения

3.1.1. Перед испытаниями тепловой режим агрегатов и узлов АТС доводят до нормального установившегося состояния пробегом не менее 50 км при скорости движения не ниже $2/3$ максимальной. При вынужденных простоях АТС в процессе испытаний и снижении температуры агрегатов и узлов необходимо восстановить их тепловое состояние дополнительным пробегом.

3.1.2. Перед испытаниями должно быть проверено отсутствие повышенных сопротивлений движению измерением пути выбега со скорости 50 км/ч. Результаты оценивают положительно, если приведенный согласно приложению 2 путь выбега не менее заданного в НТД.

3.2. Определение максимальной скорости (показатель 1.1)

3.2.1. *Определение максимальной скорости на прямом участке дороги при движении в двух направлениях*

Максимальную скорость определяют на передаче, обеспечивающей достижение наибольшей устойчивой скорости движения, которая устанавливается до въезда на измерительный участок.

Педаль управления подачи топлива должна быть нажата до упора. Число измерений (заездов) — не менее трех в каждом направлении. Изменение скорости в заезде не должно превышать 2%. В каждом заезде должно определяться время прохождения измерительного участка. Разница между крайними значениями шести измерений не должна превышать 3%.

3.2.2. *Определение максимальной скорости на прямом участке дороги при движении в одном направлении*

Определение максимальной скорости при движении в одном направлении допускается только в том случае, если характеристика дороги не позволяет достичь максимальной скорости в обоих направлениях, при этом должны соблюдаться дополнительные условия:

изменение высоты продольного профиля на всем протяжении горизонтального измерительного участка не должно превышать 1 м;

осевая составляющая скорости ветра не должна превышать 2 м/с.

Измерительный участок проезжают пятикратно; заезды должны следовать непосредственно один за другим, при этом измеряется время каждого заезда.

3.2.3. *Определение максимальной скорости на кольцевой дороге*

Для определения данной скорости измеряют время, необходимое для проезда всей кольцевой дороги, проводят не менее трех измерений для автомобиля, едущего по следу, не нуждающегося в корректировке пути посредством воздействия на рулевое колесо. Разница крайних значений не должна превышать 3%.

3.3. *Определение времени разгона на заданном пути (показатель 1.2)*

3.3.1. Время разгона на заданном пути длиной 400 и 1000 м определяют непосредственным его измерением или по результатам записи режима разгона АТС с места. Замеры выполняют в обоих направлениях движения, двукратно, непосредственно один за другим.

Движение начинают с передачи, используемой при трогании с места. Разгон выполняют при полной подаче топлива и переключении передач при номинальной скорости (номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя) или при скорости (частоте вращения), ограниченной регулятором. При наличии делителя в коробке передач переключения передач при работе АТС производят согласно рекомендации предприятия-изготовителя; при

отсутствии таких рекомендаций используют верхний ряд передач. Режимы работы автоматической трансмиссии должны соответствовать требованиям технической документации.

3.4. Определение времени разгона до заданной скорости (показатель 1.3)

3.4.1. Время разгона с места до заданной скорости определяют как среднюю арифметическую величину по результатам заездов, выполненных в соответствии с п. 3.3, или по кривой режима разгона АТС с места.

Устанавливаются следующие значения конечной скорости разгона:

100 км/ч — для АТС всех типов полной массой до 3,5 т;

80 км/ч — для грузовых автомобилей, автобусов (кроме городских) полной массой свыше 3,5 т и автопоездов.

60 км/ч — для городских автобусов.

Для АТС, имеющих максимальную скорость ниже заданной или выше ее не более чем на 5 км/ч, принимается ближайшая меньшая скорость, кратная десяти.

3.5. Определение скоростной характеристики «разгон-выбег» (характеристика 1.4)

3.5.1. Для определения данной характеристики выполняют разгон с места до наибольшей скорости, достигаемой на пути 2000 м, и выбег с выключенной передачей до остановки. Разгон выполняют в соответствии с п. 3.3.

Параметры движения (путь, время, скорость) следует регистрировать с помощью измерительной аппаратуры. Допускается параметры разгона и выбега определять раздельно, если длина измерительного участка недостаточна.

3.6. Определение скоростной характеристики «разгон на передаче, обеспечивающей максимальную скорость» (характеристика 1.5)

3.6.1. При определении данной характеристики разгон АТС выполняют на передаче, обеспечивающей достижение максимальной скорости (высшая или предшествующая) с минимальной скорости на этой передаче до скорости 0,9 от максимальной.

Минимальную скорость устанавливают до начала измерительного участка. Применяемая передача должна быть отражена в названии характеристики.

Разгон АТС выполняют при полной подаче топлива.

Замеры, следующие один за другим, необходимо выполнять по одному разу в обоих направлениях движения.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Все результаты испытаний и данные метеорологических измерений должны быть внесены в протокол испытаний.

4.2. Скорость (v_{\max}) и время (\bar{t}) движения АТС, км/ч, вычисляют по формулам:

$$v_{\max} = 3,6 \cdot s \cdot \bar{t}, \quad (2)$$

где s — длина измерительного участка, м;
 \bar{t} — среднее время проезда измерительного участка, с;

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum t_i, \quad (3)$$

где n — число измерений;

t_i — время прохождения измерительного участка в i -м измерении, с.

4.3. За величину максимальной скорости АТС, полученной на прямом участке дороги при движении в двух направлениях, принимают значение, полученное по формуле (2).

Величину максимальной скорости АТС, полученной на прямом участке дороги при движении в одном направлении (v'_{\max}), вычисляют по формуле

$$v'_{\max} = v_{\max} \pm 0,6 v_w, \quad (4)$$

где v_{\max} — скорость автомобиля, вычисленная по формуле (2), км/ч;

v_w — осевая составляющая средней по заездам скорости ветра, км/ч.

Примечание. Знак (+) применяют, если осевая составляющая ветра противодействует движению АТС, а знак (—) — в противоположном случае.

Величину максимальной скорости АТС, полученной на кольцевой дороге, вычисляют по формуле

$$v'_{\max} = v_k \cdot K, \quad (5)$$

где v_k — максимальная скорость, полученная на кольцевой дороге, км/ч;

K — поправочный коэффициент ($1 \leq K \leq 1,05$) определяемый согласно приложению 3.

4.4. Номинальную скорость АТС (v_N), км/ч, вычисляют по формуле

$$v_N = 0,377 \cdot n_N \cdot r_k / u_{тр}, \quad (6)$$

где n_N — номинальная частота вращения вала двигателя, мин⁻¹;

r_k — радиус качения ведущих колес, м;

$u_{тр}$ — передаточное число трансмиссии.

Ресурсные испытания машин, узлов. Предварительные, приемосдаточные и периодические испытания машин.

Практическое занятие 7.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА (ОПЫТНОЙ ПАРТИИ)

После завершения заводских испытаний завод-изготовитель передает опытный образец изделия для проведения приемочных испытаний в условиях действующей шахты. В соответствии с ГОСТ 15.001 — 73 приемочные испытания опытного образца (опытной партии) проводятся для определения соответствия его техническому заданию (ТЗ), требованиям стандартов и конструкторской документации, требованиям техники безопасности промышленной санитарии и возможности постановки на промышленное производство.

Условия приемочных испытаний должны в максимальной степени соответствовать области применения, указанной в ТЗ. Организация приемочных испытаний также оговорена в ГОСТ.

Для проведения испытаний назначается межведомственная комиссия (МВК), в состав которой включаются представители: заказчика; производственного объединения; предприятия, где проводятся приемочные испытания; разработчиков технического задания; бассейнового НИИ; разработчика конструкторской документации; ведущего проектно-конструкторского института; завода-изготовителя; головного НИИ; Государственного санитарного надзора; технической инспекции профсоюза отрасли, в которой будет эксплуатироваться изделие.

По результатам приемочных испытаний МВК составляет протокол испытаний. Если новое изделие передается в серийное производство, то МВК дает рекомендации по объему установочной серии, объему доработки изделия и корректировки конструкторской документации.

В основе приемочных испытаний лежит методика, которая с учетом специфических особенностей испытываемого оборудования разрабатывается на основе Типовой методики приемочных испытаний комплексов оборудования с механизированными крепями, разработанной ИГД им. А. А. Скочинского и Гипроуглемашем.

Методика испытаний включает следующие разделы: цели и задачи испытаний; объект испытаний; организация и порядок проведения испытаний; условия и объем испытаний; содержание и методика проведения наблюдений при испытаниях; выводы и рекомендации по результатам испытаний.

В соответствии с основной целью в процессе испытаний по каждому образцу комплекса и основным элементам, входящим в его состав, должны быть решены следующие задачи: определение фактических показателей технической характеристики, оценка правильности их выбора и соответствия проектным показателям; проверка соответствия основных машин комплекса существующим ГОСТам; определение фактической степени механизации и автоматизации производственных процессов; проверка работоспособности комплекса; выявление преимуществ и недостатков конструкции; проверка эксплуатационной надежности комплекса и его основных частей; оценка правильности выбора технологической схемы работы комплекса; проверка условий безопасности работ; оценка запыленности, удобств прохода, температурных условий при работе комплекса; определение технико-экономических показателей работы основных машин и комплекса в целом и установление экономической эффективности его применения; оценка уровня качества оборудования; уточнение области применения комплекса; установление целесообразности продолжения работ по доводке конструкции.

Организация и порядок проведения испытаний должны предусматривать: проверку комплектности прибывшего на место испытаний комплекса; контрольную сборку машин; опробование их в работе; обучение обслуживающего персонала. После контрольной сборки комплекс демонтируется и спускается в шахту.

Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе осваиваются комплекс и взаимодействие основных его частей (выемочной машины, забойного конвейера, механизированной крепи и др.), производится наладка. Одновременно отрабатывается организация работ, уточняются правила безопасности.

Сроки проведения первого этапа испытаний устанавливаются МВК, но не менее периода времени до первичной посадки основной кровли.

Горно-геологические и горно-технические условия, выбираемые для испытаний, должны максимально соответствовать граничным, наиболее неблагоприятным условиям, установленным технической характеристикой комплекса, т. е.: мощность пласта – минимальному пределу мощности на тонких пластах и максимальному – на пластах средней мощности и мощных; угол падения пласта – максимальному углу падения; устойчивость кровли и ее класс по обрушаемости – соответственно наименее устойчивой кровле и наиболее высокому классу обрушаемости; сопротивление почвы и кровли на вдавливание – минимальному по технической характеристике; сопротивление угля резанию – максимальному пределу этого сопротивления.

Испытания машин с целью определения фактических величин трудоемкости технических обслуживаний и ремонтов машин и простоев в ремонте.

Практическое занятие 8.

При проведении испытаний с целью получения количественных значений показателей надежности элементов и систем приходится иметь дело с выборками реализаций случайных величин. Вследствие этого, полученные значения лишь с некоторой вероятностью характеризуют показатели надежности. Поэтому при планировании продолжительности и объема шахтных испытаний задаются доверительной вероятностью γ и предельной абсолютной погрешностью ε , которые связаны между собой условием:

$$\gamma = P(|X_0 - \tilde{X}_0| \leq \varepsilon),$$

где X_0 – генеральная средняя величина изученного признака, например, наработка на отказ генеральной совокупности однотипных объектов; \tilde{X}_0 – оценка X_0 по результатам наблюдений для выборочной совокупности тех же объектов.

Точность результатов измерений оценивается обычно относительной предельной погрешностью $\delta = \varepsilon / \tilde{X}_0$. При этом, чем больше γ и меньше δ , тем больше должен быть объем выборочных данных n , характеризуемый, например, количеством отказов объекта, числом случайных наработок объекта между отказами или случайных величин времени восстановления работоспособного состояния объекта.

Выбор γ и δ для определения объема наблюдений должен осуществляться с учетом целей исследования надежности и степени структурной детализации оборудования. При оценке надежности опытных образцов горных, транспортных стационарных машин, комплексов и агрегатов, а также структурных элементов серийных машин можно принимать $\gamma \geq 0,8$ и $\delta \leq 0,2$; а при оценке надежности серийных горных машин, комплексов и агрегатов – $\gamma \geq 0,9$ и $\delta \leq 0,1$.

Минимально необходимый объем выборочных данных $[n]$ зависит от принятых γ и δ , вида закона распределения и дисперсии, положенной в основу определения показателя надежности. Значения $[n]$ приведены в табл. 13.1, составленной в соответствии с рекомендациями по планированию испытаний.

Таблица 13.1.

Закон распределения случайной величины	Коэффициент вариации	$[n]$					
		$\gamma = 0,8$		$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$	
		$\delta = 0,2$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,1$	$\delta = 0,1$	$\delta = 0,05$
Нормальный	0,2	3	4	7	13	18	65
	0,25	4	6	10	19	27	100
	0,3	5	8	13	26	37	150
	0,33	6	10	15	31	44	200
Логарифмически нормальный	0,2	5	8	18	39	64	254
	0,25	7	13	29	64	105	416
	0,3	11	19	44	97	160	640
	0,33	14	24	54	122	202	800
Экспоненциальный	1,0	30	50	100	200	300	1000

Календарная продолжительность $t_{\text{исп}}$ (ч) хронометражных наблюдений может быть получена из выражения:

$$t_{\text{исп}} = [n] \cdot T'_0 / K_{\text{э}},$$

где T'_0 – предполагаемая величина средней наработки на отказ исследуемого объекта, ч; $K_{\text{э}}$ – коэффициент непрерывности работы объекта при эксплуатации.

Наблюдения следует вести за группой однотипных объектов, работающих в одинаковых условиях эксплуатации, соответствующих паспортным данным.

Продолжительность испытаний (ч) одного объекта

$$t'_{ucn} = \frac{[n] \cdot T'_0}{NK_0K_{\text{э}}},$$

где N – число однотипных объектов, работающих в одинаковых условиях; K_0 – коэффициент охвата, равный: 0,3 для серийных горных, транспортных, стационарных машин, комплексов и агрегатов; 0,6 для опытных партий; 1 для опытных образцов.

Продолжительность (ч) испытаний для невосстанавливаемых или не ремонтируемых объектов

$$t_{ucn} = \frac{[n_0] \cdot T'_1}{K_{\text{э}}},$$

(13.1)

где $[n_0]$ – минимально необходимое число испытываемых объектов, определяемое по табл.13.1 для $[n]$; T'_1 – предполагаемая величина средней наработки до отказа исследуемого объекта, ч.

Разовая продолжительность хронометражных наблюдений обычно равна длительности рабочей смены. Требуемое число смен наблюдений должно составлять $m \geq t_{ucn}/t_{cm}$, где t_{cm} – длительность рабочей смены, ч.

Для установления законов распределения показателей безотказности и ремонтпригодности горно–шахтного оборудования, связанных с фиксированием значений времени работы между отказами и затрат времени на ликвидацию отказов, рекомендуется проводить специальные хронометражные наблюдения. В этом случае следует выполнить требования не только к объему экспериментальных данных, но и к длительности непрерывных наблюдений.

При ограниченной длительности непрерывных хронометражных наблюдений могут быть сделаны неправильные выводы о законах распределения измеряемых случайных величин.

Если календарная продолжительность непрерывных хронометражных наблюдений не превышает $3T_0/K_{\text{э}}$, то может быть сделан вывод о нестационарности параметра потока отказов, хотя в действительности он является простейшим, а случайные наработки между отказами подчиняются экспоненциальному закону распределения.

Исследованиями установлено, что для подтверждения реально существующего простейшего потока отказов горно–шахтного оборудования число смен непрерывных хронометражных наблюдений должно определяться из условия

$$m_n \geq 1 + \frac{4T_0}{K_{\text{э}} t_{\text{см}}}.$$

Условие (13.1) удовлетворяет также случаям, когда исследуемая величина подчиняется нормальному и другим законам распределения, если коэффициент вариации СВ t не превышает единицы ($v_t \leq 1$).

Для достаточно уверенного суждения о законе распределения СВ суммарная длительность непрерывных хронометражных наблюдений должна быть не менее $(70 \dots 100)T_0$.

Объемы приемочных испытаний опытных образцов (партии; комбайнов и струговых установок, работающих в комплексе с механизированной крепью, должны быть не менее указанных в табл. 13.2.

Таблица 13.2.

Угол падения, градус	Объем испытаний (тыс. т) на пластах мощностью, м			
	0,5–0,7	0,71–1,2	1,21–2,0	2–3,5 и более
Первичные опытные образцы (партии)				
До 35	50	75	100	150
Более 35	25	40	50	75
Повторные опытные образцы (партии)				
До 35	75	100	125	185
Более 35	40	50	65	100

Объем приемочных испытаний механизированных крепей должен быть не менее 300 м подвигания очистного забоя на пластах с углами падения до 35° и не менее 200 м подвигания очистного забоя на пластах с углами падения более 35° .

При устойчивой работе оборудования сроки испытаний могут быть сокращены. На втором этапе испытаний проводится устранение неполадок, возникших в процессе проектирования, и на первом этапе испытаний, окончательное освоение комплекса и основных его частей, решаются вопрос о внедрении комплекса в производство.

Ускоренные испытания машин их узлов и систем.

Практическое занятие 9.

Для расчета и прогнозирования надежности необходимо иметь источники информации об изменении показателей работоспособности машины. Эта информация должна относиться либо к отказам машины и ее элементов, либо к оценке параметров повреждений. Оценка параметров повреждений является более ценной, так как позволяет прогнозировать техническое состояние объекта, тогда как сведения об отказах лишь констатируют уровень надежности.

Основная трудность определения показателей надежности состоит в том, что они могут быть получены за длительный период эксплуатации объекта, в то время как эти показатели должны быть заложены во вновь проектируемую машину. Именно это обстоятельство заставляет искать пути и методы расчета надежности для вновь проектируемых и эксплуатируемых объектов.

Рассмотрим схему (рис.1) возможных источников информации о надежности объекта.

При проектировании машины и на основании данных готового проекта информацию о ее надежности можно получить лишь расчетным путем, включая прогнозирование. Именно качество и достоверность расчетов позволит уже на стадии проектирования заложить в конструкцию машины заданный уровень надежности.

Когда создан опытный образец, то для оценки его надежности проводят ускоренные испытания на стенде или в условиях эксплуатации. По результатам испытаний вносят исправления в проект машины. Те же самые действия выполняют и при испытаниях серийных образцов машин перед запуском их в серийное производство.

После некоторого периода эксплуатации серийных машин начинает поступать информация об отказах, причинами которых могут быть несовершенство методов расчета и (или) недоучет факторов, не выявленных в условиях ускоренных испытаний.

Когда машина проходит запланированные виды ремонта, то содержание ремонтных работ, включающее параметры повреждений отдельных узлов, трудоемкость их ремонта, контроль и восстановление выходных параметров машины и др., является тем источником информации, с помощью которого судят о надежности машины и ее элементов.



Рис. 1. Схема получения информации о надежности объекта

На практике обычно используются три основных источника информации:

- аналитические расчеты и прогнозирование надежности;
- испытания на надежность, в том числе и ускоренные;
- статистическая обработка данных из сфер эксплуатации и ремонта.

Лабораторные и стендовые исследования и испытания машин их узлов и систем.

Практическое занятие 10.

Цель исследования прочности материалов, деталей и конструкций – это получение прочностных характеристик для паспортизации материалов и полуфабрикатов; определение разрушающих нагрузок для оптимизации несущей способности деталей и соединений при проектировании; проведение контрольных сертификационных статических испытаний на расчетные нормированные нагрузки до разрушения и расчет запаса прочности (избыток прочности), не превышающего допустимого по весовому критерию.

Аналогичные цели ставят при усталостных испытаниях, но в этом случае главными параметрами являются уровень средних напряжений и число циклов (часов) до разрушения.

