

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**В.А.Барвинок, Ю.А.Вашуков**

**Методы экспериментальных исследований  
технологических процессов в производстве летательных  
аппаратов**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2012

УДК 621.791  
ББК 30.14  
К 93

Авторы: **Барвинок Виталий Алексеевич**  
**Вашуков Юрий Александрович**

Рецензенты:

Начальник производства ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс», канд. техн. наук В.Г. Небога;  
Заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения д-р. техн. наук, проф. В.А.Михеев;

Редакторская обработка Т. К. Кретирина  
Компьютерная верстка Ю.А.Вашуков  
Доверстка Ю.А.Вашуков

**Барвинок, В. А. Методы экспериментальных исследований технологических процессов в производстве летательных аппаратов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В.А.Барвинок, Ю.А.Вашуков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,25 Мбайт). - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)**

Приведены методы и принципы исследования технологических процессов в производстве летательных аппаратов.

Рассматриваются методика подготовки и проведения экспериментальных исследований. Представлена методология моделирования технологических процессов и определения регрессионных зависимостей.

Подробно рассматривается методология планирования эксперимента в экспериментальных исследованиях в технологических процессах производства летательных аппаратов.

Учебное пособие предназначено для обучения аспирантов по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»

Оно может быть также использовано для подготовки специалистов по специальностям 160201 «Самолето-и вертолетостроение», 160801 «Ракетостроение», 160802 «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» (Государственный образовательный стандарт второго поколения - ГОС-2), по направлению 160400.65 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» (Федеральный Государственный образовательный стандарт третьего поколения - ФГОС-3), а также для подготовки магистров по направлению 160400 «Ракетные комплексы и космонавтика».

Может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении СГАУ.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Классификация экспериментальных исследований

1.2. Методы и принципы исследования технологических процессов

### 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Методика подготовки экспериментального исследования

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Методология моделирования

3.2. Определение регрессионных зависимостей

3.2.1. Понятие связи. Виды связи в статистике

3.2.2. Определение математической зависимости

3.2.3. Определение тесноты корреляционной зависимости

### 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

#### ПРОИЗВОДСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

4.1. Общие понятия в математическом планировании эксперимента

4.2. Определение и выбор параметров оптимизации и факторов технологических процессов

4.3. Полный факторный эксперимент и дробные реплики

4.3.1. Полный факторный эксперимент

4.3.2. Дробный факторный эксперимент

4.3.3. Интерпретация результатов факторного эксперимента.

### 5. АНАЛИЗ И ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Анализ теоретико-экспериментальных исследований и формулирование выводов и предложений

5.2. Внедрение научных исследований

5.3. Эффективность научных исследований

## ВВЕДЕНИЕ

Особенностями экспериментальных исследований в авиа- и ракетостроении является их большой объем и структурное разнообразие. Эксперименты охватывают все этапы жизненного цикла изделия от проектирования до утилизации. Несмотря на это, они носят комплексный характер, что связано со сложностью объекта исследования и повышенными требованиями к качеству деталей, узлов, отсеков, агрегатов и систем летательного аппарата. Общей чертой, объединяющей исследователей, является эксперимент. Методы проведения экспериментов имеют много общего: исследователи стараются контролировать свой эксперимент или исключить влияние внешних переменных; стремятся уменьшить число переменных для уменьшения сроков и стоимости; всех интересует точность измерительных приборов и точность полученных данных. Каким бы простым ни был эксперимент, вначале составляется план его проведения. Требуется обнаружить ошибки и погрешности, неполадки в самом широком смысле. Нужно проверить приемлемость полученных результатов. В конце следует анализировать полученные результаты и дать их интерпретацию, поскольку без этого этапа весь процесс не имеет смысла.

Инженерный эксперимент обычно связывают с исследованиями механических, гидродинамических, электрических, тепловых и других процессов, происходящих в механизмах, машинах и приборах. Мы не будем делать различий между промышленными, лабораторными, поисковыми или другого типа экспериментами. Будем рассматривать только общие черты, присущие всем экспериментам.

Эксперименты и экспериментаторы могут отличаться друг от друга, но планирование, проведение и анализ данных осуществляются в одинаковой последовательности. Многие эксперименты являются дорогостоящими и на первый взгляд очень сложными. Однако каким бы сложным ни был эксперимент, его результаты мало отличаются от отчетов по лабораторным работам.

Например, при запуске исследовательской ракеты составляется несколько отчетов: о работе двигателей, о работе элементов системы управления, о траектории полета, о регистрации космического излучения, о поведении экипажа и др.

Любой эксперимент, каким бы сложным он ни казался, заканчивается представлением результатов, формулировкой выводов и выдачей рекомендаций. Результаты представляются в виде таблиц, графиков, аналитических или эмпирических зависимостей, в словесной форме.

Таким образом, сложные испытания ракет или ядерных реакторов в действительности представляют собой большое число отдельных экспериментов, выполняемых с помощью дорогостоящего испытательного оборудования; Более того, хотя и возможно представить себе исключительно сложный эксперимент, результаты которого удастся постигнуть после многочасового напряженного изучения, сомнительно, что такой эксперимент имеет большую ценность. Можно знать о существовании множества сложных взаимосвязей между данными, однако, если эти связи не будут представлены в виде графиков, уравнений или словесных описаний, понятных коллегам, будет просто потеряно время. Большинство инженерных экспериментов ведет к определенному действию — принятию решения, признанию неудачи или к продолжению испытаний. Эти действия возможны лишь только тогда, когда мы показываем другим то, что сами сделали.

Многообразие исследований по конечным целям можно разделить на три стратегических направления:

- 1) повышение тактико-технических характеристик объекта исследования (скорость, дальность, высота полета, тяга, масса, удельный расход топлива и т. п.);
- 2) повышение надежности или ее составляющих (работоспособность, ремонтпригодность, безотказность, долговечность, наработка на отказ, интенсивность отказов, ресурс, сохраняемость и др.) определенных узлов, агрега-

тов или изделий в целом различными конструкторскими и технологическими методами;

3) повышение экономической эффективности производства ЛА (себестоимость, трудоемкость, материале- и энергоемкость и т. д.).

Предметом рассмотрения данного учебного пособия являются методические вопросы подготовки и проведения экспериментальных исследований в области авиа и ракетостроения, которые встречаются при разработке новых конструкций и технологий изготовления и испытаний изделий аэрокосмической техники, при проектировании и применении нового технологического оборудования, новых методов обработки и др.

Основные рассматриваемые задачи:

- ознакомление с основными этапами проведения исследований;
- изучение методологии моделирования технологических процессов;
- ознакомление с методикой планирования экспериментов

## 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Классификация экспериментальных исследований

Под операцией в широком смысле слова понимается целенаправленная человеческая деятельность. Конечной целью исследования операций является отыскание оптимальных решений. В исследовании операций под оптимальным решением понимают решение, минимизирующее или максимизирующее некоторый критерий при заданной системе ограничений.

Исследование операций методически можно разделить на следующие этапы:

- составление математической модели операции;
- выбор критерия для оценки эффективности;
- определение информации, необходимой для исследования модели, и исследование математической задачи для отыскания оптимального решения.

В зависимости от наличия и вида ограничений, количества этапов в операции и формы модели находят применение различные виды математического программирования.

Методы математического программирования можно разделить две группы: аналитические и численные. На протяжении почти двухсот лет единственными математическими методами решения оптимальных задач оставались аналитические (дифференциальное и вариационное исчисление).

Для использования аналитических методов необходимо, чтобы расчетная формула критерия, связи между координатами и независимой переменной, а также начальные и конечные условия были представлены в форме функций, которые должны быть по крайней мере один раз дифференцируемыми и иметь конечное число точек разрывов. Для использования классических методов (дифференциального и вариационного исчисления) обязательно отсутствие ограничений. Однако лишь в редких случаях можно дать совершенное теоретическое описание реальной системы. Если же оптимальная функция известна нам неполностью, то процесс нахождения ее оптимума

обязательно связан с экспериментом, так как только с помощью измерений можно расширить наши знания об этой функции.

Важнейшей составной частью научных исследований является эксперимент, основой которого является научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями. Хотя экспериментальный подход всегда был, начиная с древнего мира, характерен для естественных наук, однако только с развитием теории операций возник интерес к методам оптимизации как средству решения задач, которые не поддаются классическим методам.