Развитие техники испытаний на прочность и сопротивление усталости происходит в направлении автоматизации нагружения, измерения параметров, контроля и калибровки, обработки данных, формирования информации, ее накопления и оперативного представления, редактирования документации и ее размножения. Для целей автоматизации используют мини- и микроЭВМ,

периферийные устройства. Тем самым достигается замена длительных трудоемких операций, повышается уровень стандартизации испытаний, метрологическая культура, объективность оценок и увеличение числа исследуемых параметров.

Структурная схема испытаний на прочность (усталость) или работоспособность дана на рисунке 1.17. Правая часть схемы составляет информационно-измерительную систему (ИИС), левая – управляющий вычислительный комплекс (УВК). Общим инструментом для выполнения всех операций является ИВК – измерительно-вычислительный комплекс, который выполняет прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения электрических величин, управляет процессом измерения и воздействия на объект, представляет результаты измерений оператору в заданном виде. ИВК обеспечивает восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных преобразователей, управление средствами измерений и выработку нормированных электрических сигналов, являющихся входными для анализа точности измерений; контролирует величины силового (или другого типа) воздействия на объект; представляет результаты в установленных формах.

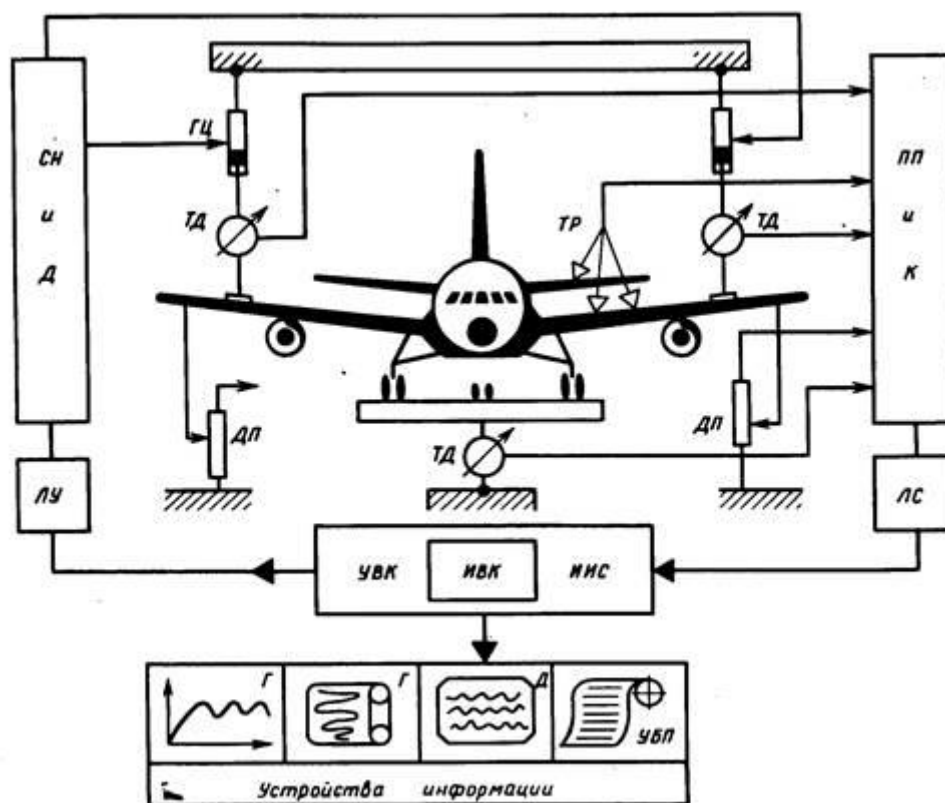


Рис. 1.17. Структура системы испытания на прочность (усталость) или работоспособность: СН и Д – система нагружения и движения; ПП и К – первичные преобразователи и коммутаторы; ЛС – линии связи; ЛУ – линии управления; Г – графопостроители; Д – дисплей; УБП – устройство быстрой печати; ТД – тензодинамометры; ДП – датчики перемещения; ТР – тензорезисторы; ГЦ – гидроцилиндры

Развитие автоматических систем испытания на прочность (усталость) прошло несколько этапов ограниченной автоматизации, прежде чем вырабо-

талось рациональное сочетание по многоканальности и быстродействию для ИИС и УВК. В некоторых случаях удобнее использовать только несколько модулей ИИС, или при блочно-модульном построении УВК применять отдельно модули (стойки) АСУН (автоматические системы управления нагружением) для нескольких независимых испытаний. Программное управление осуществляют от встроенного в ИВК процессора (мини- или микроЭВМ); используют, как правило, серийно выпускаемые агрегатные средства измерений и автоматизации, типовые интерфейсы.

Частным случаем системы испытания являются испытательные машины и функциональные стенды (установки) (рис. 1.18), которые структурно повторяют многоканальные системы (см. рис. 1.17), но имеют простую схему обратной связи, поскольку большинство из них – одноканальные. Развитие систем испытаний происходит в нескольких направлениях. Так, в зависимости от частот (скоростей) нагружения, мощности и принципов управления нагрузками наиболее универсальными для машин и агрегатов являются электрогидравлические и электромеханические принципы испытаний, менее гибкими – электродинамические и пневмоэлектрические.



Рис. 1.18. Стенд для испытания конструкций

Одновременно с системами основных нагрузок развиваются системы физического моделирования условий эксплуатации (испытаний). Применяют устройства для лучистого и конвективного нагрева, термобарокамеры, криостаты, климатические и реверберационные камеры и т.д.

Научно-исследовательский испытательный комплекс (НИИК) Всероссийского НИИ экспериментальной физики (Российский федеральный ядерный центр) проводит экспериментальные исследования образцов военной техники из ядерного арсенала России и изделий гражданского назначения на прочность и стойкость к внешним механическим, тепловым и климатическим нагрузкам на протяжении всего срока службы.

Научно-технические возможности комплекса позволяют исследовать различные характеристики и параметры конструкций (напряженно-деформированное состояние, взаимные перемещения деталей и узлов, уровни

нагрузок, тепловые поля, динамические характеристики и т. д.) как при одиночном, так и при комплексном воздействии на них инерционных, вибрационных, ударных и климатических нагрузок, а также проводить дистанционные испытания изделий, содержащих взрывчатые, радиоактивные вещества и делящиеся материалы.

На испытательных установках НИИКа могут быть получены:

- статические нагрузки до сотен тонн;
- перегрузки в тысячи единиц при ударе;
- различные виды вибрационных нагрузок;
- арктический холод и тропическая жара, 100%-я влажность и солнечная радиация.

Методологическая и аппаратная оснащенность испытательного комплекса обеспечивает:

- подтверждение многолетнего гарантийного срока службы конструкций по результатам их форсированных испытаний;
- фундаментальные исследования физико-механических и радиационных характеристик всевозможных конструкционных материалов и взрывчатых веществ;
- испытания на прочность и герметичность газовых систем различного назначения гидравликой, вакуумированием и газом;
- испытания конструкций на воздействие высокого давления одновременно с линейными, вибрационными или ударными ускорениями;
- диагностирование поврежденных конструкций и газовых систем методами рентгенографии, ультразвука, акустической эмиссии, течеискания, тензометрии и др.;
- возможность компрессии водорода, азота, аргона и других газов на передвижных установках;
- проведение необходимого объема измерений и их обработку с использованием современных измерительных и вычислительных комплексов.

Экспериментальное определение производительности различных типов машин. Сравнительные испытания машин.

Практическое занятие 11.

Правила сравнительных испытаний

Сравнительные испытания РИПИ (тесты) проводятся в соответствии с принципами декларируемыми организациями - членами **Международной организации потребительских союзов** (Consumers International, CI).

Цель сравнительных испытаний

- предоставление информации, помогающей потребителям сделать более рациональный выбор между марками и моделями, присутствующими на рынке, не подрывая при этом позиций производителей.

- попытка подвигнуть производителей на улучшение качества производимых ими товаров, предоставляя информацию государственным органам, а также тем организациям, целью которых является поддержка и улучшение стандартов качества товаров и предотвращение доступа небезопасных товаров на рынок.

Несмотря на то, что в сравнительных испытаниях обычно участвует более одной модели, данные принципы проведения испытаний также могут применяться и при исследовании одного товара, единственного в своем роде (новый товар), или же когда особые характеристики определенного товара (безопасность или эксплуатационные качества) являются целью исследования.

Информация, полученная в результате сравнительных испытаний, может быть основана на технических оценках, сделанных в лабораториях или подобных учреждениях, а также на субъективных оценках, сделанных в соответствии с установленными методами получения оценок характеристик товара.

Выбор моделей

Выбор товаров для сравнительных испытаний должен быть сведен к товарам, имеющим одинаковое назначение. Выбираемые модели должны быть достаточно широко представлены на рынке. Исключением является ситуация, когда целью испытаний является информирование потребителей о преимуществах и недостатках различных категорий товаров (например, ручных миксеров и миксеров, устанавливаемых на столе); или же выявление определенного аспекта (например, безопасности) у одного или всего нескольких товаров. Ограниченная выборка товаров также возможна, если целью испытаний является не оказание помощи потребителям в выборе товара, а предоставление им информации об определенных типах товаров или о новинках рынка.

Число образцов

Т.к. предполагается, что производители или поставщики отвечают за то, чтобы все образцы товаров, продаваемых под их торговыми марками, соответствовали минимальным стандартам качества и безопасности, то могут быть сделаны выводы о товаре по результатам испытаний одного образца, выбранного для сравнительных испытаний, поскольку при совершении покупки потребительская организация ставит себя на место обыкновенного потребителя. Однако, в интересах предоставления потребителям наиболее полной информации, рекомендуется, чтобы потребительские организации принимали меры для проверки типичности товара для производителя или поставщика. Если же целью испытаний является выяснение постоянства определенных характеристик у товара, то необходимо проверять большее число образцов каждой модели.

Приобретение образцов

Обычно приобретая образцы для испытаний, потребительские организации действуют как обычные потребители, покупая их через торговую сеть. Однако, в определенных обстоятельствах, может быть необходимым использовать другие способы приобретения образцов (отбор образцов со склада произво-

дителя). Какой бы метод не использовался, необходимо следить за тем, чтобы в испытания не попали специально подготовленные товары.

Перед испытаниями также должны приниматься во внимание такие факторы, как условия хранения в магазинах, обслуживание и транспортировка. При тестировании особых видов товаров, например, скоропортящихся пищевых продуктов, должны приниматься особые меры для обеспечения сопоставимости результатов испытаний.

Если объектом тестирования являются новинки на потребительском рынке, которые еще не завезены в Россию, возможно предоставление образцов стороной заказчика.

Выбор характеристик

За исключением случаев, когда целью испытаний является оценка специфических характеристик товаров, в отчетах о сравнительных испытаниях должны учитываться характеристики, наиболее важные для потребителей. Обычно это эксплуатационные качества, безопасность, удобство в использовании и цена.

При принятии решения о том, какие характеристики товаров будут отражены в отчете об испытаниях, во внимание принимаются рекламные заявления, требования законодательства, соответствие стандартам, а также и другие факторы, влияющие на мнение потребителей о товаре: надежность и обслуживание, гарантии, наличие запасных частей, упаковка, установка, инструкции по эксплуатации.

Методика проведения испытаний

Основной критерий при выборе методики - возможность предоставления потребителям полезной, достоверной и объективной информации о товаре.

Используемая методика должна обеспечивать сходимость полученных результатов.

Для характеристик, которые можно оценить только субъективно, методика может включать в себя экспертные оценки, оценки группы потребителей или потребительские опросы. Опросы и оценки такого рода должны проводиться в соответствии с принятой статистической практикой, а результаты должны быть представлены так, чтобы практическое значение полученных данных было ясным.

Проверка результатов испытаний

Чтобы свести к минимуму вероятность неправильных или вводящих в заблуждение результатов при тестировании нетипичных или бракованных образцов, а также из-за фактора человеческой ошибки, необходимо принимать меры по проверке результатов испытаний.

За потребительской организацией остается право выбора метода проверки результатов, наиболее подходящего для тестируемых товаров и использованной методики проведения испытаний.

Методы проверки результатов включают в себя:

- Предоставление предварительных отчетов об испытаниях техническим экспертам для получения их комментариев до публикации

- Сравнение результатов испытаний с отчетами о тестировании аналогичных товаров
- Сравнение результатов с данными, опубликованными Производителями
- Информирование производителей о результатах испытаний непосредственно их товаров, чтобы получить комментарии до публикации

Если же производитель не согласен с результатами испытаний, то он ответственен за предоставление данных для подтверждения своей позиции. Потребительские организации должны внимательно рассматривать комментарии производителей, однако свобода принятия решений остается за ними.

Оценка и представление результатов

Результаты сравнительных испытаний должны быть представлены таким образом, чтобы их могли легко понять неспециалисты, однако результаты должны быть представлены технически корректно. По мере возможности нужно принимать во внимание различающиеся нужды и требования различных групп потребителей.

Чтобы удовлетворить как потребителей, предпочитающих простейшие инструкции (например, оценку «лучшая покупка»), так и потребителей, которые предпочитают знакомиться с детальными результатами испытаний, чтобы самим выбрать наиболее подходящий товар, выводы испытаний, данных в общих оценках, должны также сопровождаться и разумным количеством технических данных.

Если результаты испытаний показывают, что товар небезопасен и может подвергнуть потребителей неприемлемому риску, то производитель, соответствующие органы и потребители должны быть проинформированы как можно скорее, даже до публикации основного отчета об испытаниях.

Ошибки

Если, несмотря на процедуру проверки результатов, были найдены серьезные фактические ошибки в опубликованных отчетах, то потребительская организация должна быть готова опубликовать поправки как можно скорее.

Использование результатов

Если результаты сравнительных испытаний используются телевизионными и радиопрограммами, газетами или другими средствами информации, то необходимо принимать меры для того, чтобы выводы испытаний не искажались. Использование результатов сравнительных испытаний третьими лицами может быть разрешено только в том случае, если при этом не искажается суть или объективность отчета. Например, цитирование результатов испытаний товара одной марки без указания общего контекста отчета считается вводящим в заблуждение и должно пресекаться.

Использование результатов сравнительных испытаний в рекламных объявлениях производителей или поставщиков может быть расценено, как вводящее в заблуждение, и может подорвать доверие к потребительской организации. Поэтому при выдаче разрешения на использование результатов испытаний в рекламных целях необходимо принимать меры предосторожности.

Диагностирование систем и узлов машин.

Практическое занятие 12.

Техническая диагностика (диагностика) – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

Техническое состояние объекта (техническое состояние) (ТС) – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

Объект технического диагностирования (контроля технического состояния) или объект (ОТД) – изделие и (или) его составные части, подлежащие диагностированию (контролю).

Техническое диагностирование (диагностирование) (ТД) – определение технического состояния объекта.

Задачами технического диагностирования являются:

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (повреждения);
- прогнозирование технического состояния.

Термин «Техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (повреждения).

Термин «Контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей ТД является определение видов ТС.

Контроль технического состояния (контроль) – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Видами технического состояния являются: *исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, частично неработоспособное, предельное* в зависимости от значений параметров в данный момент времени.

Контроль функционирования – контроль выполнения объектом части или всех свойственных ему функций.

Прогнозирование технического состояния – определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

Целью прогнозирования ТС может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса или срока службы), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта или вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

Технический диагноз или диагноз (результат контроля) – результат ТД, например, заключение о ТС объекта с указанием, места, вида и причины отказа (повреждения), а также остаточного ресурса или срока службы.

Следует различать виды диагностирования: **рабочее, тестовое и экспресс-диагностирование**. При рабочем диагностировании на объект подаются *рабочие воздействия*, при тестовом – *тестовые воздействия*. При экспресс-диагностировании контроль производится по *ограниченному числу параметров за заранее установленное время*.

Под **средством ТД** (контроля ТС) понимается аппаратура и программы, с помощью которых оно осуществляется.

Немаловажным свойством объекта является **контролепригодность**, т.е. его приспособленность к проведению ТД заданными средствами контроля. Конструкция объекта и его составных частей должна обеспечивать доступ к контрольным точкам без разборки узлов и механизмов, за исключением вскрытия технологических люков, заглушек и т.д., открывающих доступ к местам сопряжения датчиков со средствами диагностирования, и исключать возможность повреждения сборочных единиц при присоединении средств контроля.

Система технического диагностирования (СТД) представляется совокупностью средств, объекта и исполнителей, необходимых для проведения контроля по правилам, установленным в технической документации.

СТД по степени автоматизации подразделяются на: **автоматизированные**, в которых проведение ТД осуществляется с применением средств автоматизации с участием человека; **автоматические**, обеспечивающие проведения ТД без участия человека; **неавтоматизированные**, в которых ТД выполняется человеком-оператором.

Алгоритм ТД (контроля) – совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении ТД.

Под **диагностическим обеспечением** понимается комплекс взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления ТД на всех этапах жизненного цикла объекта.

Формализованное описание объекта, необходимое для решения задач ТД называется **диагностической моделью**. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах.

Средства ТД могут быть: встроенными, являющимися составной частью объекта; внешними, выполненными отдельно от объекта; специализированными, предназначенными для ТД одного или группы однотипных объектов; универсальными, предназначенными для ТД объектов различных типов; автоматизированными; автоматическими.

Техническая диагностика решает обширный круг задач, многие из которых являются смежными с задачами других научных дисциплин. Основная задача технической диагностики связана с *распознаванием ТС системы в условиях ограниченной информации*. Иногда техническую диагностику называют безразборной диагностикой, т.е. диагностикой, осуществляемой без разборки изделия. Анализ ТС проводится в условиях эксплуатации, при которых получение информации крайне затруднено. Иногда по полученной информации не представляется возможным сделать однозначное заключение и приходится использовать *статистические методы*.

Структурные и диагностические параметры, технологии диагностирования.

Практическое занятие 13.

Существенной частью процесса распознавания является выбор параметров, описывающих ТС системы. Они должны быть достаточно информативны, чтобы при выбранном числе диагнозов процесс распознавания мог быть осуществлен.

Параметры технического состояния (ПТС) – это различные физические величины, характеризующие работоспособность или исправность объекта, которые можно количественно измерить. Различают структурные и диагностические параметры ТС.

Структурные параметры – это износ, размер детали, зазор, натяг в сопряжении, физико-механические свойства материала, выходные и технические характеристики машины и ее составных частей, т.е. те, которые непосредственно обуславливают ТС ГМО.

Диагностические (контролируемые) параметры, используемые при контроле объекта и характеризующие его ТС, выбирают в зависимости от применяемого метода диагностирования. Следует различать *прямые* и *косвенные* диагностические параметры. Прямой – структурный параметр (износ, зазор в сопряжении и др.) непосредственно характеризует ТС объекта. Косвенные параметры, используемые для определения ТС машин (температура, шум, вибрация, степень герметичности, давление, расход масла, параметры движения деталей и др.), в основном косвенно характеризуют структурные параметры. В тех случаях, когда структурный параметр определяется в процессе ТД прямым измерением, то он одновременно выступает как диагностический параметр.

Структурные параметры, в свою очередь, можно разделить на две группы: ресурсные и функциональные параметры машины или ее составных частей.

Ресурсный параметр – параметр, выход которого за предельное значение обуславливает параметрический отказ и характеризует предельное состояние объекта. К ресурсным параметрам относятся: зазоры в сопряжениях «подшипник – шейка вала», износ шестерен, шлицев, валов, лопаток, каната и др.

Функциональный параметр – параметр, выход которого за предельное значение обуславливает отказ элемента объекта. Его восстанавливают при техническом обслуживании или ремонте. К таким параметрам относятся: эффективная мощность двигателя, частота вращения вала, тепловой зазор, давление открытия перепускного и предохранительного клапанов гидропривода, давление воздуха, углы установки рабочих колес, напряжение.

Нетрудно заметить, что функциональные параметры – это обычно выходные технические и рабочие характеристики машины и ее составных частей, интегрально отражающие определенную совокупность структурных параметров сопряжений. Следует подчеркнуть, что если систему характеризуют

ют совокупность элементов и связи между элементами, то функциональные параметры как раз определяют эти связи.

Качественные признаки наряду со структурными параметрами определяют ТС объекта. К ним относятся: наличие или отсутствие подтекания масла, трещин в корпусных деталях, потеря герметичности, специфический запах, цвет корпуса машины и др. Качественные признаки устанавливают без количественного измерения.

Процесс ТД оценивается следующими показателями и характеристиками: продолжительность, достоверность и полнота ТД, глубина поиска места отказа (повреждения) или дефекта, условные вероятности необнаруженного и ложного отказов.

Достоверность технического диагностирования определяется степенью объективного соответствия технического диагноза (результата контроля) действительному ТС.

Полнота диагностирования является характеристикой, определяющей возможность обнаружения отказов (повреждений) в объекте при выбранном методе его контроля.

Глубина поиска отказа (повреждения) – характеристика, задаваемая указанием составной части объекта с точностью, до которой определяется место отказа (повреждения).

Условная вероятность необнаруженного отказа (повреждения) при контроле – вероятность того, что неработоспособный (неисправный) объект в результате ТД признается работоспособным (исправным).

Условная вероятность ложного отказа (повреждения) при контроле – вероятность того, что работоспособный (исправный) объект в результате ТД признается неработоспособным (неисправным).

На процесс изменения ТС машины оказывают влияние многие факторы, которые можно разделить на конструктивно-технологические и эксплуатационные. К конструктивно-технологическим относятся факторы, от которых зависит качество изготовления, сборки и обкатки машины, а также структура и характер конструкции и ее составных частей: твердость трущихся поверхностей, чистота их обработки, монтажные зазоры и натяги, удельные нагрузки, скорости движения деталей. К эксплуатационным относятся такие факторы, как горно-геологические условия залегания пластов, характер и интенсивность режимов работы машины, методы и качество установленной системы технического обслуживания и ремонта (ТОР).

Методы исследования износостойкости материалов и деталей.

Практическое занятие 14.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ

Применительно к работе горных машин экономически выгодно производить замену инструментов после выполнения определенного объема работы (цикла) или кратно ему. Для выемочных машин замена резцов целесообразна после выемки не менее одной полосы. Только в этом случае возможна регламентированная замена комплекта резцов с наименьшими затратами времени и трудоемкости, что немаловажно при эксплуатации автоматизированных или роботизированных комплексов и агрегатов.

Это требование будет выполнено только в том случае, когда износостойкость резца, выраженная через путь резания L , пройденный резцом до предельного износа, будет достаточной для выполнения заданного объема работы.

Многочисленными исследованиями установлена закономерность процесса изнашивания горных инструментов. Она представлена классической формой зависимости линейного параметра износа, которым может быть износ по высоте l или износ по задней грани Δ , и включает три зоны: интенсивного изнашивания; установившегося изнашивания с постоянной скоростью износа; усталостного или температурного изнашивания с резким возрастанием интенсивности износа.

Учитывая небольшую протяженность первой зоны, зависимость математического ожидания износа по высоте l от пути резания L может быть представлена функцией:

$$\bar{l}(L) = \bar{l}_y + \bar{I}_l L, \text{ мм}, \quad (8.42)$$

где \bar{l}_y – математическое ожидание условного начального износа по высоте, мм; \bar{I}_l – математическое ожидание интенсивности изнашивания по высоте, мм/км.

Между линейными износами по высоте и по задней грани существует зависимость

$$\Delta \approx l[tg(\beta + \delta) - tg\beta], \quad (8.43)$$

где δ – угол заострения резца, °; β – передний угол, подставляется со своим знаком, °.

Анализ большого числа исследований, выполненных на породах с различными физико-механическими свойствами, показал, что условный начальный износ по задней грани изменяется в пределах $\Delta_y = 0,2 \dots 1,3$ мм. Причем нижняя граница относится к некрепким малоабразивным породам, а верхняя – к крепким абразивным.

При отсутствии данных для конкретных условий эксплуатации при выборе Δ_y предлагается указанный интервал варьирования разбить на две части. Полагая, что случайная величина Δ_y распределена по нормальному закону, найдем математическое ожидание $\bar{\Delta}_y$ и коэффициент вариации при шестисигмовом покрытии интервала варьирования:

- для некрепких малоабразивных пород

$$\bar{\Delta}_y = (0,2 + 0,75)/2 \approx 0,5; \quad \nu_y = S_{\Delta} / \bar{\Delta}_y = (0,8 - 0,2)/6/0,5 = 0,2; \quad (8.44)$$

- для крепких абразивных пород

$$\bar{\Delta}_y = (0,75 + 1,3)/2 \approx 1,1; \quad \nu_y = S_{\Delta} / \bar{\Delta}_y = (1,3 - 0,8)/6/1,1 \approx 0,1, \quad (8.45)$$

где S_{Δ} - среднее квадратическое отклонение, равное интервалу варьирования, деленному на 6 («шестисигмовая» зона).

Для расчета гамма-процентной наработки до отказа L_{γ} при изнашивании горных инструментов представим модель формирования параметрического отказа в соответствии с закономерностью

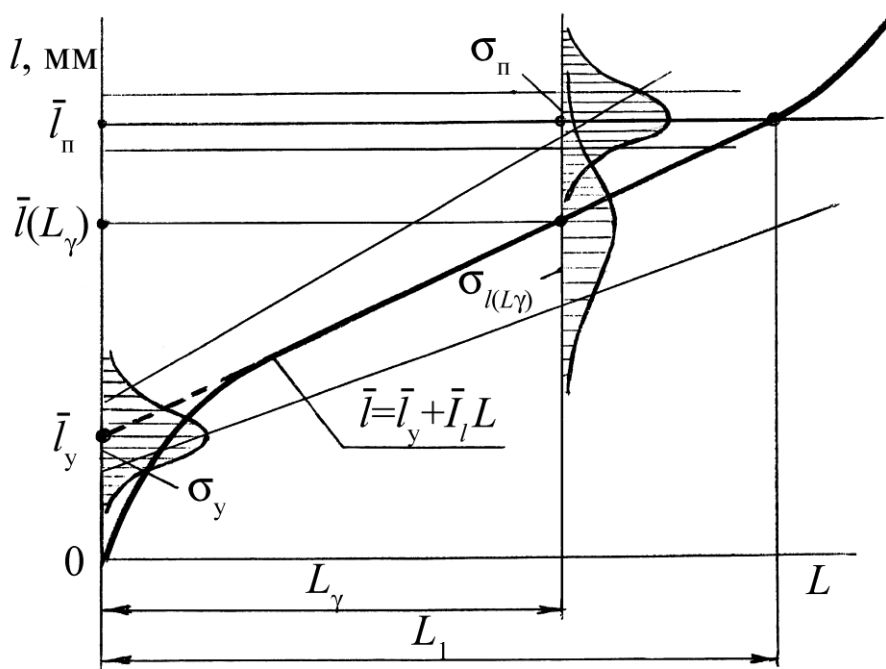


Рис.8.6. Модель параметрического отказа при изнашивании горных инструментов при резании породы:

L_1 и L_{γ} - средняя и гамма-процентная наработки до отказа; $\bar{l}_y, \bar{l}, \bar{l}_{II}$ - математические ожидания начального условного, текущего и предельно допустимого износов по высоте; $\sigma_y, \sigma_{l(L_{\gamma})}, \sigma_1$ - средние квадратические отклонения начального условного, текущего и предельно допус-

(8.42) (рис.8.6).

Интенсивность изнашивания по высоте \bar{I}_l может быть рассчитана по одной из ниже приведенных формул:

- для сплавов марки ВК8 и ВК6

$$\bar{I}_l = 0,145 \cdot 10^{-3} \bar{a} \bar{P}_K, \text{ мм/км}; \quad (8.46)$$

- в зависимости от твердости сплава по Роквеллу (HRA) и Виккерсу (HV)

$$\bar{I}_l = 5,5 \cdot 10^{26} \bar{a} \bar{P}_K e^{-0,8HRA}, \text{ мм/км}; \quad (8.47)$$

$$\bar{I}_l = 9,35 \cdot \bar{a} \bar{P}_K e^{-0,0089HV}, \text{ мм/км}; \quad (8.48)$$

- в зависимости от содержания кобальта (Co) в % для сплавов среднезернистых группы ВК, и крупнозернистых групп ВКВ и ВКВК

$$\bar{I}_{IBK} = 1,6 \cdot 10^{-5} \bar{a} \bar{P}_K e^{0,21Co}, \text{ мм/км}; \quad (8.49)$$

$$\bar{I}_{IBKB} = 5 \cdot 10^{-5} \bar{a} \bar{P}_K e^{0,21Co}, \text{ мм/км}; \quad (8.50)$$

$$\bar{I}_{IBKBK} = 2,2 \cdot 10^{-5} \bar{a} \bar{P}_K e^{0,21Co}, \text{ мм/км}, \quad (8.51)$$

где \bar{a} – абразивность по Л.И. Барону и А.В. Кузнецову, мг; \bar{P}_K – контактная прочность по Л.И.Барону и Л.Б. Глатману, МПа.

Полагая, что случайные величины l_{II} и $l(L)$ подчиняются нормальному закону распределения как результаты измерений (это подтверждается центральной предельной теоремой Ляпунова), вероятность безотказной работы $p(L)$ можно найти по квантили нормированного нормального распределения (см. рис. 8.6)

$$u_p = \frac{\bar{l}_{II} - \bar{l}(L)}{\sqrt{\sigma_{II}^2 + \sigma_{l(L)}^2}}, \quad (8.52)$$

где \bar{l}_{II} , σ_{II} – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение предельно допустимого износа по высоте; $\sigma_{l(L)}$ – среднее квадратическое отклонение текущего значения износа по высоте, которое согласно зависимости (8.42) и следствию о распределении линейной комбинации независимых нормально распределенных величин определяется по формуле:

$$\sigma_{l(L)} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_l^2 L^2}, \quad (8.53)$$

где σ_l – среднее квадратическое отклонение интенсивности изнашивания по высоте.

Выразив средние квадратические отклонения через коэффициенты вариации $\sigma_{\Pi} = \bar{l}_{\Pi} v_{\Pi}$, $\sigma_y = \bar{l}_y v_y$, $\sigma_I = \bar{l}_I v_I$ и подставив их в выражение (8.52), получим

$$u_p = - \frac{\bar{l}_{\Pi} - \bar{l}_y - \bar{l}_I L}{\sqrt{\bar{l}_{\Pi}^2 v_{\Pi}^2 + \bar{l}_y^2 v_y^2 + \bar{l}_I^2 v_I^2 L^2}}$$

(8.54)

Решая уравнение (8.54) относительно $L=L_{\gamma}$, после преобразований найдем

$$L_{\gamma} = \frac{(\bar{l}_{\Pi} - \bar{l}_y) + u_p \sqrt{(\bar{l}_{\Pi} - \bar{l}_y)^2 v_I^2 + (\bar{l}_{\Pi}^2 v_{\Pi}^2 + \bar{l}_y^2 v_y^2)(1 - u_p^2 v_I^2)}}{\bar{l}_I (1 - u_p^2 v_I^2)}, \quad (8.55)$$

где u_p следует подставлять со знаком «-».

Если в формулах расчета интенсивности изнашивания по высоте пренебречь рассеянием показателей твердости и содержания кобальта, считая их малыми по сравнению с рассеянием контактной прочности и абразивности, то коэффициент вариации интенсивности изнашивания v_I рассчитывается как для произведения двух независимых случайных величин

$$v_I = \sqrt{v_a^2 v_{P_K}^2 + v_a^2 + v_{P_K}^2}. \quad (8.56)$$

Пример. Рассчитать гамма-процентные наработки до параметрического отказа L_{γ} для резцов типа ШБМ, армированных твердым сплавом марки ВК, применяемым по глинистым сланцам с $\bar{P}_K=400$ МПа и $\bar{a}=10$ мг, при вероятностях безотказной работы $p(L)=0,5 \dots 0,9999$. Построить график зависимости L_{γ} от $p(L)$.

Решение. Учитывая, что глинистые сланцы относятся к некрепким малоабразивным породам, то принимаем из выражения (8.44) $\bar{\Delta}_y=0,5$ и $v_y=0,2$. Для резцов типа ШБМ при $\beta=0^\circ$ и $\delta=80^\circ$, используя зависимость (8.43), находим $\bar{l}_y=0,09$ мм. Принимая предельно допустимый износ по задней грани равным толщине армирующей пластинки $\bar{\Delta}_{\Pi}=8$ мм, по формуле (8.43) находим математическое ожидание предельно допустимого износа по высоте $\bar{l}_{\Pi}=1,4$ мм. Если принять интервал варьирования Δ_{Π} в пределах $7 \dots 9$ мм, то при доверительной вероятности $P=0,95$, соответствующей четырехсигмовому покрытию этого интервала, коэффициент вариации $v_{\Pi} = (9 - 7)/4/8 = 0,06$. Для расчетов интенсивности изнашивания по высоте \bar{l}_I воспользуемся формулой (8.47). Так как отсутствуют

данные конкретных условий эксплуатации, то, используя классификационные шкалы горных пород по контактной прочности и абразивности, для глинистых сланцев устанавливаем $\nu_{P_k} = 0,33$ и $\nu_a = 0,38$. Находим коэффициент вариации интенсивности изнашивания по высоте

$$\nu_I = \sqrt{\nu_a^2 \nu_{P_k}^2 + \nu_a^2 + \nu_{P_k}^2} = \sqrt{0,38^2 \cdot 0,33^2 + 0,38^2 + 0,33^2} = 0,5186 \approx 0,52$$

Подставив полученные значения в формулу (8.55), после преобразований получим

$$L_\gamma = \frac{1,31 + u_p \sqrt{0,464 + 0,00738(1 - u_p^2 0,27)}}{0,58(1 - u_p^2 0,27)}, \text{ мм/км.}$$

Результаты вычислений сведены в таблицу

$p(L)$	0,5	0,8	0,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,999	0,9999
u_p	0	-0,842	-1,282	-1,645	-1,751	-1,881	-2,054	-2,326	-3,090	-3,719
L_γ , м	2259	1563	1343	1202	1166	1122	1073	1000	837	735

Из графика (рис.8.7) следует, что интенсивность уменьшения гамма-процентной наработки до отказа L_γ до вероятности безотказной работы $p(L)=0,95 \dots 0,96$ практически постоянная, а на участке $p(L)=0,97 \dots 0,99$ существует участок перегиба, после которого происходит резкое ее падение. Поэтому назначение гамма-процентной наработки инструментов горных машин при резании пород до отказа следует производить по вероятности безотказной работы, которая должна быть пронормирована по тяжести последствий, к которым приводит отказ.

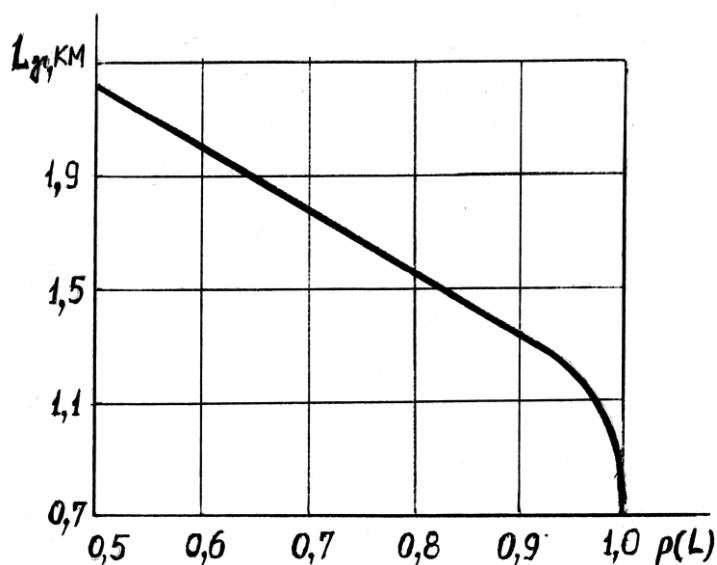


Рис. 8.7. Зависимость гамма-процентной наработки до отказа от вероятности безотказной работы для резцов типа ШБМ.

Сертификационные испытания машин.

Практическое занятие 15.

Сертификационные испытания – это элемент системы мероприятий, направленных на подтверждение соответствия фактических характеристик продукции требованиям НТД с целью получения достоверной информации, при взаимоотношениях между изготовителями и потребителями продукции. Эти испытания, как правило, проводят независимые от производителя испытательные центры (по многим видам промышленных изделий эти центры могут быть расположены на территории других государств). Например, сертификация задвижек ОАО «Тяжпромарматура»: центр сертификации – фирма Р-ТЮВ, Германия.

По результатам испытаний выдаётся сертификат или знак соответствия продукции требованиям НТД, который предполагает взаимное признание результатов испытаний поставщиком и потребителем продукции, что особенно важно при внешнеторговых операциях. Программу и методы испытаний устанавливают в сертификационной документации и указывают в положении по сертификации данного вида продукции с учётом особенностей её изготовления, испытаний и поставки.

Деятельность по сертификации в России законодательно регулируется и обеспечивается:

- законодательными актами (законы Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг», «О стандартизации», «Об обеспечении единства измерений»);
- законодательными актами Российской Федерации, направленными на решение отдельных социально-экономических задач и предусматривающими использование для этой цели обязательной сертификации (сейчас их около 40);
- Указами Президента и нормативными актами Правительства Российской Федерации (сейчас их более 60).

Остановимся на основных документах.

Закон «О сертификации продукции и услуг». Общие положения.

Понятие сертификации. Законодательство РФ о сертификации.

Сертификация продукции - это деятельность по подтверждению соответствия продукции установленным требованиям.

Сертификация осуществляется в целях:

- создание условий для деятельности предприятий, учреждений, организаций и предпринимателей на едином товарном рынке Российской Федерации, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;
- содействия потребителям в компетентном выборе продукции;

защиты потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя);
контроля безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
подтверждения показателей качества продукции, заявленных изготовителем.

Сертификация может иметь обязательный и добровольный характер.

Обязательная сертификация осуществляется в случаях, предусмотренных законодательными актами Российской Федерации. Организация и проведение работ по обязательной сертификации возлагаются на Госстандарт России, а в случаях, предусмотренных законодательными актами Российской Федерации в отношении отдельных видов продукции, могут быть возложены на другие государственные органы управления Российской Федерации.

**Исходные понятия теории вероятности и математической статистики.
Статистическая оценка неизвестных параметров. Проверка
статистических гипотез. Регрессивный анализ результатов
эксперимента.**

Практическое занятие 16.

Понятием, наиболее употребляемым в теории вероятностей, является **событие**, т.е. всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. **Опытом** или **испытанием** называется физический процесс, в ходе которого осуществляются события.

Предположим, что мы проводим испытания, регистрируя каждый раз, произошло ли интересующее нас случайное событие A или нет. **Относительной частотой** (или просто **частотой**) случайного события A называется отношение числа m появления этого события к общему числу n проведенных испытаний. Относительная частота m/n обычно обладает статистической устойчивостью в том смысле, что при многократном повторении серии испытаний ее значения мало меняются, как бы группируясь относительно некоторого случайного числа. Устойчивость частоты отражает объективное свойство случайного события, заключающееся в определении степени его возможности.

Мера объективной возможности случайного события A называется его **вероятностью** и обозначается $P(A)$. Именно около числа $P(A)$ группируются относительные частоты события A . Таким образом, вероятность связана только с самим случайным событием, но относительная частота зависит ещё и от произведенных испытаний.

В классической постановке **вероятность** любого события A (**статистическая вероятность**) равна отношению числа m случаев, благоприятствующих этому событию, к общему числу n всех случаев:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (3.1)$$

Событие, которое в определенных условиях происходит обязательно, называется **достоверным**, не может произойти – **невозможным**, может произойти, но может и не произойти – **случайным**. Вероятность достоверного события равна единице, вероятность невозможного события равна нулю.