Само слово эксперимент происходит от лат. *experimentum* — проба, опыт. В научном языке и исследовательской работе термин «эксперимент» обычно используется в значении, общем для целого ряда сопряженных понятий: опыт, целенаправленное наблюдение, воспроизведение объекта познания, организация особых условий его существования, проверка предсказания. В это понятие вкладывается научная постановка опытов и наблюдение исследуемого явления в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за ходом явлений и воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий.

Само по себе понятие «эксперимент» означает действие, направленное на создание условий в целях осуществления того или иного явления и по возможности наиболее частого, т. е. не осложняемого другими явлениями. Основной целью эксперимента являются выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости гипотез и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования.

Постановка и организация эксперимента определяются его назначением. Эксперименты, которые проводятся в различных отраслях науки, являются химическими, биологическими, физическими, психологическими, социальными и т. п. Они различаются по способу формирования условий (естественных и искусственных); по целям исследования (преобразующие, констатирующие, контролирующие, поисковые, решающие); по организации проведения (лабораторные, натурные, полевые, производственные и т.п.); по



структуре изучаемых объектов и явлений (простые, сложные); по характеру внешних воздействий на объект исследования (вещественные, энергетические, информационные); по характеру взаимодействия средства экспериментального исследования с объектом исследования (обычный и модельный); по типу моделей, исследуемых в эксперименте (материальный и мысленный); по контролируемым величинам (пассивный и активный); по числу варьируемых факторов (однофакторный и многофакторный); по характеру изучаемых объектов или явлений (технологические, социометрические) и т. п. Конечно, для классификации могут быть использованы и другие признаки. Из числа названных признаков естественный эксперимент предполагает проведение опытов в естественных условиях существования объекта исследования (чаще всего используется в биологических, социальных, педагогических и психологических науках). Искусственный эксперимент предполагает формирование искусственных условий (широко применяется в естественных и технических науках). Преобразующий (созидательный) эксперимент включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой, формирование новых связей и отношений между компонентами объекта или между, исследуемым объектом и другими объектами. Исследователь в соответствии со вскрытыми тенденциями развития объекта исследования преднамеренно создает условия, которые должны способствовать формированию новых свойств и качеств объекта. Констатирующий эксперимент используется для проверки определенных предположений. В процессе этого эксперимента констатируется наличие определенной связи между воздействием на объект исследования и результатом, выявляется наличие определенных фактов. Контролирующий эксперимент сводится к контролю за результатами внешних воздействий на объект исследования с учетом его состояния, характера воздействия и ожидаемого эффекта. Поисковый эксперимент проводится в том случае, если затруднена классификация факторов, влияющих на изучаемое явление вследствие отсутствия достаточных предварительных (априорных) данных. По результатам поискового эксперимента

устанавливается значимость факторов, осуществляется отсеивание незначимых. Решающий эксперимент ставится для проверки справедливости основных положений фундаментальных теорий в том случае, когда две или несколько гипотез одинаково согласуются со многими явлениями. Это согласие приводит к затруднению, какую именно из гипотез считать правильной. Решающий эксперимент дает такие факты, которые согласуются с одной из гипотез и противоречат другой.

Примером решающего эксперимента служат опыты по проверке справедливости ньютоновской теории истечения света и волнообразной теории Гюйгенса. Эти опыты были поставлены французским ученым Фуко (1819—1868). Они касались вопроса о скорости распространения света внутри прозрачных тел. Согласно гипотезе истечения, скорость света внутри таких тел должна быть больше, чем в пустоте. Но Фуко своими опытами доказал обратное, т. е. что в менее плотной среде скорость света большая. Этот опыт Фуко и был тем решающим опытом, который решил спор между двумя гипотезами (в настоящее время гипотеза Гюйгенса заменена электромагнитной гипотезой Максвелла).

Другим примером решающего эксперимента может служить спор между Птолемеем и Коперником о движении Земли. Решающий опыт Фуко с маятником окончательно решил спор в пользу теории Коперника.

Лабораторный эксперимент проводится в лабораторных условиях с применением типовых приборов, специальных моделирующих установок, стендов, оборудования и т. д. Чаще всего в лабораторном эксперименте изучается не сам объект, а его образец. Этот эксперимент позволяет доброкачественно, с требуемой повторностью изучить влияние одних характеристик при варьировании других, получить хорошую научную информацию с минимальными затратами времени и ресурсов. Однако такой эксперимент не всегда полностью моделирует реальный ход изучаемого процесса, поэтому возникает потребность в проведении натурного эксперимента. Натурный эксперимент 1 проводится в естественных условиях и на реальных объектах. Этот

вид эксперимента часто используется в процессе натуральных испытаний изготовленных систем. В зависимости от места проведения испытаний натурные эксперименты подразделяются на производственные, полевые, полигонные, полунатурные и т. п. Натурный эксперимент всегда требует тщательного продумывания и планирования, рационального подбора методов исследования. Практически во всех случаях основная научная проблема натурального эксперимента — обеспечить достаточное соответствие (адекватность) условий эксперимента реальной ситуации, в которой будет работать впоследствии создаваемый объект. Поэтому центральными задачами натурального эксперимента являются: изучение характеристик воздействия среды на испытуемый объект; идентификация статистических и динамических параметров объекта; оценка эффективности функционирования объекта и проверка его на соответствие заданным требованиям.

Эксперименты могут быть открытыми и закрытыми, они широко распространены в психологии, социологии, педагогике. В открытом эксперименте его задачи открыто объясняются испытуемым, в закрытом - в целях получения объективных данных эти задачи скрываются от испытуемого. Любая форма открытого эксперимента влияет (часто активизирует) на субъективную сторону поведения испытуемых. В этой связи открытий эксперимент целесообразен только тогда, когда имеются возможность и достаточная уверенность в том, что удастся вызвать у испытуемого живое участие и субъективную поддержку намечаемой работе. Закрытый эксперимент характеризуется тем, что его тщательно маскируют; испытуемый не догадывается об эксперименте, и работа протекает внешне в естественных условиях. Такой эксперимент не вызывает у испытуемых повышенной настороженности и излишнего самоконтроля, стремления вести себя не так, как обычно.

Простой эксперимент используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры, с небольшим количеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, выполняющих простейшие функции. В сложном эксперименте изучаются явления или объекты с разветвленной

структурой (можно вы\* делить иерархические уровни) и большим количеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, выполняющих сложные функции. Высокая степень связности элементов приводит к тому, что изменение состояния какого-либо элемента или связи влечет за собой изменение состояния многих других элементов системы. В сложных объектах исследования возможно наличие нескольких разных структур, нескольких разных целей. Но все же конкретное состояние сложного объекта может быть описано. В очень сложном эксперименте изучается объект, состояние которого по тем или иным причинам до сих пор не удается подробно и точно описать. Например, для описания требуется больше времени, чем то, которым располагает исследователь между сменами состояний объекта или когда современный уровень знаний недостаточен для проникновения в существо связей объекта (либо они непонятны).

Информационный эксперимент используется для изучения воздействия определенной (различной по форме и содержанию) информации на объекты исследования (чаще всего информационный эксперимент используется в биологии, психологии, социологии, кибернетике и т.п.). С помощью этого эксперимента изучается изменение состояния объекта исследования под влиянием сообщаемой ему информации.

Вещественный эксперимент предполагает изучение влияния различных вещественных факторов на состояние объекта исследования. Например, влияние различных добавок на качество стали и т.п.

Энергетический эксперимент используется для изучения воздействия различных видов энергии (электромагнитной, механической, тепловой и т.д.) на объект исследования. Этот тип эксперимента широко распространен в естественных науках.

Обычный (или классический) эксперимент включает экспериментатора как познающего субъекта; объект или предмет экспериментального исследования и средства (инструменты, приборы, экспериментальные установки), при помощи которых осуществляется эксперимент. В обычном эксперименте

экспериментальные средства непосредственно взаимодействуют с объектом исследования. Они являются посредниками между экспериментатором и объектом исследования.

Модельный эксперимент в отличие от обычного имеет дело с моделью исследуемого объекта. Модель входит в состав экспериментальной установки, замещая не только объект исследования, но часто и условия; в которых изучается некоторый объект. Модельный эксперимент при расширении возможностей экспериментального исследования одновременно имеет и ряд недостатков, связанных с тем, что различие между моделью и реальным объектом может стать источником ошибок и, кроме того, экстраполяция результатов изучения поведения модели на моделируемый объект требует дополнительных затрат времени и теоретического обоснования правомочности такой экстраполяции.