Если в данном опыте появление события A исключает появление события B , то такие события называются **несовместными**. Если в данном опыте при осуществлении события A возможно появление события B , то такие события называются **совместными**.

Событие \bar{A} , состоящее в том, что событие A в опыте не осуществляется, называются **противоположными**. Например, отказ и безотказная работа.

Если вероятность появления события A не зависит от появления события B , то такие события называются **независимыми**. В противном случае события называются **зависимыми**.

Условной вероятностью события A , $P(A/B)$, называется вероятность осуществления события A при условии, что произошло событие B .

Случайные события образуют **полную группу**, если при каждом повторении испытаний должно произойти хотя бы одно из них.

При расчетах надежности различных элементов и систем оборудования часто используют теоремы сложения и умножения вероятностей, с помощью которых определяют вероятности суммы и произведения (рис.3.1).

Суммой событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется сложное событие, состоящее в появлении хотя бы одного из событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, (или нескольких из них, или всех):

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \quad (3.2)$$

Произведением событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ называется событие A , состоящее в одновременном исполнении всех:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (3.3)$$

Вероятность суммы n несовместных событий A_i равна сумме вероятностей этих событий:

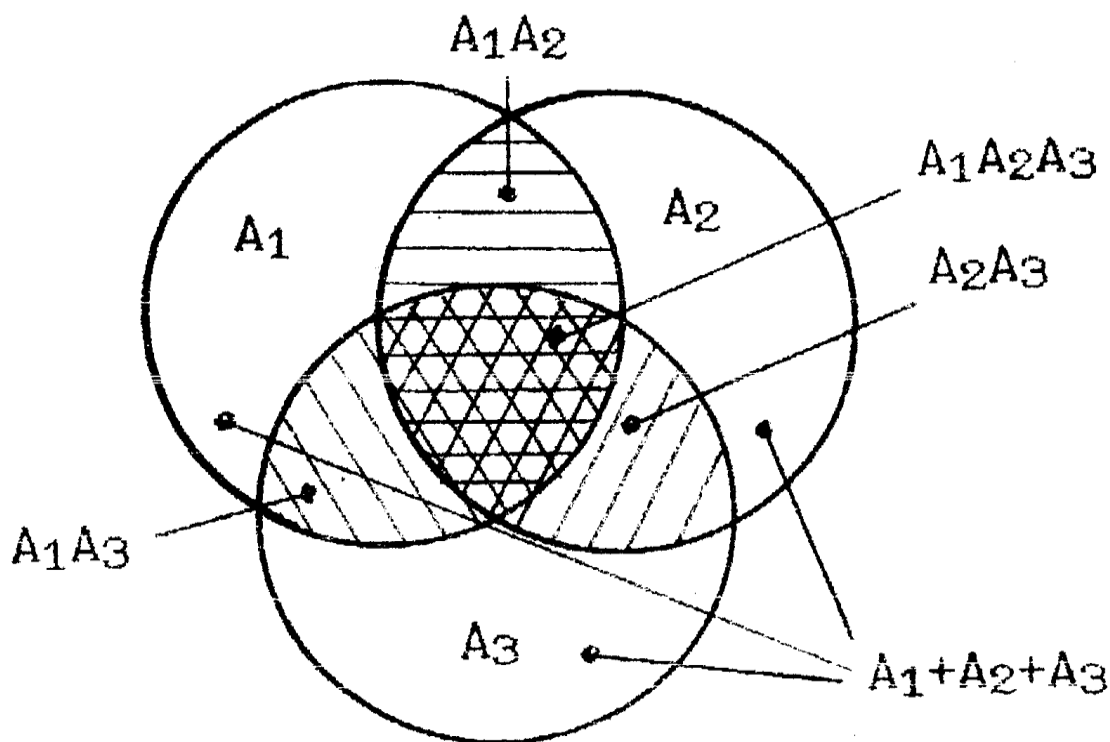


Рис. 3.1. Графическое представление операций над событиями

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.4)$$

Следствие 1. Вероятность суммы событий, образующих полную группу, равна единице.

Следствие 2. Сумма вероятностей противоположных событий равна единице.

Вероятность суммы двух совместных событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного осуществления:

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 A_2) \quad (3.5)$$

Вероятность суммы трех совместных событий:

$$P(A_1 + A_2 + A_3) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1 A_2) - P(A_1 A_3) - P(A_2 A_3) + P(A_1 A_2 A_3) \quad (3.6)$$

Вероятность суммы n совместных событий:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{ij} P(A_i A_j) + \sum_{ijk} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n) \quad (3.7)$$

Из формул (3.5)-(3.7) следует, что для определения вероятности суммы совместных событий, кроме понятия «сумма событий» используется и понятие «произведение событий».

Вероятность произведения n независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.8)$$

Если два события A_1 и A_2 являются **зависимыми**, то **вероятность их произведения** равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место:

$$P(A_1 A_2) = P(A_1)P(A_2/A_1) = P(A_2)P(A_1/A_2) \quad (3.9)$$

откуда условная вероятность определяется соотношением

$$P(A_1/A_2) = \frac{P(A_1)P(A_2/A_1)}{P(A_2)}.$$

(3.10)

В общем случае **вероятность произведения для n зависимых событий**:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1)P(A_2/A_1)P(A_3/A_2 A_1) \dots P(A_n/A_2 A_1 \dots A_{n-1})$$

где $P(A_2/A_1), \dots, P(A_n/A_2 A_1 \dots A_{n-1})$ - условные вероятности зависимых событий, вычисленные при условии, что произошли все предшествующие события.

Требуется определить вероятность события A , которое может произойти вместе с одним из событий $H_1, \dots, H_i, \dots, H_n$, образующих полную группу, т.е.

$$\sum_{i=1}^n P(H_i) = 1.$$

Так как заранее неизвестно, с каким из событий H_i произойдет событие A , то события $H_1, \dots, H_i, \dots, H_n$ называют **гипотезами**. Согласно правилу для суммы событий (3.2)

$$A=H_1A+...+H_iA+...+H_nA.$$

Комбинации H_iA несовместны, поскольку несовместны гипотезы H_i . Применив к ним правило сложения (3.4), получим:

$$P(A)=P(H_1A)+...+P(H_iA)+...+P(H_nA)=\sum_{i=1}^n P(H_iA) \quad (3.11)$$

Используя в формуле (3.11) к событию H_iA правило умножения для зависимых событий (3.9), получим **формулу полной вероятности**:

$$P(A)=P(H_1)P(A/H_1)+...+P(H_i)P(A/H_i)+...+P(H_n)P(A/H_n)=\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i) \quad (3.12)$$

Если событие A может наступить только вместе с одним из событий $H_1, ..., H_i, ..., H_n$, образующих **полную группу несовместных событий и называемых гипотезами**, то вероятность события A равна сумме произведений вероятности каждого из событий $H_1, ..., H_i, ..., H_n$ на соответствующую условную вероятность события A .

Если формулу полной вероятности (3.12) подставить в выражение для условной вероятности (3.10), то найдем условные вероятности гипотез:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A/H_i)}{P(A)} = \frac{P(H_i)P(A/H_i)}{P(H_1)P(A/H_1)+...+P(H_n)P(A/H_n)},$$

или

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A/H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i)}. \quad (3.13)$$

Это – **формулы Байеса** (по имени английского математика Т.Байеса, опубликованные в 1764г.). Выражение в знаменателе – формула полной вероятности.

Обычно анализ вероятностей интересующих нас событий начинается рассмотрением предварительных, *априорных* значений этих вероятностей. Затем, получив новую информацию из таких источников, как выборка, отчет, испытание и т.д., можно уточнить значения априорных вероятностей. Новые значения вероятностей для тех же событий будут уже *апостериорными* (последопытными).

Решения задач с использованием формулы полной вероятности и формул Байеса удобнее представлять в виде табл.3.2.

Таблица 3.2.

Гипотезы H_i	В е р о я т н о с т и			
	Априорные $P(H_i)$	Условные $P(A/H_i)$	Совместные $P(H_i) P(A/H_i)$	Апостериорные $P(H_i/A)$
H_1	$P(H_1)$	$P(A/H_1)$	$P(H_1) P(A/H_1)$	$P(H_1/A)$
...
H_n	$P(H_n)$	$P(A/H_n)$	$P(H_n) P(A/H_n)$	$P(H_n/A)$

	$\sum_{i=1}^n P(H_i) = 1$		$\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i) = P(A)$	$\sum_{i=1}^n P(H_i/A) = 1$
--	---------------------------	--	--------------------------------------	-----------------------------

В технической диагностике эти формулы положены в основу метода Байеса – одного из статистических методов распознавания технического состояния объекта.

Основы дисперсионного анализа. Однофакторный дисперсионный анализ. Двухфакторный дисперсионный анализ. Многофакторный дисперсионный анализ.

Практическое занятие 17.

Однофакторный дисперсионный анализ

Задачей дисперсионного анализа является изучение влияния одного или нескольких факторов на рассматриваемый признак.

Однофакторный дисперсионный анализ используется в тех случаях, когда есть в распоряжении три или более независимые выборки, полученные из одной генеральной совокупности путем изменения какого-либо независимого фактора, для которого по каким-либо причинам нет количественных измерений.

Для этих выборок предполагают, что они имеют разные выборочные средние и одинаковые выборочные дисперсии. Поэтому необходимо ответить на вопрос, оказал ли этот фактор существенное влияние на разброс выборочных средних или разброс является следствием случайностей, вызванных небольшими объемами выборок. Другими словами если выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности, то разброс данных между выборками (между группами) должен быть не больше, чем разброс данных внутри этих выборок (внутри групп).

Пусть x_{ik} – i – элемент ($i = \overline{1, n_k}$) k – выборки ($k = \overline{1, m}$), где m – число выборок, n_k – число данных в k – выборке. Тогда \bar{x}_k – выборочное среднее k – выборки определяется по формуле

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_{ik}.$$

Общее среднее вычисляется по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} x_{ik}, \text{ где } n = \sum_{k=1}^m n_k.$$

Основное тождество дисперсионного анализа имеет следующий вид:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 – сумма квадратов отклонений выборочных средних \bar{x}_k от общего среднего \bar{x} (сумма квадратов отклонений между группами); Q_2 – сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений x_{ik} от выборочной средней \bar{x}_k (сумма квадратов отклонений внутри групп); Q – общая сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений x_{ik} от общего среднего \bar{x} .

Расчет этих сумм квадратов отклонений осуществляется по следующим формулам:

$$Q = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ik} - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} x_{ik}^2 - n\bar{x}^2,$$

$$Q_1 = \sum_{k=1}^m n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^m n_k \bar{x}_k^2 - n\bar{x}^2,$$

$$Q_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} x_{ik}^2 - \sum_{k=1}^m n_k \bar{x}_k^2.$$

В качестве критерия необходимо воспользоваться критерием Фишера:

$$F = \frac{Q_1/(m-1)}{Q_2/(n-m)}.$$

Если расчетное значение критерия Фишера будет меньше, чем табличное значение $F_{\lambda; m-1; n-m}^F$ – нет оснований считать, что независимый фактор оказывает влияние на разброс средних значений, в противном случае, независимый фактор оказывает существенное влияние на разброс средних значений (λ – уровень значимости, уровень риска, обычно для экономических задач $\lambda=0,05$).

Недостаток однофакторного анализа: невозможно выделить те выборки, которые отличаются от других. Для этой цели необходимо использовать метод Шеффе или проводить парные сравнения выборок.

Пример 3.1. Три группы продавцов продавали штучный товар, расфасованный в различные упаковки. После окончания срока распродажи был произведен тестовый контроль над случайно отобранными продавцами из каждой группы. Были получены следующие результаты (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1

Номер группы	Число продаж, которые сделали продавцы, x_{ik}	Общее количество продаж	Количество продавцов, n_k
1	1 3 2 1 0 2 1	10	7
2	2 3 2 1 4 - -	12	5
3	4 5 3 - - - -	12	3

Если число выборок $m=3$, число продаж во всех выборках $n=15$, то:

$$\bar{x}_1 = 10/7 = 1,428 ;$$

$$\bar{x}_2 = 12/5 = 2,4 ;$$

$$\bar{x}_3 = 12/3 = 4 ;$$

$$\bar{x} = (10 + 12 + 12)/15 = 2,226.$$

Если

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n_k} x_{ik}^2 = 1 + 9 + 4 + 1 + 4 + 1 + 4 + 9 + 4 + 1 + 16 + 16 + 25 + 9 = 104 ,$$

$$\sum_{k=1}^m n_k \bar{x}_k^2 = 7 \cdot 1,428^2 + 5 \cdot 2,4^2 + 3 \cdot 4^2 = 91,074,$$

тогда

$$Q = 104 - 15 \cdot 2,226^2 = 26,93,$$

$$Q_1 = 91,074 - 15 \cdot 2,226^2 = 14,01,$$

$$Q_2 = Q - Q_1 = 26,93 - 14,01 = 12,92.$$

Вычислим критерий Фишера

$$F = \frac{14,01 / 2}{12,92 / 12} = 6,52.$$

Сравнивая это значение с табличным $F > F_{0,05;2;12} = 3,885$ (приложение 1), делаем вывод, что упаковка (особенно красочная!) влияет на количество распродаж.

Исходные понятия теории эксперимента. Планирование регрессивного эксперимента.

Планирование эксперимента для построения моделей первого порядка.

Планирование эксперимента для построения моделей второго порядка.

Планирование эксперимента по выделению существенных факторов.

Планирование экстремального эксперимента. Метод крутого восхождения Бокса-Уилсона.

Практическое занятие 18, 19, 20.

1. Основные понятия и определения

Под экспериментом будем понимать совокупность операций совершаемых над объектом исследования с целью получения информации о его свойствах. Эксперимент, в котором исследователь по своему усмотрению может изменять условия его проведения, называется активным экспериментом. Если исследователь не может самостоятельно изменять условия его проведения, а лишь регистрирует их, то это пассивный эксперимент.

Важнейшей задачей методов обработки полученной в ходе эксперимента информации является задача построения математической модели изучаемого явления, процесса, объекта. Ее можно использовать и при анализе процессов и при проектировании объектов. Можно получить хорошо аппроксимирующую математическую модель, если целенаправленно применяется активный эксперимент. Другой задачей обработки полученной в ходе эксперимента информации является задача оптимизации, т.е. нахождения такой комбинации

влияющих независимых переменных, при которой выбранный показатель оптимальности принимает экстремальное значение.

Опыт – это отдельная экспериментальная часть.

План эксперимента – совокупность данных определяющих число, условия и порядок проведения опытов.

Планирование эксперимента – выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям, совокупность действий направленных на разработку стратегии экспериментирования (от получения априорной информации до получения работоспособной математической модели или определения оптимальных условий). Это целенаправленное управление экспериментом, реализуемое в условиях неполного знания механизма изучаемого явления.

В процессе измерений, последующей обработки данных, а также формализации результатов в виде математической модели, возникают погрешности и теряется часть информации, содержащейся в исходных данных. Применение методов планирования эксперимента позволяет определить погрешность математической модели и судить о ее адекватности. Если точность модели оказывается недостаточной, то применение методов планирования эксперимента позволяет модернизировать математическую модель с проведением дополнительных опытов без потери предыдущей информации и с минимальными затратами.

Цель планирования эксперимента – нахождение таких условий и правил проведения опытов при которых удастся получить надежную и достоверную информацию об объекте с наименьшей затратой труда, а также представить эту информацию в компактной и удобной форме с количественной оценкой точности.

Пусть интересующее нас свойство (Y) объекта зависит от нескольких (n) независимых переменных (X_1, X_2, \dots, X_n) и мы хотим выяснить характер этой зависимости - $Y=F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, о которой мы имеем лишь общее представление. Величина Y – называется “отклик”, а сама зависимость $Y=F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ – “функция отклика”.

Отклик должен быть определен количественно. Однако могут встречаться и качественные признаки Y . В этом случае возможно применение рангового подхода. Пример рангового подхода - оценка на экзамене, когда одним числом оценивается сложный комплекс полученных сведений о знаниях студента.

Независимые переменные X_1, X_2, \dots, X_n – иначе факторы, также должны иметь количественную оценку. Если используются качественные факторы, то каждому их уровню должно быть присвоено какое-либо число. Важно выбирать в качестве факторов лишь независимые переменные, т.е. только те которые можно изменять, не затрагивая другие факторы. Факторы должны быть однозначными. Для построения эффективной математической модели целесообразно провести предварительный анализ значимости факторов (степени влияния на функцию), их ранжирование и исключить малозначащие факторы.

Диапазоны изменения факторов задают область определения Y . Если принять, что каждому фактору соответствует координатная ось, то полученное пространство называется факторным пространством. При $n=2$ область определения Y представляется собой прямоугольник, при $n=3$ – куб, при $n > 3$ - гиперкуб.

При выборе диапазонов изменения факторов нужно учитывать их совместимость, т.е. контролировать, чтобы в этих диапазонах любые сочетания факторов были бы реализуемы в опытах и не приводили бы к абсурду. Для каждого из факторов указывают граничные значения

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}, i=1, \dots, n.$$

Регрессионный анализ функции отклика предназначен для получения ее математической модели в виде уравнения регрессии

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n; B_1, B_2, \dots, B_m) + e,$$

где B_1, \dots, B_m – некоторые коэффициенты; e – погрешность.

Среди основных методов планирования, применяемых на разных этапах исследования, используют:

планирование отсеивающего эксперимента, основное значение которого выделение из всей совокупности факторов группы существенных факторов, подлежащих дальнейшему детальному изучению;

планирование эксперимента для дисперсионного анализа, т.е. составление планов для объектов с качественными факторами;

планирование регрессионного эксперимента, позволяющего получать регрессионные модели (полиномиальные и иные);

планирование экстремального эксперимента, в котором главная задача – экспериментальная оптимизация объекта исследования;

планирование при изучении динамических процессов и т.д.

Инициатором применения планирования эксперимента является Рональд А. Фишер, другой автор известных первых работ – Френк Йетс. Далее идеи планирования эксперимента формировались в трудах Дж. Бокса, Дж. Кифера. В нашей стране - в трудах Г.К. Круга, Е.В. Маркова и др.

В настоящее время методы планирования эксперимента заложены в специализированных пакетах, широко представленных на рынке программных продуктов, например:

StatGraphics, Statistica, SPSS, SYSTAT и др.

Представление результатов экспериментов

При использовании методов планирования эксперимента необходимо найти ответы на 4 вопроса:

Какие сочетания факторов и сколько таких сочетаний необходимо взять для определения функции отклика?

Как найти коэффициенты B_0, B_1, \dots, B_m ?

Как оценить точность представления функции отклика?

Как использовать полученное представление для поиска оптимальных значений Y ?

Геометрическое представление функции отклика в факторном пространстве X_1, X_2, \dots, X_n называется поверхностью отклика (рис. 1).

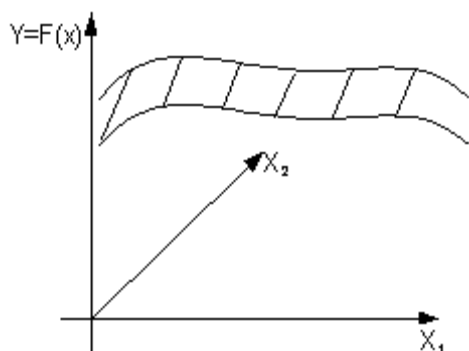


Рис. 1. Поверхность отклика

Если исследуется влияние на Y лишь одного фактора X_1 , то нахождение функции отклика - достаточно простая задача. Задавшись несколькими значениями этого фактора, в результате опытов получаем соответствующие значения Y и график $Y = F(X)$ (рис. 2).

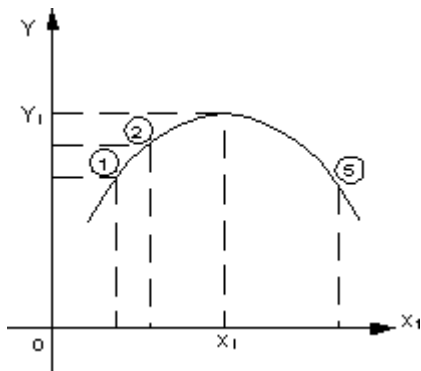


Рис. 2. Построение функции отклика одной переменной по опытным данным

По его виду можно подобрать математическое выражение функции отклика. Если мы не уверены, что опыты хорошо воспроизводятся, то обычно опыты повторяют несколько раз и получают зависимость с учетом разброса опытных данных.

Если факторов два, то необходимо провести опыты при разных соотношениях этих факторов. Полученную функцию отклика в 3х-мерном пространстве (рис. 1) можно анализировать, проводя ряд сечений с фиксированными значениями одного из факторов (рис. 3). Вычлененные графики сечений можно аппроксимировать совокупностью математических выражений.

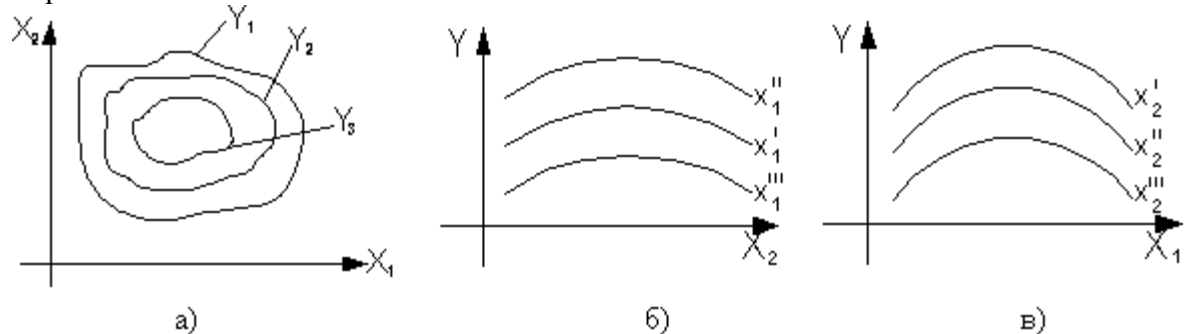


Рис. 3. Сечения поверхности отклика при фиксированных откликах (а) и переменных (б,в). При трех и более факторах задача становится практически неразрешимой. Если и будут найдены решения, то использовать совокупность выражений достаточно трудно, а часто и не реально.

Например, пусть необходимо исследовать влияние U , f и R_r на M_n и P_2 асинхронного двигателя (АД) (рис. 4).

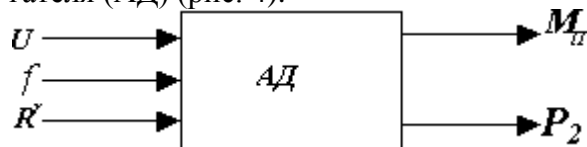


Рис. 4. Исследование влияния U , f и R_r на M_n и P_2 АД

Если в диапазоне изменения каждого фактора взять хотя бы по пять точек

$U, В$	170	180	190	200	210	220
$f, Гц$	40	45	50	55	60	65
$R_r, Ом$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

то для того чтобы выполнить опыты при всех возможных сочетаниях значений факторов (их три) необходимо выполнить $5^3=125$ опытов и сформировать по $5^2=25$ кривых для каждой из двух функций отклика. Если мы хотим хотя бы продублировать опыты чтобы снизить погрешность, то число опытов пропорционально возрастает, поэтому произвольное выполнение опытов при числе факторов более двух и использование их результатов - практически нереально.

2. Разложение функции отклика в степенной ряд, кодирование факторов

Если заранее не известно аналитическое выражение функции отклика, то можно рассматривать не саму функцию, а ее разложение, например в степенной ряд в виде полинома $Y=B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n + B_{12}X_1X_2 + \dots + B_{nn-1}X_nX_{n-1} + B_{11}X_1^2 + \dots + B_{nn}X_n^2 + \dots$. Разложение в степенной ряд функции возможно в том случае, если сама функция является непрерывной и гладкой. На практике обычно ограничиваются числом членов степенного ряда и аппроксимируют функцию полиномом некоторой степени. Факторы могут иметь разные размерности (А, В, Вт, об/мин) и резко отличаться количественно. В теории планирования эксперимента используют кодирование факторов.

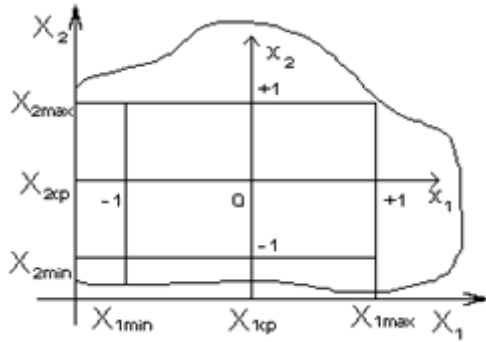


Рис. 5. Пространство кодированных факторов

Эта операция заключается в выборе нового масштаба для кодированных факторов (рис. 5), причем такого, чтобы минимальное значение кодированных факторов соответствовало “-1”, а максимальное значение “+1”, а также в переносе начала координат в точку с координатами $X_{1cp}, X_{2cp}, \dots, X_{ncp}$

$$X_{icp} = \frac{X_{imin} + X_{imax}}{2}$$

Текущее значение кодированного фактора

$$x_i = \frac{X_i - X_{icp}}{X_{imax} - X_{imin}} = \frac{X_i - X_{icp}}{X_{imax} - X_{icp}} = \frac{2X_i - X_{imax} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}}$$

где X_i – именованное (абсолютное) значение фактора; x_i – кодированное значение фактора; $X_{icp} - X_{imin} = X_{imax} - X_{icp}$ – интервал варьирования фактора.

Граница совместимости факторов указана на рис. 5 в виде кривой линии.

Если фактор изменяется дискретно, например он является качественным, то каждому уровню этого кодированного фактора присваиваются числа в диапазоне от +1 до -1. Так при двух уровнях это +1 и -1, при трех уровнях +1, 0, -1 и т.д.

Функция отклика может быть выражена через кодированные факторы $Y=f(x_1, \dots, x_n)$ и записана в полиномиальном виде

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_nx_n+b_{12}x_1x_2+\dots+b_{nn-1}x_{n-1}x_n+b_{11}x_1^2+\dots+b_{nn}x_n^2+\dots$$

Очевидно, что $B_i \neq b_i$, но

$$Y=F(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n) = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Для полинома, записанного в кодированных факторах, степень влияния факторов или их сочетаний на функцию отклика определяется величиной их коэффициента b_i . Для полинома в именованных факторах величина коэффициента B_i еще не говорит однозначно о степени влияния этого фактора или их сочетаний на функцию отклика.

Степенной вид полинома может быть записан в более компактной форме

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i=1, \dots, n-1 \\ j=i, \dots, n}} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1, \dots, n-2 \\ j=i, \dots, n-1 \\ k=j, \dots, n}} b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^n b_{iii} x_i^3 \dots$$

При определении общего числа членов степенного ряда количество парных сочетаний для n факторов в полиноме, тройных сочетаний, i -ных сочетаний $\binom{n}{i}$ при $n > i$ находится по соотношению

$$C_n^i = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \dots (n-i+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots i}.$$

Например, для набора четырех чисел ($n=4$) - 1, 2, 3, 4 число тройных сочетаний составляет

$$C_4^3 = \frac{4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 4 - 123, 134, 124, 234.$$

Если считать, что существует фактор x_0 всегда равный 1, то

$$b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n = b_0 x_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n = \sum_{i=0}^n b_i x_i.$$

Если дополнительно все двойные, тройные и т.д. сочетания факторов, а также квадраты факторов и все соответствующие им коэффициенты обозначить через x_i и b_i , для $i=n+1, \dots, m$, то степенной ряд можно записать в виде

$$Y = \sum_{i=0}^m b_i x_i.$$

Здесь $m+1$ общее число рассматриваемых членов степенного ряда.

Для линейного полинома с учетом всех возможных сочетаний факторов

$$m+1 = 1 + C_n^1 + \dots + C_n^i + \dots + C_n^n.$$

Полный квадратичный полином выглядит следующим образом:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 = \sum_{i=0}^5 b_i x_i,$$

где $x_0=1$, $x_3=x_1 x_2$, $x_4=x_1^2$, $x_5=x_2^2$, $b_3=b_{12}$, $b_4=b_{11}$, $b_5=b_{22}$.

Матричные преобразования при обработке результатов эксперимента

При матричной записи результатов различных N опытов для полиномиального представ-

ления результата $Y_U = \sum_{i=0}^m b_i x_{iU}$ будем иметь $Y = X \cdot B$; X - матрица сочетаний факторов.

$$X = \begin{vmatrix} x_{01} & x_{11} \dots & x_{i1} \dots & x_{m1} \\ x_{02} & x_{12} \dots & x_{i2} \dots & x_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0U} & x_{1U} \dots & x_{iU} \dots & x_{mU} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} \dots & x_{iN} \dots & x_{mN} \end{vmatrix}$$

N строк

$m+1$ столбец

Здесь 0, 1, ..., i , ..., m - номера членов уравнения; 1, ..., U , ..., N ... - номера опытов. Матрица X - прямоугольная, содержащая $m+1$ столбец и N строк.

Если учесть, что в матрице X элементы $x_{0U} = 1$, $U = 1, \dots, N$, то матрицу X можно записать

$$X = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{m1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1U} & x_{2U} & \dots & x_{iU} & \dots & x_{mU} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{iN} & \dots & x_{mN} \end{vmatrix}.$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_U \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} - \text{матрица столбец результатов опыта,} \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_i \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} - \text{матрица столбец коэффициента полинома.}$$

Домножим левую и правую часть этого уравнения на одну и ту же матрицу X_t – транспонированную матрицу X

$$X_t \cdot X \cdot B = X_t \cdot Y$$

Транспонированная матрица – это матрица, у которой по отношению к исходной столбцы и строки поменяны местами.

$$X_t = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0U} & \dots & x_{0N} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1U} & \dots & x_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{iU} & \dots & x_{iN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mU} & \dots & x_{mN} \end{bmatrix}$$

$m+1$ строка

N столбцов

$C = X_t \cdot X$ матрица, получившаяся в результате произведения транспонированной матрицы на исходную. Она является квадратной матрицей, содержащей $m+1$ строку и $m+1$ столбец.

$$C \cdot B = X_t \cdot Y$$

Для того чтобы получить в общем виде матрицу-столбец коэффициентов B необходимо домножить обе части последнего матричного уравнения слева на матрицу C^{-1} – матрицу обратную матрице C .

$$C^{-1} \cdot C \cdot B = C^{-1} \cdot X_t \cdot Y$$

Обратная матрица строится так (используется процедура обращения матрицы), что при умножении ее на исходную матрицу получается единичная матрица – E , у которой на главной диагонали расположены 1, а вне ее – 0.

$$C^{-1} \cdot C = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Окончательно в общем виде матрица-столбец коэффициентов полинома

$$B = C^{-1} \cdot X_t \cdot Y$$

Рассмотрим в качестве простого примера полином в виде

$$Y_U = b_0 x_0 + b_1 x_U; \quad x_0 = 1; \quad U = 1, \dots, N;$$

формируемого по результатам N опытов.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_U \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_N \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_U \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}; \quad X_t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_U & \dots & x_N \end{bmatrix};$$

$$C = X_1 \cdot X = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_U & x_N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_2 \\ 1 \cdot x_U \\ 1 \cdot x_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N & \sum_{U=1}^N x_U \\ \sum_{U=1}^N x_U & \sum_{U=1}^N x_U^2 \end{vmatrix},$$

$$C \cdot B = \begin{vmatrix} N & \sum_{U=1}^N x_U \\ \sum_{U=1}^N x_U & \sum_{U=1}^N x_U^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N \cdot b_0 + b_1 \sum_{U=1}^N x_U \\ b_0 \sum_{U=1}^N x_U + b_1 \sum_{U=1}^N x_U^2 \end{vmatrix};$$

$$X_1 \cdot Y = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_U & x_N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_U \\ Y_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{U=1}^N Y_U \\ \sum_{U=1}^N x_U Y_U \end{vmatrix}.$$

$$C \cdot B = X_1 \cdot Y;$$

$$\begin{vmatrix} N \cdot b_0 + b_1 \sum_{U=1}^N x_U \\ b_0 \sum_{U=1}^N x_U + b_1 \sum_{U=1}^N x_U^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{U=1}^N Y_U \\ \sum_{U=1}^N x_U Y_U \end{vmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{cases} N b_0 + b_1 \sum_{U=1}^N x_U = \sum_{U=1}^N Y_U \\ b_0 \sum_{U=1}^N x_U + b_1 \sum_{U=1}^N x_U^2 = \sum_{U=1}^N x_U Y_U \end{cases}.$$

Откуда решение системы относительно коэффициентов b_0 и b_1

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N Y_U \cdot \sum_{U=1}^N x_U^2 - \sum_{U=1}^N Y_U x_U \cdot \sum_{U=1}^N x_U}{N \sum_{U=1}^N x_U^2 - \left(\sum_{U=1}^N x_U \right)^2},$$

$$b_1 = \frac{N \sum_{U=1}^N Y_U x_U - \sum_{U=1}^N Y_U \cdot \sum_{U=1}^N x_U}{N \sum_{U=1}^N x_U^2 - \left(\sum_{U=1}^N x_U \right)^2}.$$

Этот результат полностью совпадает с соотношениями для такого же полинома при использовании метода наименьших квадратов, где используется численный показатель минимальности суммы квадратов отклонений во всех N опытах. Следовательно, построенный таким образом полином будет проходить самым ближайшим образом к результатам эксперимента.

3. Ортогональное планирование эксперимента

Структура матрицы C играет важную роль в реализации алгоритма определения коэффициентов аппроксимирующего полинома. Структура матрицы C зависит от выбора значений факторов в N опытах. Поэтому желательно особым образом выбирать значения факторов в опытах.

Элемент C_{ii} на главной диагонали матрицы C (i -тая строка, i -тый столбец) представляется суммой квадратов значений i -того столбца сочетаний факторов матрицы X в N опытах

$$C_{ii} = \sum_{U=1}^N x_{iU}^2, \quad i=0,1,2,\dots,m.$$

Элементы матрицы симметрично расположенные относительно главной диагонали равны между собой, то есть матрица C - симметричная.

$$C_{ij} = C_{ji}, i = 0, 1, 2 \dots m, j = 0, 1, 2 \dots m;$$

где первый индекс указывает номер столбца матрицы X, второй индекс - номер строки. При этом

$$C_{ij} = \sum_{U=1}^N x_{iU} \cdot x_{jU}, C_{ji} = \sum_{U=1}^N x_{jU} \cdot x_{iU}.$$

Чтобы существовала матрица С-1, матрица С размера (1+m; 1+m) должна быть невырожденной, то есть ее определитель должен быть отличен от нуля. Это условие выполняется, если все m+1 столбцов матрицы X линейно независимы. Кроме того, необходимо, чтобы число различных сочетаний факторов в матрице X (число опытов N) должно быть не меньше чем m+1. Это условие исходит из того, что для определения m+1 коэффициента полинома необходимо не менее m+1 уравнений (опытов).

Полученные коэффициенты В позволяют сформировать уравнение функции отклика при m+1 членах уравнения. Если точность этого уравнения оказалась недостаточной, то требуется взять уравнение с большим числом членов и начать все заново так как все коэффициенты В оказываются зависимыми друг от друга. Это возникает при использовании пассивного эксперимента. Однако если целенаправленно использовать активный эксперимент и особым образом построить матрицу сочетаний факторов в опытах X, использовать планирование эксперимента, то коэффициенты полинома определяются независимо друг от друга.

Стратегия применения планов заключается в принципе постепенного планирования – постепенного усложнения модели. Начинают с простейшей модели, находятся для нее коэффициенты, определяется ее точность. Если точность не удовлетворяет, то планирование и модель постепенно усложняются.

Задача планирования заключается в том как нужно строить матрицу X, чтобы матрица С легко обращалась и коэффициенты В определялись независимо друг от друга. Эти требования выполняется если матрица С является диагональной, то есть все элементы расположенные не на главной диагонали матрицы равны нулю

$$C_{ij} = 0; i \neq j; i = 0, 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, 2, \dots, m;$$

или

$$C = \begin{vmatrix} C_{00} & 0 \dots & 0 \dots & 0 \\ 0 & C_{11} \dots & 0 \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots & C_{ii} \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots & 0 \dots & C_{mm} \end{vmatrix}.$$

Тогда обратная матрица определяется как

$$C^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{C_{00}} & 0 \dots & 0 \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{11}} \dots & 0 \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots & \frac{1}{C_{ii}} \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots & 0 \dots & \frac{1}{C_{mm}} \end{vmatrix}.$$

В этом случае система уравнений распадается на m+1 независимых уравнения и коэффициенты полинома определяются как

$$b_i = \frac{1}{C_{ii}} \sum_{U=1}^N (x_{iU} \cdot Y_U); i = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Если учесть, что C_{ii} определяется как сумма квадратов значений факторов

$$C_{ii} = \sum_{U=1}^N x_{iU}^2,$$

то коэффициенты определяются как

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}$$

Требование выполнения условия $C_{ij} = C_{ji} = 0$ заключается в выполнении условия

$$\sum_{U=1}^N x_{iU} \cdot x_{jU} = \sum_{U=1}^N x_{jU} \cdot x_{iU} = 0,$$

где i, j - номера столбцов в матрице X ; $i = 0, 1, 2, \dots, m$; $j = 0, 1, 2, \dots, m$; при $i \neq j$

Каждый столбец матрицы X можно представить в виде вектора

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{iN} \end{bmatrix}, \quad X_j = \begin{bmatrix} x_{j1} \\ x_{j2} \\ \vdots \\ x_{jN} \end{bmatrix}.$$

$$X_i \cdot X_j = \sum_{U=1}^N x_{iU} \cdot x_{jU} = 0$$

если

то это означает, что скалярное произведение двух векторов X_i и X_j равняется нулю, то есть векторы X_i и X_j - ортогональны.

Так как любое скалярное произведение двух различных столбцов в матрице X должно быть равно нулю, то это условие называется условием ортогональности матрицы X , а соответствующее планирование эксперимента (определение сочетаний факторов) называется ортогональным планированием.

Для ортогонального планирования при учете того что $x_{0U} = 1, U = 1, \dots, N$

$$\sum_{U=1}^N x_{0U} \cdot x_{iU} = \sum_{U=1}^N x_{iU} = 0.$$

Таким образом, при ортогональном планировании сумма элементов любого столбца матрицы X , кроме первого столбца должно быть равна нулю. Это правило используется при построении плана эксперимента, то есть при определении каким образом нужно менять значения факторов в опытах. Это правило показывает, что в ортогональном планировании при четном числе уровней, на которых фиксируется каждый фактор, то эти уровни должны быть симметрично расположены относительно центральной точки $x=0$, при нечетном числе уровней должна использоваться и центральная точка (рис.6).

Кроме свойства ортогональности план может обладать свойствам насыщенности, ротатбельности и др. План является насыщенным, если общее число опытов N равняется числу неизвестных коэффициентов полинома $m+1$.