Различие между орудиями эксперимента при моделировании позволяет выделить мысленный и материальный эксперимент. Орудиями мысленного (умственного) эксперимента являются мысленные модели исследуемых объектов или явлений (чувственные образы, образно-знаковые модели, знаковые модели). Для обозначения мысленного эксперимента иногда пользуются терминами: идеализированный или воображаемый эксперимент. Мысленный эксперимент является одной из форм умственной деятельности познающего субъекта, в процессе которой воспроизводится в воображении структура реального эксперимента. Структура мысленного эксперимента включает: построение мысленной модели объекта исследования, идеализированных условий эксперимента и воздействий на объект; сознательное и планомерное изменение, комбинирование условий эксперимента и воздействий на объект; сознательное и точное применение на всех стадиях эксперимента объективных законов науки, благодаря чему исключается абсолютный произвол. В результате такого эксперимента формируются выводы.

Материальный эксперимент имеет аналогичную структуру. Однако в материальном эксперименте используются материальные, а не идеальные

объекты исследования. Основное отличие материального эксперимента от мысленного в том, что реальный эксперимент представляет собой форму объективной материальной связи сознания с внешним миром, между тем как мысленный эксперимент является специфической формой теоретической деятельности субъекта.

Сходство мысленного эксперимента с реальным в значительной мере определяется тем, что всякий реальный эксперимент, прежде чем быть осуществленным на практике, сначала проводится человеком мысленно в процессе обдумывания и планирования. Поэтому мысленный эксперимент нередко выступает в роли идеального плана реального эксперимента, в известном смысле предваряя его. Мысленный эксперимент имеет более широкую сферу применения, чем реальный эксперимент, так как применяется не только при подготовке и планировании последнего, но и в тех случаях, когда проведение реальных опытов представляется невозможным. Так, Галилей в мысленном эксперименте пришел к выводу о существовании движения по инерции, опрокинувшему аристотелевскую точку зрения, согласно которой движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает свое действие. Этот вывод мог быть получен только с помощью мысленного эксперимента. По этому поводу А. Эйнштейн говорил следующее: «Мы видели, что закон инерции нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести лишь умозрительно — мышлением, связанным с наблюдением. Этот эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведет к глубокому пониманию действительных экспериментов».

Мысленный эксперимент, заменяя собой реальный, расширяет границы познания, ибо обеспечивает получение такой информации, которую иными средствами добыть невозможно. Мысленный эксперимент позволяет преодолеть неизбежную ограниченность реального опыта путем абстрагирования от действия нежелательных, затемняющих причин, полное устранение которых в реальном эксперименте практически недостижимо.

Мысленный эксперимент является существенным моментом всякой

творческой деятельности. А. Эйнштейн в автобиографических воспоминаниях в связи с разработкой специальной теории относительности писал: «В этом году в Аарау у меня возник вопрос: если бы можно было погнаться за световой волной со скоростью света, то мы имели бы перед собой не зависящее от времени волновое поле. Но все-таки это кажется невозможным! Это было первым детским мысленным экспериментом, который относится к специальной теории относительности. Открытие не является делом логического мышления, даже если конечный продукт связан с логической формой».

Мысленный эксперимент используется не только учеными, но и писателями, художниками, педагогами, врачами. Мысленное экспериментирование ярко проявляется в мышлении шахматистов. Огромна роль мысленного эксперимента в техническом конструировании и изобретательстве. Результаты мысленного эксперимента находят отражение в формулах, чертежах, графиках, набросках, эскизных проектах и т. п.

Пассивный эксперимент предусматривает измерение только выбранных показателей (параметров, переменных) в результате наблюдения за объектом без искусственного вмешательства в его функционирование. Примерами пассивного эксперимента является наблюдение: за интенсивностью, составом, скоростями движения транспортных потоков; за числом заболеваний вообще или какой-либо определенной болезнью; за работоспособностью определенной группы лиц; за показателями, изменяющимися с возрастом; за числом дорожно-транспортных происшествий и т. п.

Пассивный эксперимент, по существу, является наблюдением, которое сопровождается инструментальным измерением выбранных показателей состояния объекта исследования.

Активный эксперимент связан с выбором специальных входных сигналов (факторов) и контролирует вход и выход исследуемой системы.

Однофакторный эксперимент предполагает: выделение нужных факторов; стабилизацию мешающих факторов; поочередное варьирование интересующих исследователя факторов.

Стратегия многофакторного эксперимента состоит в том, что варьируются все переменные сразу и каждый эффект оценивается по результатам всех опытов, проведенных в данной серии экспериментов.

Технологический эксперимент направлен на изучение элементов технологического процесса (производства, оборудования, деятельности работников и т.п.) или процесса в целом.

Социометрический эксперимент используется для измерения существующих межличностных социально-психологических отношений в малых группах с целью их последующего изменения.

Как уже отмечалось, приведенная классификация экспериментальных исследований - не может быть признана полной, поскольку с расширением научного знания расширяется и область применения экспериментального метода. Кроме того, в зависимости от задач эксперимента различные его типы могут объединяться, образуя комплексный или комбинированный эксперимент.

Для проведения эксперимента любого типа необходимо:

- разработать гипотезу, подлежащую проверке; создать программы экспериментальных работ;
- определить способы и приемы вмешательства в объект исследования;
- обеспечить условия для осуществления процедуры экспериментальных работ;
- разработать пути и приемы фиксирования хода и результатов эксперимента; подготовить средства эксперимента (приборы, установки, модели и т.п.);
- обеспечить эксперимент необходимым обслуживающим персоналом.

Особое значение имеет правильная разработка методик эксперимента. Методика — это совокупность мыслительных и физических операций, размещенных в определенной последовательности, в соответствии с которой достигается цель исследования. При разработке методик проведения эксперимента необходимо предусматривать: проведение целенаправленного предва-



рительного наблюдения над изучаемым объектом или явлением с целью определения исходных данных (гипотез, выбора варьирующих факторов); создание условий, в которых возможно экспериментирование (подбор объектов для экспериментального воздействия, устранение влияния случайных факторов); определение пределов измерений; систематическое наблюдение за ходом развития изучаемого явления и точные описания фактов; проведение систематической регистрации измерений и оценок фактов различными средствами и способами; создание повторяющихся ситуаций, изменение характера условий и перекрестные воздействия, создание усложненных ситуаций с целью подтверждения или опровержения ранее полученных данных; переход от эмпирического изучения к логическим обобщениям, к анализу и теоретической обработке полученного фактического материала.

Правильно разработанная методика экспериментального исследования предопределяет его ценность. Поэтому разработка, выбор, определение методики должно проводиться особенно тщательно. При определении методики необходимо использовать не только личный опыт, но и опыт товарищей и других коллективов. Необходимо убедиться в том, что она соответствует современному уровню науки, условиям, в которых выполняется исследование. Целесообразно проверить возможность использования методик, применяемых в смежных проблемах и науках.

Выбрав методику эксперимента, исследователь должен удостовериться в ее практической применимости. Это необходимо сделать даже в том случае, если методика давно апробирована практикой других лабораторий, так как она может оказаться неприемлемой или сложной в силу специфических особенностей климата, помещения, лабораторного оборудования, персонала, объекта исследований и т. п.

Перед каждым экспериментом составляется его план (программа), который включает: цель и задачи эксперимента; выбор варьирующих факторов; обоснование объема эксперимента, числа опытов; порядок реализации опытов, определение последовательности изменения факторов; выбор шага изме-

нения факторов, задание интервалов между будущими экспериментальными точками; обоснование средств измерений; описание проведения эксперимента; обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента. Применение математической теории эксперимента - позволяет уже при планировании определенным образом оптимизировать объем экспериментальных исследований и повысить их точность.

Важным этапом подготовки к эксперименту является определение его целей и задач. Количество задач для конкретного эксперимента не должно быть слишком большим (лучше 3...4, максимально 8...10). Перед экспериментом надо выбрать варьируемые факторы, т.е. установить основные и второстепенные характеристики, влияющие на исследуемый процесс, проанализировать расчетные (теоретические) схемы процесса. На основе этого анализа все факторы классифицируются и составляется из них убывающий по важности для данного эксперимента ряд. Правильный выбор основных и второстепенных факторов играет важную роль в эффективности эксперимента, поскольку эксперимент и сводится к нахождению зависимостей между этими факторами. Иногда бывает трудно сразу выявить роль основных и второстепенных факторов. В таких случаях необходимо выполнять небольшой по объему предварительный поисковый опыт.

Методы измерений должны базироваться на законах специальной науки — метрологии, изучающей средства и методы измерений. При экспериментальном исследовании одного и того же процесса (наблюдения и измерения) повторные отсчеты на приборах, как правило, неодинаковы. Отклонения объясняются различными причинами — неоднородностью свойств изучаемого тела (материал, конструкция и т.д.), не совершенностью приборов и классов их точности, субъективными особенностями экспериментатора и др. Чем больше случайных факторов, влияющих на опыт, тем больше расхождение цифр, получаемых при измерениях, т. е. тем больше отклонения отдельных измерений от среднего значения. Это требует повторных измерений, а следовательно, необходимо знать их минимальное количество. Под потреб-

ным минимальным количеством измерений понимают такое количество измерений, которое в данном опыте обеспечивает устойчивое среднее значение измеряемой величины, удовлетворяющее заданной степени точности. Установление потребного минимального количества измерений имеет большое значение, поскольку обеспечивает получение наиболее объективных результатов при минимальных затратах времени и средств.

В методике подробно разрабатывается процесс проведения эксперимента, составляется последовательность (очередность) проведения операций измерений и наблюдений, детально описывается каждая операция в отдельности с учетом выбранных средств для проведения эксперимента, обосновываются методы контроля качества операций, обеспечивающие при минимальном (ранее установленном) количестве измерений высокую надежность и заданную точность. Разрабатываются формы журналов для записи результатов наблюдений и измерений.

Важным разделом методики является выбор методов обработки и анализа экспериментальных данных. Обработка данных сводится к систематизации всех цифр, классификации, анализу. Результаты экспериментов должны быть сведены в удобочитаемые формы записи — таблицы, графики, формулы, номограммы, позволяющие быстро и доброкачественно сопоставлять полученное и проанализировать результаты. Все переменные должны быть оценены в единой системе единиц физических величин.

Особое внимание в методике должно быть уделено математическим методам обработки и анализу опытных данных, например, установлению эмпирических зависимостей, аппроксимации связей между варьирующими характеристиками, установлению критериев и доверительных интервалов и др. Диапазон чувствительности (нечувствительности) критериев должен быть стабилизирован (эксплицирован).

Результаты экспериментов должны отвечать трем статистическим требованиям: требование эффективности оценок, т. е. минимальность дисперсии отклонения относительно неизвестного параметра; требование состоятельно-

сти оценок, т. е. при увеличении числа наблюдений оценка параметра должна стремиться к его истинному значению; требование несмещенности оценок - отсутствие систематических ошибок в процессе вычисления параметров. Важнейшей проблемой при проведении и обработке эксперимента является совместимость этих трех требований.

После разработки и утверждения методики устанавливается объем и трудоемкость экспериментальных исследований, которые зависят от глубины теоретических разработок, степени точности принятых средств измерений (чем четче сформулирована теоретическая часть исследования, тем меньше объем эксперимента). В зависимости от предварительной теоретической подготовки возможны три случая проведения эксперимента: 1) если теоретически получена аналитическая зависимость, которая однозначно определяет исследуемый процесс (например,  $r = 3e^{2x}$ ), то объем эксперимента для подтверждения данной зависимости оказывается минимальным, поскольку функция однозначно определяется экспериментальными данными; 2) если теоретическим путем установлен лишь характер зависимости (например,  $y = ae^{kx}$ ), т.е. задано семейство кривых, то экспериментальным путем необходимо определить как  $a$ , так и  $k$  и, следовательно, объем эксперимента возрастает; 3) если теоретически не удалось получить каких-либо зависимостей и разработаны лишь предположения о качественных закономерностях процесса, то целесообразен поисковый эксперимент, при котором объем экспериментальных работ резко возрастает. В таких случаях уместно применять метод математического планирования эксперимента.

На объем, и трудоемкость проведения экспериментальных работ существенно влияет вид эксперимента. Например, полевые эксперименты, как правило, всегда имеют большую трудоемкость, что следует учитывать при планировании. После установления объема экспериментальных работ составляется перечень необходимых средств измерений, объем материалов, список исполнителей, календарный план и смета расходов.

План-программу рассматривает научный руководитель, обсуждают в

научном коллективе и утверждают в установленном порядке.

Если теоретические методы позволяют найти почти оптимальное решение, то это предварительное решение часто можно улучшить с помощью непосредственного эксперимента на самой системе. Проведение такого эксперимента схематически можно разбить на ряд этапов:

- выбор ряда значений регулируемых параметров;
- фиксирование неконтактируемых параметров;
- определение результатов эксперимента.

В общем случае на эти результаты могут оказать влияние нерегулируемые ненаблюдаемые факторы, что и приводит, как правило, к ошибкам эксперимента. Всякое исследование, направленное на отыскание оптимального значения неизвестной функции, является задачей поиска. Естественно стремление получить полную информацию об исследуемой функции при наименьшем числе экспериментов. Набор правил, по которым производятся эти эксперименты, называется *стратегией поиска*. Среди всех стратегий наибольшее значение имеет та, которая приводит к цели оптимальным способом, т. е. мы стремимся не только найти оптимум функции, но также оптимизировать сам способ нахождения оптимума решения.

Традиционный метод так называемого слепого поиска (метод проб и ошибок), состоящий в последовательном переборе всех возможных значений и запоминании наибольшего значения оптимизируемого критерия,— очень трудоемок и неэкономичен. Так, в процессе поиска материала для нити накала электрических ламп Эдиссоном было проведено около шести тысяч разнообразных экспериментальных исследований. Только развитие науки об исследовании операций (возникшей в годы второй мировой войны) позволило разработать оптимальные методы поиска. Задачи, решаемые методом поиска, можно классифицировать либо в зависимости от наличия или отсутствия ошибок эксперимента, либо по числу независимых переменных.

В первом случае задачи поиска, в которых отсутствуют неизвестные или случайные факторы, являются не случайными - *детерминированными*.

Задачи же, в которых нельзя пренебречь ошибками эксперимента, являются случайными - *стохастическими*. Стохастические задачи естественно решаются труднее детерминированных, а влияние случайных ошибок заключается главным образом в уменьшении скорости поиска.

Несмотря на то, что во многих случаях ошибками эксперимента нельзя пренебречь, на практике встречается много интересных задач оптимизации, которые полностью детерминированы. Действительно, часто оказывается, что расчетная модель не содержит случайных элементов. В этом случае задача поиска также полностью детерминирована, если даже сама модель приближенна и основана на неточных данных. Стратегии поиска разделяются на две взаимно исключающие друг друга группы: пассивный и последовательный поиск. Стратегии, в которых заранее, до получения каких-либо результатов, определяются все дальнейшие эксперименты, т. е. не учитываются результаты предыдущих шагов, относятся к *пассивным*, а стратегии, в которых будущие эксперименты зависят от предшествующих результатов, к *последовательным*.

Критерием эффективности поиска служит функция интервала неопределенности от числа шагов  $n$ , где под интервалом неопределенности понимают разность значений переменной, между которыми гарантировано нахождение экстремума.

Детерминированные методы поиска хорошо разработаны для отыскания экстремума функции одной переменной, имеющей один максимум на интервале допустимого изменения значений переменной. Известно, что минимаксная стратегия дает содержательную стратегию поиска. В случае детерминированной задачи минимаксной стратегией является стратегия последовательного одномерного поиска, а применение метода так называемого золотого сечения значительно увеличивает эффективность последовательного поиска по сравнению с пассивным. Часто невозможность проведения последовательного поиска (из-за отсутствия времени) заставляет исследователя применять пассивную стратегию поиска.