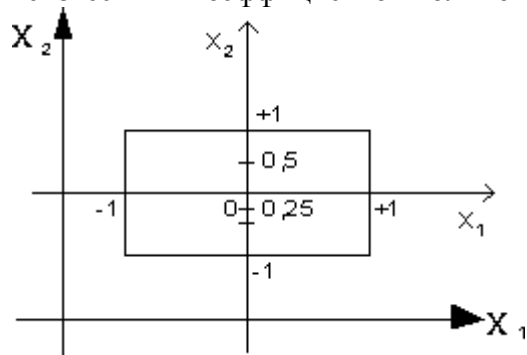


Рис. 6. Выбор уровней варьирования при ортогональном планировании

План называется ротатабельным, если дисперсия отклика одинакова на одном расстоянии от центра плана при любом направлении в факторном пространстве. В упрощенном виде это означает, что все точки плана лежат на окружности (сфере, гиперсфере).

4. Планы полного факторного эксперимента 2ⁿ (планы ПФЭ 2ⁿ)

Планы ПФЭ 2ⁿ являются простейшими планами первого порядка. Основание 2 означает, что принято два уровня варьирования, на которых фиксируются факторы. n – число факторов.

Для плана ПФЭ 2² число факторов равно двум (n=2) и число уровней фиксирования факторов также 2. Значения кодированных факторов выбираются в виде +1 и –1. Полное число возможных сочетаний значений n факторов (число опытов, а значит и число строк плана) $N=2^2=4$. Составляется план, в котором число столбцов факторов и их сочетаний равняется числу членов уравнения. Так для уравнения

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad m+1=6.$$

План ПФЭ 2² для этого уравнения представляется в следующем виде

i	0	1	2	3	4	5	
U	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 \cdot x_2$	$x_4 = x_1^2$	$x_5 = x_2^2$	Y
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	Y_3
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_4
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	4	0	0	0	4	4	

В первый столбец (i=0) во все четыре ячейки заносятся +1. Во второй столбец (i=1) заносятся единицы с чередующимися знаками (начинаем с -1). В этом случае сумма элемента столбца равняется нулю. Третий столбец заполняем единицами с чередующимися через 2 элемента знаками. Сумма элементов также равняется нулю. Геометрическое отображение плана ПФЭ 2² с указанием номеров точек плана в факторном пространстве представлено на рис. 7. Точки плана располагаются в вершинах квадрата.

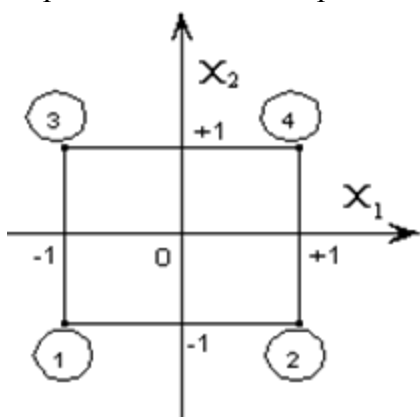


Рис. 7. Геометрическое отображение плана ПФЭ 2² в факторном пространстве

Элементы столбцов соответствующих произведениям факторов получаются путем перемножения элементов предыдущих столбцов. Такое правило позволяет гарантировать, что мы не пропустили ни одного возможного сочетания факторов в опытах и в то же время не будет повторений одинаковых сочетаний. Последние два столбца факторов, соответствующие квадратам факторов, состоят только из +1. Столбцы, обведенные утолщенной

рамкой, образуют план эксперимента. Столбец x_1x_2 , не обведенный утолщенной рамкой, при проведении опытов носит вспомогательный характер.

Особенности плана ПФЭ 22:

1. Различных столбцов в таблице получилось лишь четыре. Столбцы, соответствующие квадратам факторов неотличимы от столбца x_0 - это общий результат для плана ПФЭ 2n. Это не позволяет определить отдельно коэффициенты при квадратах факторов. Поэтому планы ПФЭ 2n называют планами первого порядка. Для определения коэффициентов при квадратах факторов используют планы второго порядка. В дальнейшем в планах ПФЭ 2n столбцы квадратов факторов изображаться не будут.

2. Число различных столбцов равняется числу различных сочетаний факторов, то есть числу строк плана - числу опытов N. Это тоже общий результат для этих планов, то есть с помощью планов ПФЭ 2n можно определить все коэффициенты линейного полинома со всеми возможными сочетаниями факторов, включая коэффициенты $b_{12...n}$, отражающие максимальное взаимодействие факторов вида $x_1x_2...x_n$.

3. В плане ПФЭ 22 сумма квадратов элементов любого столбца

$$\sum_{i=1}^N x_{iU}^2 = 4 = N$$

Поэтому для планов ПФЭ 2n

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iU} Y_U}{N}$$

Таким образом, с помощью планов ПФЭ 2n можно определить свободный член уравнения

b_0 , $C_n^1 = n$ коэффициентов b_i , C_n^2 коэффициентов при различных взаимодействиях двух факторов b_{ij} , C_n^3 коэффициентов тройных взаимодействий факторов b_{ijk} , ..., $C_n^n = 1$ коэффициент $b_{12...n}$ максимального взаимодействия факторов. Общее число определяемых коэффициентов

$$1 + n + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^n = m + 1 = 2^n = N$$

План ПФЭ 2n может являться насыщенным, при выборе числа членов уравнения $m+1=N$, ненасыщенным, при выборе числа членов уравнения и соответственно числа столбцов плана $m+1 < N$. План ПФЭ 2n является также ротатабельным, так как все точки плана лежат на окружности (сфере, гиперсфере) с радиусом $r = \sqrt{n}$ относительно центра плана.

Для плана ПФЭ 23 число факторов $n = 3$. Выполняется $N = 2^3 = 8$ опытов. Уравнение может содержать до восьми членов

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

Таким образом формируется план из восьми строк и восемь столбцов. В четвертом столбце ($i=3$) записываются единицы с чередующимися знаками через четыре элемента. План составляется аналогичным образом плану ПФЭ 22.

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
U	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Y
1	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y_1
2	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y_2
3	1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y_3
4	1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y_4
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_5
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_6
7	1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_7
8	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_8
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	8	0	0	0	0	0	0	0	

Столбцы, обведенные утолщенной рамкой, образуют план эксперимента. Столбцы, не обведенные утолщенной рамкой, при проведении опытов носят вспомогательный характер. Геометрическое отображение плана ПФЭ 23 с указанием номеров точек плана в факторном пространстве представлено на рис. 8. Точки плана располагаются в вершинах куба.

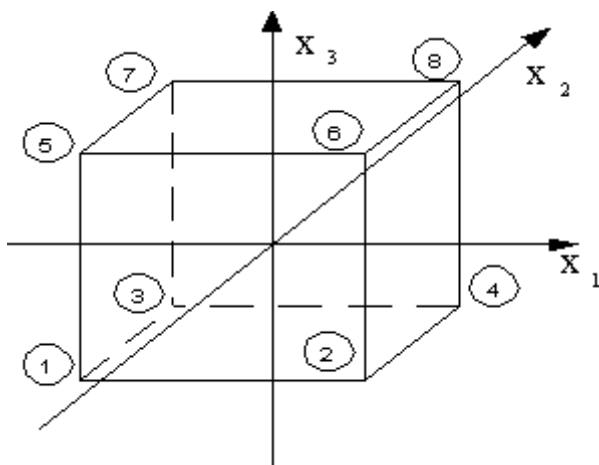


Рис. 8. Геометрическое отображение плана ПФЭ 23 в факторном пространстве
Пример применения плана ПФЭ 22. Пусть в результате проведения экспериментов по плану ПФЭ 22, то есть при изменении двух факторов, мы получили опытные значения Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 . Поверхность, уравнение которой нас интересует, имеет вид рис. 9.

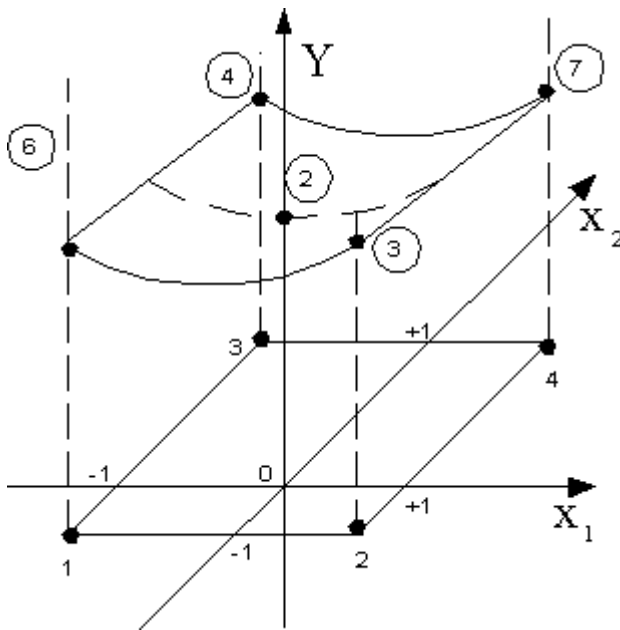


Рис. 9. Поверхность функции отклика

Составляем план ПФЭ 2².

<i>i</i>	0	1	2	3	4	5		
<i>U</i>	x_0	x_1	x_2	$x_3=x_1^2x_2$	<i>Y</i>	<i>Y'</i>	<i>Y''</i>	$ Y''-Y $
1	+1	-1	-1	+1	6	4,5	6	0
2	+1	+1	-1	-1	3	4,5	3	0
3	+1	-1	+1	-1	4	5,5	4	0
4	+1	+1	+1	+1	7	5,5	7	0
5	+1	0	0	0	2	5	5	3

Вначале найдем коэффициенты сокращенного линейного полинома вида

$$\hat{Y}' = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

и результаты вычислений $\hat{Y}'_1, \hat{Y}'_2, \hat{Y}'_3, \hat{Y}'_4$ по нему.

Рассчитываем коэффициенты полинома.

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N x_{0U} Y_U}{4} = \frac{1 \cdot 6 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 7}{4} = 5;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{U=1}^N x_{1U} Y_U}{4} = \frac{-1 \cdot 6 + 1 \cdot 3 - 1 \cdot 4 + 1 \cdot 7}{4} = 0;$$

Полином имеет вид

$$\hat{Y}' = 5 + 0 \cdot x_1 + 0,5x_2.$$

Результаты расчета по нему приведены в соответствующем столбце плана. Наблюдаются расхождения между *Y* и \hat{Y}' . Если точность сокращенного полинома не удовлетворяет, то по тем же результатам опытов можно сформировать более полный полином вида.

При этом ранее определенные коэффициенты остаются без изменений. Определим коэффициент при дополнительном члене полинома

Полином имеет вид

$$\hat{Y} = 5 + 0 \cdot x_1 + 0,5x_2 + 1,5x_1x_2.$$

Результаты расчета по нему приведены в соответствующем столбце плана. Наблюдаются расхождения между \hat{Y} и \hat{Y}' . Если точность сокращенного полинома не удовлетворяет, то по тем же результатам опытов можно сформировать более полный полином вида

$$\hat{Y}'' = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

При этом ранее определенные коэффициенты остаются без изменений. Определим коэффициент при дополнительном члене полинома

$$b_{12} = \frac{\sum_{v=1}^N x_{1v}x_{2v}Y_v}{4} = \frac{1 \cdot 6 - 1 \cdot 3 - 1 \cdot 4 + 1 \cdot 7}{4} = 1,5$$

Полином имеет вид

$$\hat{Y} = 5 + 0 \cdot x_1 + 0,5x_2 + 1,5x_1x_2.$$

По нему рассчитываем предсказанные значения отклика в точках плана (столбец \hat{Y}'').

Поверхность, построенная по полученному полиному, проходит точно через четыре точки

плана ($|\hat{Y}_{1,2,3,4}'' - Y_{1,2,3,4}| = 0$), по которым определены коэффициенты. Однако в других точках области определения функции, например в центре плана (точка 5 в плане, $x_1=0, x_2=0$),

предсказанные и действительные значения, могут не совпадать ($|\hat{Y}_5'' - Y_5| = 3$).

5. Планы дробного факторного эксперимента (планы ДФЭ)

При многофакторном эксперименте, особенно когда число факторов больше шести ($n > 6$), число опытов планов ПФЭ 2^n ($N = 2^n$) становится чрезмерным. Если нам не требуется определение всех коэффициентов неполного квадратичного полинома, то переходят к дробному факторному эксперименту (ДФЭ) – части полного факторного эксперимента. Так, например, если требуется определить лишь коэффициенты при самих факторах

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n,$$

то план ПФЭ 2^n дает избыточную информацию. Так при $n = 6$, в этом случае требуется определить $n + 1 = 7$ коэффициентов, тогда как по плану ПФЭ необходимо провести $N = 2^6 = 64$ опыта.

Хотя эта избыточная информация не является бесполезной, она позволяет более точно определить коэффициенты, но все же часто используют планы ДФЭ 2^{n-k} , где k – показатель дробности плана ПФЭ. При $k = 1$ число опытов в плане ДФЭ в два раза меньше, чем в плане ПФЭ, поэтому такие планы называют полуреплика плана ПФЭ. Так при $k=1$ для плана ДФЭ 2^{6-1} $N = 2^{6-1} = 32$, при $k=2$ для плана ДФЭ 2^{6-2} $N = 2^{6-2} = 16$ и такой план называют четвертьрепликой, при $k=3$ для плана ДФЭ 2^{6-3} $N = 2^{6-3} = 8$. При выборе дробности плана k необходимо учитывать, что число опытов должно быть больше числа членов уравнения. В рассматриваемом случае величина k должна быть такой, что бы удовлетворялось условие

$$n + 1 \leq 2^{n-k}.$$

План ДФЭ строится, как и для плана ПФЭ, но с меньшим числом факторов. Оставшиеся факторы варьируются не произвольно, а так чтобы сохранялась ортогональность плана. Это обеспечивается, если оставшиеся факторы варьируются по выбранному генерирующему соотношению, например как произведение каких-либо факторов из первой группы. Но это приводит к тому, что в матрице X будут существовать одинаковые столбцы. Следовательно, мы не сможем найти в чистом виде все коэффициенты неполного квадратич-

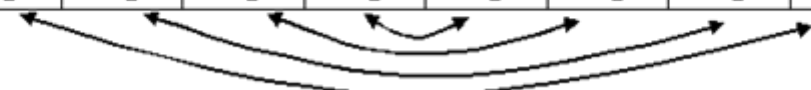
ного полинома, а лишь определим совместную величину коэффициентов для одинаковых столбцов.

Рассмотрим построение плана ДФЭ 23-1. Здесь $n = 3$, $k = 1$, $N = 2^3 - 1 = 7$. Первые два фактора варьируем как и ранее для плана ПФЭ 22, а для третьего фактора выбираем генерирующее соотношение в виде $x_3 = x_1 \cdot x_2$.

Для неполного квадратичного полинома количество столбцов плана составляет восемь.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

i	0	1	2	3	4	5	6	7
U	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1



План является ортогональным, но в нем оказались четыре пары одинаковых столбцов. Поэтому можно определить только четыре коэффициента, отражающие совместные влияния двух одинаковых столбцов

$$b_0 + b_{123} = \frac{\sum_{U=1}^N x_{0U} Y_U}{N}$$

Суммарные значения коэффициентов $b_1 + b_{23}$; $b_2 + b_{13}$; $b_3 + b_{12}$ определяются аналогично. Это следствие того, что мы пытаемся определить полное количество коэффициентов – 8 по недостаточному числу опытов – 4. Однако, если заранее известно, что некоторые из членов уравнения равны нулю (пренебрежимо малы) или имеется априорная информация о величинах некоторых коэффициентов, то полученные коэффициенты могут быть вычленины. Так если $b_{123} = 0$, то

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N x_{0U} Y_U}{N}$$

Если можно допустить, что коэффициенты из их смешанной оценки сопоставимы, то для рассмотренного плана

$$b_0 = b_{123} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{U=1}^N x_{0U} Y_U}{N}$$

Графическое изображение планов ПФЭ 23 и ДФЭ 23-1 в факторном пространстве (для трех факторов - трехмерное пространство) представлено на рис. 10. План ПФЭ 23 представлен кубом с восемью узлами (точками плана), а возможные планы ДФЭ 23-1 – проекциями этого куба на три плоскости. То есть из восьми узлов выбираются четыре (рис. 10, а). Из куба можно также выбрать четыре точки из восьми, не лежащие в одной плоскости, и сформировать план ДФЭ 23-1 (рис. 10, б).

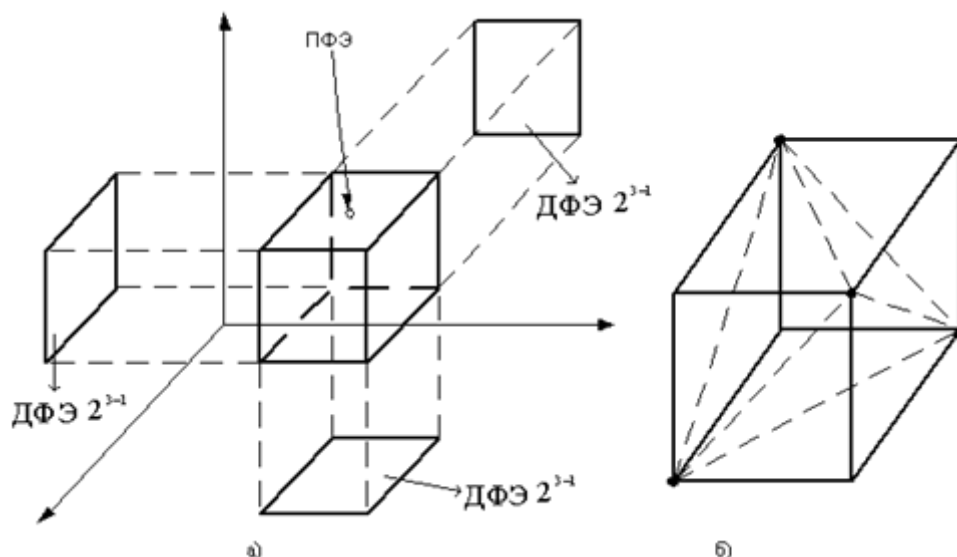


Рис. 10. Графическое изображение планов ПФЭ 23 и ДФЭ 23-1 в факторном пространстве. Планы ДФЭ, как и планы ПФЭ, являются ротатабельными. Планы ДФЭ могут быть как насыщенными так и ненасыщенными.

Достоинство планов ДФЭ заключается и в том, что если построенный на его основе неполный полином не удовлетворяет требованиям по точности, то план ДФЭ легко дорабатывается до плана ПФЭ, без потери информации прежних опытах, с формированием более точного полинома.

Пример построения плана ДФЭ.

Построить план ДФЭ 24-1 и определить полином

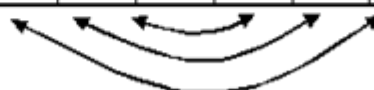
$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4$$

Число факторов – 4. Нужно найти 8 коэффициентов полинома. Выбираем 8 из 16 опытов плана ПФЭ 24 таким образом, чтобы были определены независимые коэффициенты при самих факторах, смешанные коэффициенты при парных сочетаниях факторов и в пренебрежении тройными и четверным сочетаниями факторов и при этом сохранялась ортогональность плана.