Всякое экспериментальное исследование представляет собой наблюдение за каким-либо единичным явлением или группой однотипных явлений и не дает еще права на составление суждения относительно протекания явления в условиях, отличающихся от условий эксперимента (выход за границы масштаба подобия, т. е. иные геометрические характеристики явления, иные физические свойства среды, иной режим проведения испытаний и пр.). Следует помнить, что только путем эксперимента, поставленного на основе теории подобия и принципа размерностей, можно получить закономерно обобщенные выводы и установить строгие границы их применения. Особая ценность теории подобия заключается в том, что она устанавливает методы постановки эксперимента и обработки его результатов при изучении вопросов, не поддающихся строгому математическому анализу. Отсюда представляется, совершенно обязательным для инженера-экспериментатора усвоение основ теории подобия и умение использовать ее на практике.

Основы учения о подобии были положены Ньютоном, который изложил основные принципы механического, кинематического и динамического подобий.

Современная теория подобия зиждется на трех теоремах, оперирующих терминами «критерии подобия» и «критериальные уравнения».

Решая вопрос о требованиях, которым должна отвечать модель для того, чтобы протекающие в ней процессы были подобны процессам, проходящим в природе, моделирование имеет целью заменить изучение явлений в природе более просто осуществимым изучением аналогичных явлений на моделях меньшего или большего масштаба в специальных лабораторных условиях.

Применительно к вопросам формоизменения в производстве летательных аппаратов посредством моделирования можно исследовать:

- 1) закономерности формоизменения металлов;
- 2) деформированное состояние металла в различных условиях обработки давлением;

- 3) влияние пластической деформации на изменение структуры и свойств металлов;
- 4) влияние различных схем напряженно-деформированного состояния на поведение металла;
- 5) влияние различных факторов (параметров) на сопротивление деформированию;
- 6) распределение напряжений и деформаций в очаге деформаций;
- 7) определяющие параметры процессов при освоении новых материалов;
- 8) новые технологические процессы.

Приближенные методы расчетов технологических процессов обработки металлов давлением построены на гипотетических началах инженерной дисциплины — прикладной теории частичности (сопротивления материалов пластическому деформированию) при учете основных закономерностей изменения физико-механического состояния. Под физико-механическим состоянием здесь понимается напряженно-деформированное состояние металла, обусловленное его кристаллической структурой и выявляющееся в способности при заданных способе и режиме формоизменения пластически деформироваться и данной деформации сопротивляться.

Таким образом, решения рассмотренных задач связаны с проведением экспериментальных исследований.

## 1.2. Методы и принципы исследования технологических процессов

За последнее время получили достаточное развитие методы экспериментальных исследований, которые разбиваются применительно к изучаемым проблемам на четыре комплексы:

- 1) методы экспериментальных исследований в области металловедения;
- 2) в области механики материалов;
- 3) по обоснованию фундаментальных основ прикладной теории пластичности;
- 4) собственно по технологии формоизменения.



К комплексу металлургических экспериментальных исследований (применительно к формоизменению) следует, прежде всего, отнести методы выявления микроструктуры, подлежащих обработке давлением заготовок полуфабрикатов и окончательных изделий. Так, например, для выявления микроструктуры металлов пользуются обычными операциями, заключающимися в предварительном шлифовании темплетта на абразивном круге, шлифовании на наждачной бумаге разных номеров, полировании на мягком фетре и химическом травлении различными реактивами. Протравленный микрошлиф рассматривается и фотографируется на металлографическом микроскопе. По величине зерна микроструктура оценивается стандартной восьмибалльной шкалой, причем приближенно балл (номер) исследуемой структуры определяется путем визуального сравнения микроструктуры при увеличении в 100 крат с указанной восьмибалльной шкалой или при помощи точных методов определения линейных размеров единичных зерен (окулярмикрометром микроскопа или измерениями увеличенного эпидиаскопом изображения микрошлифа на экране). В целях изучения выявленной на микрошлифах структуры пластически формоизменяемых металлов и отдельных составляющих эту структуру зерен, в частности, их размеров, формы и кристаллографической ориентации до и после деформации, степени равномерности в пределах рассматриваемого объема и характера взаимных смещений зерен и пр. разработан ряд металлургических методов экспериментального исследования.

Исключительно эффективным может оказаться обычное рассматривание микроструктуры при большом увеличении при условии непрерывного в течение всего процесса формоизменения наблюдения, например, при испытании металлического образца на растяжение. На заснятом в 1940 г. Смирновым-Аляевым и Мартыновым мультфильме процесса растяжения плоского образца специальной формы четко выявлены отдельные фазы процесса: появление на отдельных зернах линий начальных микросдвигов, разрушение межкристаллической прослойки, начало массового взаимного смещения зерен, их расчленение на отдельные элементы — блоки и, наконец, появление

трещин разрушения. Рассматривание структуры металлов при небольших (порядка десяти крат) увеличениях применяется, например, при выявлении загрязняющих структуру включений. Благодаря нарушению сплошности строения металла включения эти могут существенно сказаться на его механических свойствах, а методика их количественного определения становится наряду с другими задачами микроисследований структуры весьма актуальной.

Практически применяются следующие методы оценки загрязненности структуры:

- по эталонной шкале загрязненного места на шлифе определенной площади;
- на основании замеров на шлифе величины и подсчета количества включений.

Как известно, плоскость физического сечения конгломерата металлических зерен (плоскость микрошлифа) рассекает отдельные зерна, как правило, в зависимости от их кристаллографической ориентации приближенно по основным кристаллографическим плоскостям (например, при кубической системе кристаллизации по плоскостям куба, октаэдра, ромбододекаэдра).

Для выявления кристаллографической ориентации зерен, а следовательно, оценки влияния анизотропии отдельных составляющих структуры в металловедении применяются методы вдавливания индентора (метод микротвердости) и термотравления, а также широко распространенные в лабораторной практике методы определения твердости металлов по Бринелю и Роквеллу.

К особой группе экспериментальных металловедческих исследований следует причислить методы выявления зон неоднородности протекания деформации структурных составляющих (методы делительных сеток) и зон упрочнения обрабатываемых давлением металлических изделий (методы фигур текучести и линий скольжения). Кроме того, широко распространен метод микроструктурного анализа, построенный на приложении к микро-

структуре металлов принципов механики сплошных сред, а поэтому занимающем в основных группах экспериментальных исследований промежуточное место.

Сущность метода микроструктурного анализа, построенного на изучении взаимного смещения отдельных зерен микроструктуры формоизменяемого металла, заключается в том, что на микрошлифах металлической заготовки, изготовленных в исходном состоянии, определяется среднее значение длины отрезков прямых, проведенных лучеобразно из выбранной точки шлифа и пересекающих определенное постоянное число зерен (исходная структура металлической заготовки предполагается возможно однородной).

В последующем в интересующей нас зоне данного пластически формоизмененного металла производится та же операция проведения и замера длин отрезков, пересекающих то же количество зерен, но уже в деформированном состоянии (вытянутых, удлиненных и пр.). Таким образом, за меру деформации в окрестности выбранной точки шлифа принимается отношение квадратов длин отрезков в исходном и деформированном состоянии как функция угла, составляемого рассматриваемым отрезком, например, с осью симметрии формоизменяемого тела. Вытекая из закона механики сплошных сред — преобразования сферы в эллипсоид (на плоскости сечения — окружности в эллипс), — данная функциональная зависимость отображается независимо от вида деформации тела, как правило, разверткой эллипса, т. е. синусоидальной кривой, по которой устанавливаются в окрестности рассматриваемой точки направления главных осей деформации значения главных компонентов деформированного состояния, а затем вычисляются интенсивность имевшего места формоизменения и его вид. В последующем в условиях монотонно (однозначно) протекающего процесса формоизменения, исходя из диаграммы механических свойств рассматриваемого металла (аппроксимированной зависимости интенсивности напряженного состояния от степени деформации), вычисляются интенсивность, компоненты и вид напряженного состояния металла в окрестности рассматриваемой точки.