U		x_1	x_2	x_3	x_4
ПФЭ 2^4	ДФЭ 2^{4-1}				
1	1	-1	-1	-1	-1
2	-	+1	-1	-1	-1
3	-	-1	+1	-1	-1
4	4	+1	+1	-1	-1
5	-	-1	-1	+1	-1
6	6	+1	-1	+1	-1
7	7	-1	+1	+1	-1
8	-	+1	+1	+1	-1
9	-	-1	-1	-1	+1
10	2	+1	-1	-1	+1
11	3	-1	+1	-1	+1
12	-	+1	+1	-1	+1
13	5	-1	-1	+1	+1
14	-	+1	-1	+1	+1
15	-	-1	+1	+1	+1
16	8	+1	+1	+1	+1

Такой выбор позволяет сформировать план ДФЭ 24-1 как и план ПФЭ 23, но с $x_4 = x_1 x_2 x_3$. План ДФЭ 24-1 представляется в виде

U	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$	Y	\hat{Y}
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	10	10
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	8	8
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	8	8
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	7	6,8
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	9	9,2
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	8	8
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	8	8
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	6,5	6,68



Значения коэффициентов полинома составляют:

$$b_{123} = b_{124} = b_{134} = b_{234} = b_{1234} = 0.$$

$$b_0 = \frac{10 + 8 + 8 + 7 + 9 + 8 + 8 + 6,5}{8} = 8,06$$

$$b_1 = \frac{-10 + 8 - 8 + 7 - 9 + 8 - 8 + 6,5}{8} = -0,69$$

$$b_2 = -0,69; \quad b_3 = -0,19; \quad b_4 = -0,19;$$

$$(b_{12} + b_{34}) = \frac{10 - 8 - 8 + 7 + 9 - 8 - 8 + 6,5}{8} = 0,06$$

$$b_{13} + b_{24} = 0,06, \quad b_{14} + b_{23} = 0,06.$$

Если принять, что

$$b_{12} \approx b_{34} = \frac{1}{2}(b_{12} + b_{34}) = 0,03,$$

$$b_{13} \approx b_{24} = \frac{1}{2}(b_{13} + b_{24}) = 0,03,$$

$$b_{14} \approx b_{23} = \frac{1}{2}(b_{14} + b_{23}) = 0,03,$$

то полином имеет вид

$$\hat{Y} = 8,06 - 0,69x_1 - 0,69x_2 - 0,19x_3 - 0,19x_4 + 0,03x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,03x_1x_4 + 0,03x_2x_3 + 0,03x_2x_4 + 0,03x_3x_4.$$

Значения полинома в точках плана приведены в последнем столбце плана ДФЭ 24-1. В нашем случае точность его достаточно высокая.

6. Насыщенные планы первого порядка

Насыщенным планом первого порядка – называется план, содержащий $n+1$ точку (опыт).

Например, при $n = 4$, $N = n + 1 = 5$.

То есть полином формируется в виде

$$Y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n.$$

Таким образом, насыщенный план – это предельно минимальный случай плана ПФЭ. Такие планы называются симплекс-планы. Для симплекс-плана при $n = 1$, $N = 2$ его геометрическое изображение представлено на рис. 11, а; при $n=2$, $N=3$ – на рис. 11, б; при $n=3$, $N=4$ – на рис. 11, в. Симплекс-планы обычно используются на стадии предварительного исследования.

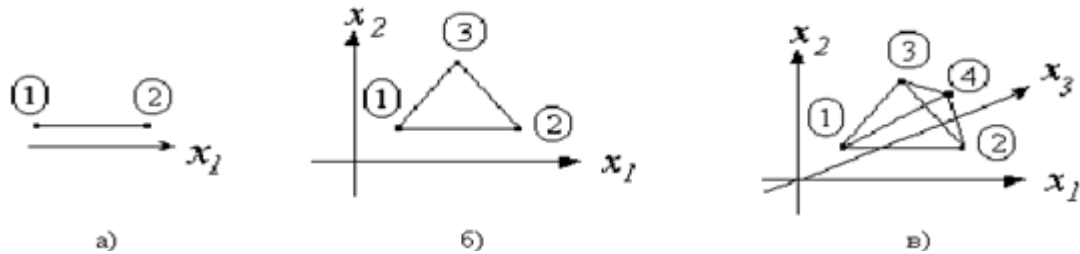


Рис. 11. Симплекс-план для $n=1$, $N=2$ (а); $n=2$, $N=3$ (б); $n=3$, $N=4$ (в)

Симплекс-план не всегда является ортогональным. Симплекс-план называется правильным, если расстояние между двумя любыми точками плана одинаковое. Симплекс-план называется центрированным, если

$$\sum_{i=1}^{n+1} x_{iU} = 0, \\ \text{для } i=1, 2, \dots, n.$$

Применимость планов ПФЭ и пути повышения точности полиномов.

По каким же признакам можно судить о допустимости использования неполного квадратичного полинома, построенного на основе планов ПФЭ $2n$?

Такие полиномы дают поверхность отклика, которая проходит точно через все экспериментальные точки, по которым определяются коэффициенты. Так как точки планов ПФЭ располагаются на границах диапазонов варьирования факторов, то это означает, что поверхность отклика проходит через граничные точки. В любом сечении поверхности отклика, полученной по такому полиному, плоскостью при фиксированных всех факторах кроме одного и параллельной оси Y получается след в виде прямой линии.

Возможны случаи, когда реальная поверхность отклика определяется полиномами второго и выше порядков. В этом случае поверхность плана ПФЭ, совпадая с реальной поверхностью в граничных точках, может отличаться в других точках факторного пространства,

например в центральной точке плана, т.е. $Y_0 \neq \hat{Y}_0$. Поэтому одним из признаков неудовлетворительной аппроксимации полиномами по плану ПФЭ является расхождение результатов функции отклика с реальной функцией в центральной точке плана.

Однако при многофакторном эксперименте возможны случаи, когда в реальности функция отклика зависит, в том числе, от квадратов факторов, у которых коэффициенты имеют разные знаки, например, для “седловидной” поверхности. При этом, несмотря на то, что эта поверхность явно нелинейная, результат опыта в центральной точке может оказаться достаточно близким к полученному результату по неполному квадратичному полиному плана ПФЭ. Однако расхождения будут возникать во всех других точках плана эксперимента. Поэтому нецелесообразность использования плана ПФЭ определяется нелинейностью каких-либо сечений поверхности отклика. Косвенным признаком может служить

расхождение Y_0 и \hat{Y}_0 в центральной точке плана.

Если не удастся получить полином по плану ПФЭ, хорошо аппроксимирующей реальную поверхность, то какие пути можно предложить для повышения точности полиномов?

Уменьшение диапазона варьирования факторов или его разбиение на поддиапазоны, для каждого из которых строится свой план ПФЭ и определяется свой полином. Путь достаточно трудоемок, но погрешность семейства планов ПФЭ снижается.

Выделение фактора, порождающий нелинейность, и построение для оставшихся $n-1$ факторов k планов ПФЭ, в каждом из которых выделенный фактор зафиксирован при некотором значении. На основе полученных k полиномов можно попытаться сформировать общий полином, коэффициенты которого являются функциями выделенного фактора. Этот путь также достаточно трудоемок.

Переход к плану ПФЭ с большим числом уровней варьирования факторов, например к планам с варьированием факторов на трех уровнях - планам ПФЭ $3n$ (рис. 12). В этом случае происходит резкое увеличение количества точек по сравнению с планом ПФЭ $2n$. Так при $n = 2$ для ПФЭ $2n$ $N=4$, для ПФЭ $3n$ $N=9$; при $n = 3$ для ПФЭ $2n$ $N=8$, для ПФЭ $3n$ $N=27$; при $n = 4$ для ПФЭ $2n$ $N=16$, для ПФЭ $3n$ $N=81$ и т.д.

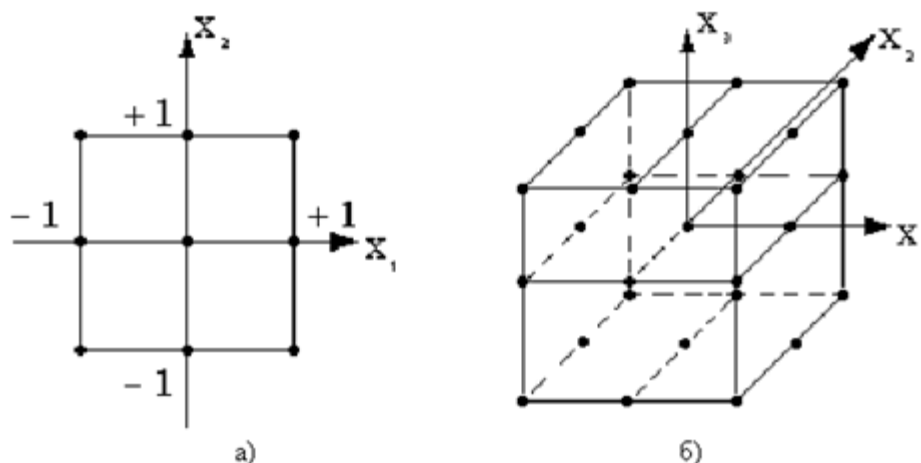


Рис. 12. Планы ПФЭ 32 (а) и ПФЭ 33 (б)

Достраивание планов ПФЭ $2n$ до планов более высокого порядка (чаще всего второго) и построение полных квадратичных полиномов (с наличием квадратов факторов).

Преобразование метрики матричного пространства, то есть переход к новым факторам функционально связанным с прежними факторами, но не порождающими нелинейности.

7. Планы второго порядка

Они позволяют сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, который содержит большее число членов, чем неполный квадратичный полином, сформированный по планам первого порядка, и поэтому требуют большего числа выполняемых опытов. Полный квадратичный полином при $n = 2$ содержит 6 членов

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

при $n = 3$ - 11 членов

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$$

Известно, что для получения квадратичной зависимости каждый фактор должен фиксироваться как минимум на трех уровнях.

Для планов второго порядка область планирования может:

Быть естественной, то есть включать область планирования планов первого порядка и дополнительные точки (такие планы называются композиционными). Дополнительные точки могут выходить за область плана первого порядка – единичного гиперкуба. В этом случае опыты в них реализуются при установлении факторов за пределами варьирования. Это надо учитывать при определении области совместимости факторов.

Не выходить за пределы единичного гиперкуба, то есть для всех точек плана выполняется условие $|x_{iv}| \leq 1$.

Не выходить за пределы единичного гипершара, определяемую соотношением таких значений факторов в плане, что $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \leq 1$.

Во втором и третьем случаях используют специальные приемы выполнения приведенных соотношений в плане. План с одной областью планирования можно перестроить в план другой областью планирования.

Если уже был ранее сформирован план ПФЭ, но точность его функции отклика не удовлетворяет, то мы можем достроить этот план до плана второго порядка (композиционный план) и сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, без потери информации о ранее сделанных опытах.

Ортогональный центрально-композиционный план второго порядка

Ортогональным планом называется такой план, у которого матрица планирования X строится так, что бы матрица $C=XtX$ оказалась диагональной. Используем этот подход и при построении планов второго порядка. План называется центральным, если все точки расположены симметрично относительно центра плана. ОЦКП – центральный симметричный ортогональный композиционный план.

В ОЦКП входят: ядро - план ПФЭ с $N_0 = 2n$ точками плана, n_0 (одна для этого плана) центральная точка плана ($x_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$) и по две “звездные” точки для каждого фактора $x_i = \pm\alpha, x_j = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j$.

α – плечо “звездных” точек.

При этом в каждой плоскости, содержащей ось Y и координатную ось i -того фактора (проходящей через центр плана), оказываются три значения фактора $x_i (-\alpha, 0, +\alpha)$ и три соответствующих значения Y .

Общее количество точек в плане ОЦКП составляет

$$N = 2^n + 2n + n_0,$$

где для ОЦКП $n_0=1$.

При $n > 2$ в ОЦКП оказывается меньшее количество точек, чем в плане ПФЭ $3n$.

Число точек в плане

n	2	3	4	5	6
ОЦКП	9	15	25	43	77
ПФЭ	3	9	27	81	243

Графическое представление ОЦКП для $n=3$ приведено на рис. 13.

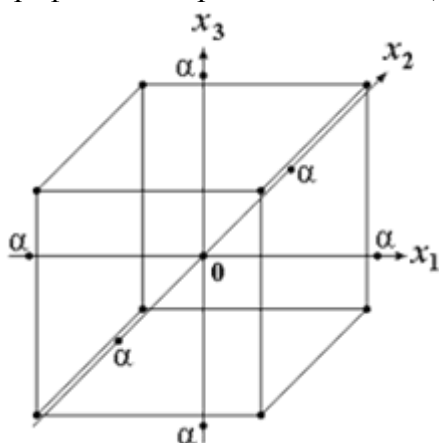


Рис. 13. ОЦКП при $n=3$

Для ортогонального плана необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$\sum_{v=1}^N x_{iv} x_{jv} = 0.$$

Так как $x_{0v} = 1$, то для столбцов $j=1, 2, \dots, m+1$ должно выполняться условие

$$\sum_{v=1}^N x_{jv} = 0.$$

Это означает необходимость выполнения требования, чтобы сумма элементов любого столбца (кроме $j=0$), включая столбцы, соответствующие квадратам фактора, должна быть равна нулю. Это возможно, если члены столбцов, соответствующих квадратам факторов, преобразованы, иначе сумма квадратов факторов не может быть равна нулю.

Преобразование элементов этих столбцов осуществляется в виде

$$x'_{jU} = x_{jU}^2 - a,$$

где a – величина, зависящая от числа факторов.

Сумма элементов столбца, соответствующего квадратам факторов

$$\sum_{U=1}^N x'_{jU} = \sum_{U=1}^N (x_{jU}^2 - a) = \sum_{U=1}^N x_{jU}^2 - N \cdot a = 0$$

Откуда

$$a = \frac{\sum_{U=1}^N x_{jU}^2}{N}.$$

В общем случае ортогональный центрально-композиционный план при трех (n) факторов имеет следующий вид

	U	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$x_4 = x_1^2 - a$	$x_5 = x_2^2 - a$	$x_6 = x_3^2 - a$	Y
Точки плана ПФЭ 2^3 ($N_0 = 2^n$ точек)	1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_1
	2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_2
	3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_3
	4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_4
	5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_5
	6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_6
	7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_7
	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Y_8
Звездные точки ($2n$ точек)	9	+1	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	$\alpha^2 - a$	$-a$	$-a$	Y_9
	10	+1	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0	$\alpha^2 - a$	$-a$	$-a$	Y_{10}
	11	+1	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	$-a$	$\alpha^2 - a$	$-a$	Y_{11}
	12	+1	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	$-a$	$\alpha^2 - a$	$-a$	Y_{12}
	13	+1	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	$-a$	$-a$	$\alpha^2 - a$	Y_{13}
	14	+1	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	$-a$	$-a$	$\alpha^2 - a$	Y_{14}
Нулевая точка	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	$-a$	$-a$	$-a$	Y_{15}
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	-	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	-	N	$2^n + 2\alpha^2$			2^n				$2^n(1-a)^2 + 2(\alpha^2 - a)^2 + a^2(2n-2) + n_0a^2$			

В ОЦКП каждый фактор фиксируется, в общем случае, на пяти уровнях ($-\alpha$, -1 , 0 , 1 , $+\alpha$). Для определения неизвестных “ a ” и “ α ” нужно сформировать и решить систему из двух уравнений. Одно из них для “ a ” мы записали ранее. Другое уравнение получим из условия ортогональности для столбцов x'_4 и x'_5

$$\sum_{U=1}^N x'_{4U} \cdot x'_{5U} = N_0(1-a)^2 - 4a(\alpha^2 - a) + a^2(2n-4) + n_0a^2 = 0$$

После простейших преобразований с учетом того, что $N = N_0 + 2 \cdot n + n_0$ – общее число опытов в плане, получаем соотношение

$$\frac{N_0}{N} - 2 \frac{N_0 + 2\alpha^2}{N} \cdot a + a^2 = 0$$

Соотношение для a при $j=1, 2$ или 3 может быть записано как (см. план)

$$a = \frac{\sum_{U=1}^N x_{jU}^2}{N} = \frac{N_0 + 2 \cdot \alpha^2}{N}.$$

Подставив его в последнее уравнение получаем

$$\frac{N_0}{N} - 2 \cdot a^2 + a^2 = 0,$$

откуда константа преобразования a

$$a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \sqrt{\frac{2^n}{2^n + 2 \cdot n + n_0}}.$$

Тогда

$$\frac{N_0 + 2 \cdot \alpha^2}{N} = a = \sqrt{\frac{N_0}{N}}$$

и плечо звездных точек

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)}.$$

Например, для ОЦКП при числе факторов $n=3$ имеем следующие параметры плана

$$N_0 = 2^3 = 8, \quad N = 8 + 1 \cdot 3 + 1 = 15,$$

$$a = \sqrt{\frac{8}{15}} \approx 0,73; \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{15 \cdot 8} - 8)} \approx 1,215$$

$$1 - a = 0,27, \quad -a = -0,73, \quad \alpha^2 - a = 1,215^2 - 0,73 = 0,75.$$

Сам план принимает вид

U	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1 x_2	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	x'_4	x'_5	x'_6	Y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	Y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	Y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	Y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	Y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	Y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	Y_8
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	Y_9
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	Y_{10}
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	Y_{11}
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	Y_{12}
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	Y_{13}
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	Y_{14}
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	Y_{15}
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	15	10,952			8			4,3727				

Очевидно, что план является ортогональным. В отличие от планов ПФЭ для ОЦКП сумма квадратов факторов разных столбцов не является одинаковой.

По результатам опытов плана формируется полином

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_4 (x_1^2 - a) + b_5 (x_2^2 - a) + b_6 (x_3^2 - a)$$

Коэффициенты полинома $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_4, b_5, b_6$ определяется как

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}$$

Можно преобразовать полином к виду

$$\hat{Y} = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 + b_6 x_3^2,$$

где

$$b'_0 = b_0 - b_4 \cdot a + b_5 \cdot a - b_6 \cdot a$$

Значения параметров ОЦКП при числе факторов n

n	2	3	4	5	6	7	8
α	1	1,215	1,414	1,596	1,761	1,909	2,045
a	0,667	0,73	0,8	0,86	0,91	0,946	0,968
N	9	15	25	43	77	143	273

При n =2 ОЦКП совпадает с планом ПФЭ 23. Звездные точки ОЦКП в этом случае лежат на границах варьирования факторов. Если точки плана ПФЭ 2n всегда лежат на окружности (поверхности шара, гипершара), то точки плана ОЦКП не лежат на какой-либо одной окружности (поверхности шара, гипершара). План ОЦКП не является насыщенным. Так, например, для n = 3 полином имеет одиннадцать членов со своими коэффициентами, но для их определения используются пятнадцать опытов.

Пример плана ОЦКП для n = 2.

Параметры плана N0=4, N=9, $\alpha = 1$, a = 2/3, 1-a=1/3, -a=-2/3, $\alpha^2 - a = -2/3$. Использован рассмотренный ранее план ПФЭ 22 с добавленными опытами 5-9.

U	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x'_3 = x_1^2 - a$	$x'_4 = x_2^2 - a$	Y	\hat{Y}	$ \hat{Y} - Y $
1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3	6	5,83	0,17
2	+1	+1	-1	-1	1/3	1/3	3	2,83	0,17
3	+1	-1	+1	-1	1/3	1/3	4	4,17	0,17
4	+1	+1	+1	+1	1/3	1/3	7	7,17	0,17
5	+1	-1	0	0	1/3	-2/3	5	5	0
6	+1	+1	0	0	1/3	-2/3	5	5	0
7	+1	0	-1	0	-2/3	1/3	1	1,33	0,33
8	+1	0	+1	0	-2/3	1/3	3	2,67	0,33
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	2	2	0
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	9	6	6	4	2	2			

Коэффициенты полинома составляют

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^9 x_{0U} Y_U}{\sum_{U=1}^9 x_{0U}^2} = \frac{6+3+4+7+5+5+1+3+2}{9} = 4$$

;

$$b_1 = \frac{-6+3-4+7-5+5+0 \cdot 1+0 \cdot 3+0 \cdot 2}{6} = 0;$$

$$b_2 = \frac{-6-3+4+7-0 \cdot 5+0 \cdot 5-1+3+0 \cdot 2}{6} = 0,67;$$

$$b_{12} = \frac{6-3-4+7}{4} = 1,5;$$

$$b_3 = \frac{1/3(6+3+4+7+5+5) - 2/3(1+3+2)}{6 \cdot (1/3)^2 + 3(2/3)^2} = 3;$$

$$b_4 = \frac{1/3(6+3+4+7+1+3) - 2/3(5+5+2)}{2} = 0.$$

Полином принимает вид

$$\hat{Y} = 4 + 0 \cdot x_1 + 0,67x_2 + 3(x_1^2 - 0,67) + 0 \cdot (x_2^2 - 0,67) + 1,5x_1x_2 = 2 + 0,67x_2 + 3x_1^2 + 1,5x_1x_2$$

(Ранее по плану ПФЭ 22 был сформирован полином $\hat{Y} = 5 + 0,5x_2 + 1,5x_1x_2$

Рассчитанные значения \hat{Y} по полиному приведены в плане. Также приведены величины $|\hat{Y}_V - Y_V|$, подтверждающие достаточно высокую точность полинома. Так в центральной точке плана, в отличие от случая применения плана ПФЭ 22, расхождений нет.