*Вторым комплексом исследований* является экспериментальное изучение механических свойств материалов, предназначенных к процессам формоизменения. Одним из главнейших критериев суждения о пригодности материалов деталей машин и механизмов при формоизменении и последующей эксплуатации являются их механические свойства, характеризующиеся при различных режимах температурно-силового воздействия их прочностью, пластичностью, вязкостью и др. Вместе с тем, опыт конструирования и производства металлоизделий говорит о недостаточном совершенстве современных механических испытаний металлов, например, на прочность, пластичность и вязкость, о значительном в ряде случаев расхождении механических характеристик материала заготовок и обработанных изделий, о создаваемых в них пластической обработкой сложных полей напряженно-деформированного состояния. Действительно, если, например, при нагреве материала в нем создается скалярное поле, а при исследовании гидродинамических процессов — векторное, то при изучении напряженного и деформированного состояния даже изотропного тела встречаемся с тензорным полем. Каждой точке поля соответствует тензор, характеризующийся в общем случае шестью векторными величинами. Связь между тензорами напряжений и деформаций не всегда можно задать аналитическими зависимостями. Сложность задачи, обусловливается неоднородностью напряженного и деформированного состояния по объему не только обрабатываемых давлением деталей, но даже простейших по форме образцов, предназначенных для испытания механических свойств (в зоне шейки растягиваемых цилиндрических или плоских образцов, в торцевых зонах осаживаемых цилиндров и др.).

Усредняемые, как правило, по объему образца значения напряжений и деформаций, а также величина затрачиваемой работы формоизменения не обеспечивают надежности суждений о величине истинных локальных напряжений и деформаций — обстоятельство, предопределяющее возможность появления преждевременного нарушения сплошности строения и др.

Если к перечисленному добавить влияние таких факторов испытаний, как характер приложения деформирующих сил (статический, динамический, знакопеременный), скорость протекания деформации, температура, анизотропия строения, поверхностные эффекты и пр., то сложность более или менее достоверной оценки способности материалов при формоизменении по данным их обычных предварительных механических испытаний становится совершенно очевидной.

Оценку технологических свойств материалов осложняют такие факторы производственной обработки давлением, как переменность сил трения на контактирующихся с давящим инструментом поверхностях, неравномерность распределения по объему тела температуры, переменные скорости перемещающегося инструмента и пр. Все вышеперечисленные реальные производственные условия формоизменения издавна наталкивали исследователей на переход к испытаниям типа воспроизведения производственных процессов, т. е. к испытаниям «в натуре», называемым технологическими. Однако и здесь можно столкнуться с двоякого рода осложнениями: во-первых, при воспроизведении реального технологического процесса лабораторным испытанием неизбежны в какой-то мере упрощение схемы напряженного состояния обрабатываемой детали, а следовательно, отход от реального процесса, а, во-вторых, его доподлинная имитация делает технологическое испытание беспредметным.

Применительно к процессам формоизменения современные экспериментальные исследования в области механики материалов (исследования второго комплекса) можно подразделить на три основные группы.

1. Стандартные контрольно-приемочные испытания механических свойств исходных, подлежащих пластической обработке материалов. Сюда относятся обычные испытания на статическую и динамическую прочность, на способность выявлять и сопротивляться пластической деформации при основных видах напряженного состояния, на определение вязкости и твердости и др.

2. Испытания, имеющие основной целью установление зависимости механических свойств материалов от физико-химических параметров их строения, а также определение способности материалов выявлять и сопротивляться деформации в условиях производства (при горячей, полугорячей и холодной обработке), при различных скоростных режимах формоизменения и влияние «жесткости—мягкости» схем напряженного состояния на предельно прочную пластичность.

В отличие от стандартных испытаний перечисленные испытания второй группы, как правило, не узаконены стандартами и находятся в стадии дальнейших усовершенствований.

3. Технологические испытания, порожденные неспособностью современной науки о твердом пластически деформируемом теле полностью охватить и описать физико-механическую сущность современных прогрессивных процессов обработки материалов. На протяжении десятков лет практическое осуществление новейших прогрессивных методов пластической обработки металлов, как правило, значительно опережает теоретическое обоснование их сущности, расчет и рациональное ими управление (операции ударного обратного выдавливания, ротационное выдавливание, импульсная, взрывная штамповка, штамповка, основанная на сверхпластичности некоторых металлов и др.).

Вместе с тем такие технологические испытания, как проба на разбортовку и сплющивание труб, осаживание цилиндров, гибка прутков на оправке, выдавливание сферической лунки, на срез листового материала, изгиб плоских образцов и ряд других, неизбежно включают в себя побочные факторы, затемняющие картину напряженно-деформированного состояния материала, существенно в ряде случаев отдаляющих технологические испытания от исследуемого реального технологического процесса. К этим факторам надо отнести:

- несоответствие граничных условий задачи;
- несоответствие температурно-скоростного режима;

- наложение на реальную схему напряженного состояния дополнительных, не характерных для реального процесса напряжений, смягчающих или ужесточающих реальную схему.

Поскольку технологическое испытание заканчивается обычно разрушением материала, то по его результатам весьма затруднительно судить о предельно прочной пластичности и сопротивляемости материала, подвергаемого обработке в условиях данной технологической операции. Поэтому представляется, что в дальнейшем, по мере усовершенствования расчетных методов прикладной теории пластичности, технологические испытания будут отпадать за ненадобностью, уступая место точным расчетам соответствующих технологических процессов, основанным на результатах стандартных испытаний механических свойств материалов.

В заключение рассмотрения экспериментальных испытаний, отнесенных нами ко второму комплексу, приведем несколько характерных для этого комплекса исследований. В первую очередь необходимо отметить исследования механизма наиболее распространенного из всех видов испытаний — испытания материалов на простое растяжение. Как известно, наиболее «чистое» в смысле минимального влияния на рабочую часть образца его торцовых окончаний — испытание растяжением — осложняется в своей заключительной фазе образованием шейки, сопровождающееся сложным характером напряженно-деформированного состояния и разрушением образца. Естественны устремления исследователей к изучению этой последней фазы процесса растяжения, исчерпывающие результаты которого позволят количественно наиболее полно оценить способность испытываемого металла к пластической обработке.

Наряду с уже упомянутыми методами микроскопического и микроструктурного анализа, микротвердости, поверхностных сеток, фигур течения и прочих методов здесь находят применение рентгеноструктурный анализ, метод фотопластичности, фотограмметрический метод изучения пластиче-

ской деформации, а также весьма эффективный метод мультифильмирования.

Особую роль в технологии процессов формоизменения должны сыграть пока еще малоизученные испытания металлов на выявление влияния на их предельно прочную пластичность — жесткость (мягкость) схем напряженного состояния. Предложенные испытательные машины и аппаратура, предназначенные для проведения данного рода исследований, весьма сложны конструктивно и пока эксплуатационно мало доступны для использования в условиях промышленности.

К особо важным для технологии процессов формоизменения следует отнести экспериментальные приемы изучения фактора трения, возникающего на поверхностях заготовок, контактирующих с поверхностями формообразующего инструмента.

За время всего процесса пластического формоизменения величина поверхностных сил трения, зависящая от формы и состояния трущихся поверхностей, характера напряженного поля, температуры, удельного давления и скорости относительных сдвигов, должна быть в достаточной мере точно известна. А поскольку имеющиеся в нашем распоряжении результаты классических исследований, например Зибеля, по определению коэффициента статического трения (устранением явлений бочкообразования обжимаемых цилиндров) не вскрывают природы и закономерностей механизма трения, соприкасающихся твердых тел, то с повестки дня не сходят такие темы исследовательской работы в данной области, как установление влияния увеличения обжимающего испытываемый образец давления на постоянство величины коэффициента статического трения (правомерность закона Амонтон—Кулона при высоких удельных давлениях), равно как и постоянство или изменение величины этого коэффициента с изменением скорости относительных смещений трущихся поверхностей и др. Из результатов одного из проведенных в этом направлении исследований, в котором величина коэффициента трения при различных усилиях обжатия цилиндрического образца опреде-



лялась на специально сконструированном приспособлении к лабораторному прессу, закон Амонтона—Кулона для областей высоких удельных давлений и при различных ступенях возрастания скорости относительного смещения образца оказался в допустимых пределах точности эксперимента вполне приемлемым.

Экспериментальные исследования рассматриваемого комплекса связанные с изучением влияния на протекание пластической деформации металлов таких факторов, как температура и скорость приложения нагрузки, обычно связаны с разработкой и применением установок для нагрева в обычной и нейтральной средах, бассейнов и камер для осуществления подрыва бризантных взрывчатых веществ, установок для создания мощных магнитных полей импульсного воздействия, а также специальных измерительных устройств, основанных на осциллограммометрии и измерении электрическими методами неэлектрических величин.

Еще одним примером исследования, относящегося к рассматриваемому комплексу является исследование по определению предельно прочной пластичности (начало разрушения) материалов при технологическом испытании на перегиб. Основной задачей данного исследования является применение разработанного на принципах сопротивления материалов пластическому деформированию метода предварительного расчета параметров технологического испытания на перегиб. Факт удачного использования этого метода, построенного на принципах обычного испытания механических свойств материалов, т. е. идея предварительного расчета результативных параметров данного технологического испытания по данным обычных испытаний механических свойств рассматриваемого материала — ставит под сомнение необходимость проведения этого испытания вообще.

*К третьему комплексу* — комплексу исследований по обоснованию фундаментальных основ прикладной теории пластичности — относятся все экспериментальные исследования по разработке инженерных методов расчета технологических процессов пластической обработки металлов. С одной

стороны, на сложность физико-механической сущности процессов формоизменения и на связанные с этим затруднения при проектировании и расчетах этих процессов, с другой. Поэтому одной из главнейших задач, стоящих перед исследователями, является дальнейшая разработка прикладной инженерной дисциплины, которая удовлетворяла бы, по крайней мере, следующим основным требованиям: во-первых, расчетные методы этой дисциплины должны базироваться на принципах механики пластически деформированного тела в их современном состоянии разработки; во-вторых, точность результатов данных ее расчетных методов должна соответствовать точности, продиктованной требованиями производственной практики и, в-третьих, математический аппарат этой дисциплины должен быть на уровне вузовской подготовки исследователя. Существуют два способа приближения к решению этой задачи — установлению действительности инженерного расчета технологического процесса пластической обработки металла: это сопоставление данных инженерного расчета с параметрами, полученными в результате расчетов на принципах современной математической теории пластичности и не связанной с экспериментальными исследованиями. Другой путь — это сопоставление результатов инженерного расчета с данными непосредственной, опытной их проверки, т. е. средствами прямого экспериментального исследования.

Действительно, степень приближения данных инженерного расчета к результатам непосредственного эксперимента, проведенного в производственных или лабораторных условиях в обоснованных границах точности, является наилучшим критерием достоверности принятых при инженерных расчетах упрощающих задачу допущений. С другой стороны, неудовлетворительный результат сопоставления расчетных и опытных данных требует пересмотра принятых допущений, принятых методов расчета, уточнения самой постановки задачи.

В соответствии с многообразием условий каждой данной конкретной задачи и выбором упрощающих допущений возникает ряд разнохарактерных

методов их решения. Так, факторы первостепенной важности в условиях одной задачи становятся факторами второстепенными, пренебрежимыми в условиях другой; допущения, закономерные для одного случая, становятся неприемлемыми для другого и т. д.

Горячая обработка металлов давлением, к которой относятся многочисленные операции свободнойковки,ковки в подкладных штампах, облойная и безоблойная штамповка и ряд других, играет огромную роль в современной технологии машиностроения. Ввиду того, что при этом упрочнением металла можно пренебречь, при анализе горячих процессов принимается одно из основных упрощающих допущений о независимости интенсивности напряженного состояния поковки от итоговой (результативной) деформации. Зная, что влияние скорости деформации и температуры на интенсивность напряженного состояния поковки может быть учтено усредненно по всему объему деформируемого металла, можно принять упрощающее допущение, что величину этой интенсивности в любой рассматриваемый момент можно полагать постоянной для всего тела (допущение об идеальной пластичности деформируемого вещества). К еще одному упрощающему допущению можно отнести допущение о неизменности в процессе деформации объема мысленно выделенной материальной частицы пластически деформируемого тела, поскольку это изменение при ковочных операциях всегда мало по сравнению с относительными изменениями линейных размеров частицы. Наконец, из теории пластичности известно, что закон совпадения вида и направления главных осей напряженного состояния с видом и направлением главных осей скорости деформации остается практически в силе при любых условиях протекания процесса деформации (в принципе он может протекать и не обязательно монотонно, т. е. идеально однозначно).

Если принять во внимание все многообразие форм металлических изделий, обрабатываемых в горячем состоянии, а также затруднения чисто математического характера (решение системы уравнений в частных производных), то можно прийти к выводу о крайней сложности даже при на-

личии всех перечисленных упрощающих допущений решения задач подобного типа. Однако такой вывод был бы неправилен. Во-первых, многообразие форм изделий не всегда связано с многообразием кинематики протекания процесса деформации в практически наиболее интересной и важной конечной его стадии. Во многих случаях различные по конфигурации углубления в рабочих частях инструмента заполняются металлом в начале процесса, а к концу его могут быть рассмотрены как составляющие одно целое с инструментом (пример жестко-пластического тела). Данное обстоятельство дает нам право условно упростить конфигурацию изделия. Во-вторых, упрощая задачу, можно уклониться от рассмотрения протекания процесса во времени и вместо компонентов скорости деформации можно рассматривать компоненты малой деформации, происходящей за малый промежуток времени перехода процесса формоизменения частицы в данную текущую (например, конечную) стадию из предшествующей близкой стадии. Действительно, компоненты малой деформации заведомо пропорциональны соответствующим компонентам скорости деформации, поскольку каждый из них равен произведению соответствующего компонента скорости деформации на промежуток времени, в течение которого происходит эта малая деформация. В-третьих, задачу изучения неоднородного по объему напряженно-деформированного состояния тела во многих практических случаях рекомендуется заменить рассмотрением напряженно-деформированного состояния в отдельных зонах этого тела с тем, чтобы в этих зонах можно было бы его считать приближенно однородным или полагать хотя бы один из трех главных компонентов деформации приближенно постоянным. И, наконец, величина потребного усилия формоизменения может быть практически вычислена по простейшей формуле как площадь проекции деформируемого тела на плоскость, перпендикулярную движению инструмента, умноженная на усредненное по объему значение интенсивности напряженного состояния и на численный коэффициент, зависящий от геометрии процесса и устанавливаемый с помощью заранее составленных таблиц.

Ко второму фундаментальному классу задач относятся задачи анализа процессов холодной обработки металлов давлением: листовой штамповки, сверточно-вытяжных и разъединительных операций, гибки, холодной объемной штамповки (выдавливания деталей и самого давящего инструмента) и пр. Поскольку большинство металлов обладает в холодном состоянии ярко выраженным свойством деформационного упрочнения, то при анализе напряженного состояния металлического тела, претерпевающего значительную пластическую деформацию на холоду, приходится учитывать переменность интенсивности его напряженного состояния (его сопротивляемость деформаций) по всему объему.

Упрощающим фактором при решении многих задач холодной обработки давлением является выраженное превалирование свободных поверхностей деформируемого металла над поверхностями, контактирующими с инструментом, благодаря чему из любой точки большей части деформируемого тела (например, металлического листа) оказывается возможным восстановить нормаль на его свободную поверхность. Отсюда значительно облегчается приближенное определение направлений главных осей напряженного состояния.

Одно из трех главных напряжений во многих случаях можно считать далее равным нулю или малым по сравнению с двумя другими. В ряде случаев направление главных осей напряженного состояния можно считать известным заранее, что позволяет судить о практической приемлемости весьма существенного упрощающего допущения, принимаемого при решении ряда задач холодной обработки давлением. Этим существенным допущением является допущение монотонности (идеальной однозначности) протекания процесса деформации отдельных частиц деформируемого металла, позволяющее воспользоваться расчетными формулами, устанавливающими прямую связь между деформациями и напряжениями.

Помимо допущения о монотонном протекании процесса при приближенном анализе операций холодной обработки металлов давлением принима-

ются упрощающие допущения о равновесии мысленно выделенных частиц тела, не все размеры которых весьма малы (один из размеров частицы принимается, например, равным полной высоте деформируемого тела); упрощающее допущение определения напряженно-деформированного состояния не всего тела в целом, а только в каких-либо характерных точках его сечения с последующим грубо приближенным путем элементарной интерполяции, определением напряженного состояния во всем объеме тела.

Правомерность принятия в инженерных расчетах как перечисленных, так и других упрощающих допущений поверяется непосредственным экспериментом, который и является одним из наиболее неоспоримых критериев в суждении о надежности данного инженерного расчета.