8. Рототабельные планы

Рототабельные планы – это планы, у которых точки плана располагаются на окружностях (сферах, гиперсферах). У рототабельного плана первого порядка точки плана располагаются на одной окружности (сфере, гиперсфере) с радиусом R

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{iV}^2} = \text{const} = R,$$

где V=1,..., N - номер точки плана, i=1,..., n – номер фактора.

В таком случае точность оценивания функции отклика по любому направлению факторного пространства (для всех точек плана) одинаковая.

Рототабельный план может быть симметричным, когда точки плана располагаются симметрично друг друга. Рассмотренный ранее план ПФЭ 2n – рототабельный симметричный план первого порядка.

У рототабельных планов второго порядка точки плана располагаются на двух концентрических гиперсферах с радиусами R1 и R2. В таких планах

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{iV}^2} = \text{const}_1 = R_1,$$

для V=1,..., N0 и

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{iW}^2} = \text{const}_2 = R_2,$$

для W=1,..., n0,

где V и W – текущие номера точек плана в двух подмножествах опытов N0 и n0 из их общего количества N, относящихся к двум разным концентрическим сферам. Одна из сфер может быть вырожденной, когда R2=0. Рассмотренный ранее ортогональный центрально-композиционный план второго порядка (ОЦКП) не является рототабельным планом, так как его точки лежат на трех концентрических окружностях (сферах, гиперсферах). При n=2 это очевидно из рис. 14. “Звездные” точки плана и точки плана ПФЭ 2n лежат на разных окружностях.

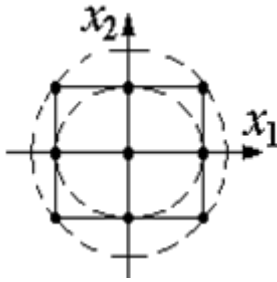


Рис. 14. Расположение точек ОЦКП на трех окружностях

Рототабельный план может быть ортогональным, если выполняется условие

$$\sum_{U=1}^N x_{iU} \cdot x_{jU} = 0$$

где $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, m$, $m > n$, $i \neq j$ - номера столбцов плана.

Рототабельный ортогональный центрально-композиционный план

Рототабельный ортогональный центрально-композиционный план (РОЦКП) строится аналогично рассмотренному ранее ОЦКП. К использованному в качестве ядра плану ПФЭ $2n$ добавляются “звездные” точки - по две на каждый фактор и несколько точек в центре плана. “Звездные” точки должны располагаться на поверхности гиперболы с радиусом R , на которой лежат и точки плана ПФЭ $2n$, то есть величина плеча “звездных” точек α должна равняться радиусу R . Это может быть обеспечено, при выполнении условия ортогональности, только при соответствующем выборе числа наблюдений в центральной (нулевой) точке плана n_0 . Для РОЦКП n_0 зависит от числа факторов n . Напомним, что в ОЦКП $n_0 = 1$ для любого числа n .

Радиус сферы, на которой лежат точки плана ПФЭ $2n$ при двух уровнях варьирования факторов с диапазоном ± 1 составляет (рис. 15)

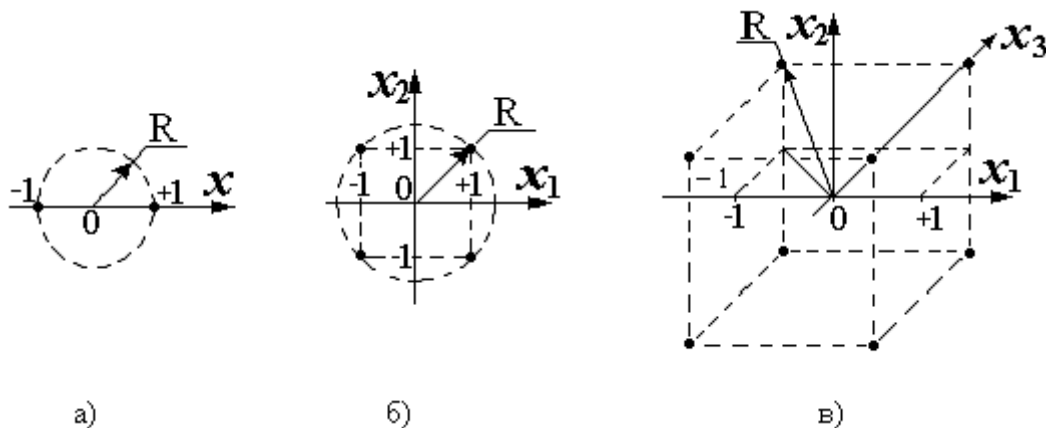


Рис. 15. Радиус окружности (сферы), на которой лежат точки плана ПФЭ $2n$ при диапазоне варьирования факторов от -1 до $+1$:

а) - $n=1$, $R = \sqrt{1} = 1$;

б) - $n=2$, $R = \sqrt{2} = 1,414$;

в) - $n=3$, $R = \sqrt{3} = 1,732$

$$R = \sqrt{n}$$

Таким образом, при построении РОЦКП с ядром из плана ПФЭ $2n$ плечо “звездных” точек определяется числом факторов

$$\alpha = \sqrt{n}$$

Ранее при определении параметров ортогонального композиционного плана второго порядка с ядром из плана ПФЭ $2n$ было получено

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)}$$

где $N_0 = 2^n$ - число точек плана ПФЭ,

$N = N_0 + 2n + n_0$ - полное число точек композиционного плана второго порядка,

$a = \sqrt{N_0/N}$ - константа преобразования элементов столбцов, соответствующих квадратам факторов.

В этом случае для РОЦКП число наблюдений в центре плана

$$n_0 = \frac{4n^2}{2^n} + 2n$$

Если n_0 не целое, то при практическом построении плана его округляют до целого, но свойство ортогональности плана нарушается.

Параметры РОЦКП в зависимости от числа факторов

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha = \sqrt{n}$	1	1,414	1,732	2	2,236	2,45	2,646	2,83
$n_0 = \frac{4n^2}{2^n} + 2n$	4	8	10,5	12	13,13	14,25	15,53	17
$N_0 = 2^n$	2	4	8	16	32	64	128	256
N	8	16	24,5	36	55,13	90	157,55	289
$a = \sqrt{N_0/N}$	0,5	0,5	0,574	0,67	0,76	0,84	0,9	0,94

В [1] без вывода для РОЦКП рекомендуется принимать

$$\alpha' = N_0^{\frac{1}{4}} = (2^n)^{\frac{1}{4}} = 2^{\frac{n}{4}}$$

Тогда

$$n_0' = 4 - 2n + 2^{\frac{n+4}{2}}$$

Параметры РОЦКП по [1]

N	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha' = 2^{\frac{n}{4}}$	1,189	1,414	1,682	2	2,378	2,838	3,364	4
$n_0' = 4 - 2n + 2^{\frac{n+4}{2}}$	7,66	8	9,31	12	16,63	24	33,25	52
N'	11,66	16	23,31	36	58,63	100	177,25	324
a'	0,414	0,5	0,586	0,57	0,739	0,8	0,85	0,889

Пример ротатабельного ортогонального центрально-композиционного плана для $n = 2$.

Параметры плана:

$$\alpha = \sqrt{2} = 1,414, \quad n_0 = 8, \quad N_0 = 2^2 = 4, \quad N = 2^2 + 2 \cdot 2 + n_0 = 16,$$

$$a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = 0,5, \quad 1 - a = 0,5, \quad -a = -0,5, \quad \alpha^2 - a = 2 - 0,5 = 1,5.$$

Нет необходимости проводить восемь раз (точки с 9 по 16) опыты в центре плана. Достаточно провести этот опыт один раз и записать результат во все восемь строк. Строки сокращать нельзя, так как нарушается свойство ортогональности, и коэффициенты полинома будут определены неверно.

Коэффициенты квадратичного полинома рассчитаются, как и ранее.

Использован рассмотренный ранее план ПФЭ 22 с добавленными опытами 5-16.

	U	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x'_3 = x_1^2 - a$	$x'_4 = x_2^2 - a$	Y	\hat{Y}	$ \hat{Y} - Y $
ПФЭ 2 ²	1	+1	-1	-1	+1	0,5	0,5	6	5,146	0,854
	2	+1	+1	-1	-1	0,5	0,5	3	2,146	0,854
	3	+1	-1	+1	-1	0,5	0,5	4	3,35	0,65
	4	+1	+1	+1	+1	0,5	0,5	7	6,35	0,65
Звездные точки	5	+1	-1,414	0	0	1,5	-0,5	5	5,75	0,75
	6	+1	+1,414	0	0	1,5	-0,5	5	5,75	0,75
	7	+1	0	-1,414	0	-0,5	1,5	1	1,9	0,9
	8	+1	0	+1,414	0	-0,5	1,5	3	3,6	0,6
Точки в центре плана	9	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	10	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	11	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	12	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	13	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	14	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	15	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
	16	+1	0	0	0	-0,5	-0,5	2	2	0
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	16	0	0	0	0	0	0			
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	16	8	8	4	8	8	8			

$$e_0 = \frac{6+3+4+7+5+5+1+3+2 \cdot 8}{16} = \frac{50}{16} = 3,125$$

$$e_1 = \frac{-6+3-4+7-5 \cdot 1,414+5 \cdot 1,414+10 \cdot 0}{4 \cdot 1^2 + 2(1,414)^2 + 10 \cdot 0^2} = \frac{0}{8} = 0, \quad e_2 = 0,6035,$$

$$e_{12} = \frac{6-3-4+7+12 \cdot 0}{4 \cdot 1^2} = 1,5$$

$$e_{11} = \frac{0,5(6+3+4+7)+1,5(5+5)-0,5(1+3+8 \cdot 2)}{14 \cdot 0,5^2 + 2 \cdot 1,5^2} = \frac{15}{8} = 1,875$$

$$e_{22} = \frac{0,5(6+3+4+7)-0,5(5+5)+1,5(1+3)-0,5 \cdot 2 \cdot 8}{8} = 0,375$$

Полином принимает вид

$$\hat{Y}_{\text{РОЦКП}} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}(x_1^2 - a) + b_{22}(x_2^2 - a) = 3,125 + 0 \cdot x_1 + 0,6035x_2 + 1,5x_1x_2 + 1,875(x_1^2 - 0,5) + 0,375(x_2^2 - 0,5) = 2 + 0 \cdot x_1 + 0,6035x_2 + 1,5x_1x_2 + 1,875x_1^2 + 0,375x_2^2$$

Рассчитанные значения функции и расхождения с опытными данными представлены в предпоследнем и последнем столбцах плана.

Ранее для ОЦКП, при несколько отличающейся поверхности функции, был получен близкий полином в виде

$$\hat{Y}_{\text{ОЦКП}} = 2 + 0 \cdot x_1 + 0,67x_2 + 1,5x_1x_2 + 3x_1^2 + 0 \cdot x_2^2$$

Для $n=2$ число членов квадратичного полинома составляет шесть. В ОЦКП и РОЦКП необходимо провести девять отличающихся опытов при пяти уровнях варьирования факторов. Поэтому ОЦКП и РОЦКП - ненасыщенные планы. Такое число экспериментальных точек может быть использовано для построения, например, кубических полиномов.

9. Планы второго порядка с единичной областью планирования

Так как ОЦКП и РОЦКП - композиционные планы, то при естественной области планирования “звездные” точки могут выходить за пределы единичного гиперкуба и единичного

гипершара. Для вписывания плана в область единичного гипершара необходимо изменить значение факторов путем умножения их на коэффициент

$$C = \frac{1}{\sqrt{n}}.$$

Так при $n = 2$,

$$C_{\text{РОЦКП}} = C_{\text{ОЦКП}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Значение факторов в ОЦКП и РОЦКП при переходе от естественной области планирования к единичному гипершару, при $n = 2$.

U	ОЦКП		РЦКП	
	x_1	x_2	x_1	x_2
1	-0,707	-0,707	-0,707	-0,707
2	+0,707	-0,707	+0,707	-0,707
3	-0,707	+0,707	-0,707	+0,707
4	+0,707	+0,707	+0,707	+0,707
5	-0,707	0	-1	0
6	+0,707	0	+1	0
7	0	-0,707	0	-1
8	0	+0,707	0	+1
9	0	0	0	0
10	-		0	0
11	-		0	0
12	-		0	0
13	-		0	0
14	-		0	0
15	-		0	0
16	-		0	0

Могут использоваться рототабельные планы с точками плана в вершинах других, кроме квадрата (куба, суперкуба), правильных многогранников, вписанных в область единичного круга (шара, гипершара). В рототабельном плане на основе N0-угольника присутствуют N0 отличающихся точек на окружности, с радиусом $R1=1$, и n0 совпадающих точек в центре плана, с радиусом $R2=0$. При $n=2$ для квадратичного полинома при шести его членах число отличающихся точек плана должно быть не менее шести. В планах на основе пятиугольника (шестиугольника или семиугольника) присутствуют 6 (7 или 8) отличающихся точек, что меньше чем в ОЦКП и РОЦКП, у которых 9 отличающихся точек. При соответствующем выборе многоугольника можно сформировать насыщенный рототабельный план второго порядка. Значения факторов в точках плана определяются типом многоугольника.

Рототабельный план на основе правильного многоугольника при $n=2$.

U	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$	$x_4 = x_1^2 - a$	$x_5 = x_2^2 - a$
1	1	$\cos 0$	$\sin 0$	$\frac{\sin 0}{2}$	$\cos^2 0 - \frac{N_0}{2N}$	$\sin^2 0 - \frac{N_0}{2N}$
2	1	$\cos \frac{2\pi}{N_0}$	$\sin \frac{2\pi}{N_0}$	$\frac{\sin \frac{4\pi}{N_0}}{2}$	$\cos^2 \frac{2\pi}{N_0} - 0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2 \frac{2\pi}{N_0} - 0,5 \frac{N_0}{N}$
...
V	1	$\cos \frac{2\pi(V-1)}{N_0}$	$\sin \frac{2\pi(V-1)}{N_0}$	$\frac{\sin \frac{4\pi(V-1)}{N_0}}{2}$	$\cos^2 \frac{2\pi(V-1)}{N_0} - 0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2 \frac{2\pi(V-1)}{N_0} - 0,5 \frac{N_0}{N}$
...
N_0	1	$\cos(2\pi - \frac{2\pi}{N_0})$	$\sin(2\pi - \frac{2\pi}{N_0})$	$\frac{\sin(4\pi - \frac{4\pi}{N_0})}{2}$	$\cos^2(2\pi - \frac{2\pi}{N_0}) - 0,5 \frac{N_0}{N}$	$\sin^2(2\pi - \frac{2\pi}{N_0}) - 0,5 \frac{N_0}{N}$
1	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$
...
W	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$
...
n_0	1	0	0	0	$-0,5 \frac{N_0}{N}$	$-0,5 \frac{N_0}{N}$
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	N	0	0	0	0	0
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	N	$0,5 N_0$	$0,125 N_0$	$0,375 N_0 - 0,25 \frac{N_0^2}{N} = 0,25 N_0$		

Константа преобразования элементов столбцов, соответствующих квадратам факторов, для всех подобных планов составляет

$$a = \frac{\sum_{U=1}^N x_{jU}^2}{N} = 0,5 \frac{N_0}{N}.$$

Смотри, например, для столбцы $i=1$ или 2 приведенного плана.

$$\frac{N_0}{N}$$

Соотношение $\frac{N_0}{N}$ может быть определено из уравнения выполнения условия ортогональности столбцов x_4' и x_5'

$$\sum_{U=1}^N x_{4U}' \cdot x_{5U}' = 0$$

После несложных преобразований оно сводится к требованию

$$0,125 N_0 - 0,25 \frac{N_0^2}{N} = 0,$$

что выполняется при условии в таких планах

$$\frac{N_0}{N} = \frac{1}{2}$$

и следовательно $N_0 = n_0 = 0,5N$.

Таким образом число точек в центре плана для всех подобных планов равно числу точек на поверхности единичного гипершара и определяется типом использованного многогранника.

Константа преобразования для всех подобных планов составляет $a=0,25$.

Например, в ротатабельном плане при $n=2$ на основе правильного шестиугольника присутствуют 7 отличающихся точек: $N_0=6$ точек на единичной окружности и $n_0=1$ совпадающих точек в центре плана (рис. 16).

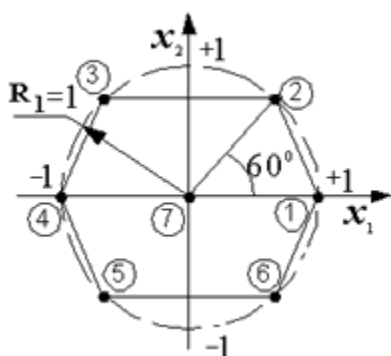


Рис. 16. Рототабельный план при $n = 2$ на основе правильного шестиугольника
Здесь при построении плана первый фактор варьируется на пяти уровнях, а второй – на трех уровнях.

Рототабельный план при $n=2$ на основе шестиугольника

	U	x_1	x_2	$\sum_{i=1}^n x_{iU}^2 = R$	$x_3 = x_1 x_2$	$x_4 = x_1^2 - 0,25$	$x_5 = x_2^2 - 0,25$
N_0	1	1	0	1,0	0	0,75	-0,25
	2	0,5	0,866	1,0	0,433	0	0,5
	3	-0,5	0,866	1,0	-0,433	0	0,5
	4	-1	0	1,0	0	0,75	-0,25
	5	-0,5	-0,866	1,0	0,433	0	0,5
	6	0,5	-0,866	1,0	-0,433	0	0,5
n_0	7	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
	8	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
	9	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
	10	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
	11	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
	12	0	0	0,0	0	-0,25	-0,25
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$		0	0		0	0	0
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$		3,0	3,0		0,75	1,5	1,5

Существуют рототабельные планы, где оба радиуса не нулевые. При этом количество точек на каждой поверхности и отношение радиусов связаны.

Числа точек окружностей рототабельного плана и отношение их радиусов

Число точек внешней окружности (N_0)	6	7	8	7	8	8
Число точек внутренней окружности (n_0)	5	5	5	6	6	7
Отношение радиусов окружностей (R_2/R_1)	0,204	0,267	0,304	0,189	0,25	0,176

Пример такого плана при $n=2$, $N_0=8$, $n_0=6$, $R_2 / R_1=0,25$

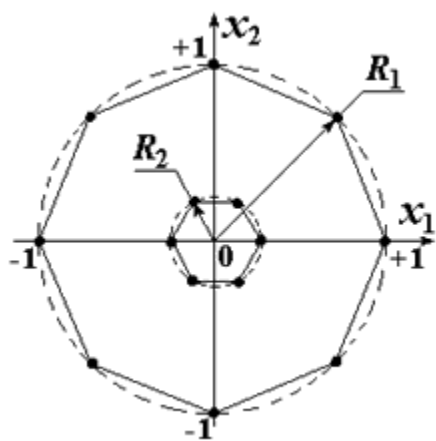


Рис. 17. Рототабельный план с двумя невырожденными окружностями.