К числу наиболее характерных параметров технологических процессов формоизменения, являющихся предметом поверочного экспериментального исследования, относятся:

- величина усилий, развиваемых формоизменяющими машинами—орудиями. Расчет усилия и его последующая поверка экспериментом необходимы не столько для выбора тоннажа пресса (фактически мощность прессового оборудования, как правило, значительно превосходит установленную расчетом, а отсюда и оправданная приближенность ее расчета), сколько для уяснения достигнутой точности расчетных внутренних напряжений деформируемого тела. По законам механики в каждый момент процесса между внешними замеренными силоизмерительными устройствами усилиями и внутренними силами сопротивления должно быть равновесие;
- величины предельно прочной пластичности формоизменяемого металла на отдельных переходах его обработки давлением;
- экспериментальная оценка влияния неучтенных приближенными расчетами таких факторов процесса, как трение на контактных поверхностях, качество и эффективность смазки, неравномерность действия деформирующих усилий, фактическая немонотонность процесса и пр.

*К четвертому комплексу экспериментальных исследований* относят собственно технологии обработки металлов давлением, процессов современного машино - и приборостроения, включающих наиболее сложные операции, например периодического проката, прессования, объемной листовой штамповки, выдавливания рельефа и деталей, ротационного выдавливания, точной безоблойной штамповки, штамповки в магнитном поле, взрывной и др. В этом комплексе экспериментальных исследований можно выделить две основные группы: группу испытаний, проводимых с целью определения размеров и физико-механических свойств заготовок, полуфабрикатов и изделий, и группу исследований в целях изыскания принципиально новых, наиболее прогрессивных методов обработки или усовершенствования уже существующих, апробированных. И в том, и другом случае могут экспериментально устанавливаться затраченные усилия машин — орудий и произведенная работа формоизменения, осуществленное упрочнение металла полуфабрикатов и изделий, фиксироваться картины распределения по объему тела остаточных деформаций и напряжений, разнообразные параметры процесса в целях проверки рациональности выбора формы рабочего инструмента, числа переходов, величины к. п. д. процесса и пр. И вместе с тем основная задача — возможно точное экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния металла полуфабрикатов и изделий, полученных обработкой давлением.

Основным принципом установления степени важности характеристики является ее роль в исследуемом процессе. Для этого процесс изучается в зависимости от какой-то одной переменной при остальных постоянных. Такой принцип проведения эксперимента оправдывает себя лишь в тех случаях, когда таких характеристик мало — 1...3. Если же переменных величин много, целесообразен принцип многофакторного анализа, рассматриваемый ниже. Необходимо также обосновать набор средств измерений (приборов) другого оборудования, машин и аппаратов. В связи с этим экспериментатор должен быть хорошо знаком с выпускаемой в стране измерительной аппаратурой

(при помощи ежегодно издающихся каталогов, по которым можно заказать выпускаемые отечественным приборостроением те или иные средства измерений). Естественно, что в первую очередь следует использовать стандартные, серийно выпускаемые машины и приборы, работа на которых регламентируется инструкциями, ГОСТами и другими официальными документами. В отдельных случаях возникает потребность в создании уникальных приборов, установок, стендов, машин для разработки темы. При этом разработка и конструирование приборов и других средств должны быть тщательно обоснованы теоретическими расчетами и практическими соображениями о возможности изготовления оборудования. При создании новых приборов желательно использовать готовые узлы выпускаемых приборов или реконструировать существующие приборы. Ответственный момент — установление точности измерений и погрешностей.



## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Методика подготовки экспериментального исследования

Приемы экспериментального исследования зависят от его цели, используемых средств и специфики тех условий, в которых исследование должно проводиться. Для каждой отрасли технических значений эти приемы носят общие черты, что и приводит к применению общей, единой методики планирования экспериментального исследования.

После тщательного изучения всех материалов, относящихся к цели и предмету исследования, необходимо решить центральную на подготовительном этапе экспериментального исследования задачу: разработать рабочую гипотезу — научное предположение о развитии (протекании) изучаемого явления и его пока недоказанное, но вероятное объяснение. Как минимум, рабочая гипотеза устанавливает факторы (причины, основные условия, движущие силы), обуславливающие развитие явления. Как максимум, рабочая гипотеза может дать более или менее полное предположительное объяснение всего процесса развития (протекания) явления.

В принятой рабочей гипотезе необходимо выделить наиболее важные и решающие, а также возможные причинные связи и взаимодействия, вероятное направление и ход развития явления в целом. Ход развития явления, связи и взаимодействия причин, его обуславливающих, желательно изобразить графиком предполагаемых их функциональных зависимостей, пусть даже в безмасштабном приближенном виде.

Если предполагаемое развитие явления или изменения факторов, его обуславливающих, поддаются более или менее точному аналитическому представлению, т. е. математическому выражению в виде определенных, например физико-механических закономерностей, то на своем высшем уровне эти математические выражения развития явлений могут привести к созданию так называемой модели явления, в которой характерные кривые развития явления заменены системой взаимосвязанных математических формул.

Четко проведенная предварительная аналитическая разработка способствует детализации методики последующего экспериментального исследования.

Вместе с тем необходимо помнить, что никакое, даже наиболее полно математически разработанное гипотетическое предположение протекания явления, никакая модель явления не в состоянии совершенно отобразить реальное явление природы с его огромным количеством действующих второстепенных факторов. Отсюда все гипотетические предположения всегда в большей или меньшей степени нуждаются в уточнениях, доработках, а иногда и в радикальной замене новыми.

Виды моделей, используемых на практике, довольно многообразны; в основном это изобразительные или физические модели, символические модели и математические или аналоговые модели.

Изобразительные или физические модели представляют собой геометрически подобные или масштабно измененные оригиналы (макеты, аэродинамические трубы, модели изделий и пр.). К изобразительным или физическим моделям прибегают тогда, когда подлежащие исследованию явления происходят в объекте или при условиях, когда непосредственный эксперимент почему-либо затруднителен и его рациональнее проводить на уменьшенном объекте, копирующем оригинал.

Таким образом, при физическом моделировании сравниваются явления, имеющие одинаковую природу и отличающиеся только количественно. Такое моделирование позволяет углубить наши знания о комплексе происходящих явлений и уточнить математическое описание отдельных процессов.

Символические модели представляют собой описания свойств оригиналов с помощью символов, выражающих математические или логические зависимости. Символические модели могут быть в виде уравнений, графиков функций, таблиц, графов и др. В экспериментальных исследованиях явлений, происходящих в твердых телах, обычно прибегают к символическим моделям.

В наиболее простых случаях, когда структура системы или явления сравнительно несложна и действие ее хорошо понятно, символическая модель строится на основе ее внимательного изучения и вывода описывающих ее математических зависимостей умозрительным путем. В тех же случаях, когда структура модели достаточно ясна, но затруднительно ее математическое описание (поскольку по данному рода системам еще не накоплено достаточно опытных данных), прибегают сначала к гипотезам, построенным на грубых догадках о значении тех или иных параметров, а затем уточняют их при помощи непосредственных экспериментов.

Математические или аналоговые модели используют, например, тогда, когда вместо исследования какого-либо явления на самом объекте или в реальных условиях его протекания прибегают к его проведению на установке, воспроизводящей физически иное явление, но описываемое такими же уравнениями, что и явление в оригинале. Данный вид моделирования имеет своей конечной целью решение систем уравнений самыми различными способами. Так, например, здесь может быть использовано свойство, называемое изоморфизмом уравнений: когда одна и та же система уравнений может описывать различные по своему физическому содержанию явления. Так, например, дифференциальное уравнение Лапласа, описывающее электрическое поле, одновременно описывает и движение идеальной завихренной жидкости и распространение тепла и т. д. Для решения можно использовать то явление, которое наиболее удобно с точки зрения производства нужных измерений. Если дифференциальное уравнение, описывающее ход интересующего нас процесса, решается непосредственно, то, разумеется, нет надобности прибегать к математическому моделированию. Однако физическое моделирование в этом случае может представлять интерес, позволяя воспроизвести сложный процесс и наблюдать влияние различных, даже не отражаемых известными уравнениями факторов на его протекание.

Широко известно, что при решении современных технических задач часто приходится иметь дело с уравнениями, аналитическое решение кото-

рых весьма затруднительно и трудоемко. Тогда наряду с приближенными аналитическими методами решения могут применяться специальные приборы и устройства: гармонические анализаторы, различные счетно-решающие машины и модели-аналоги. Модель-аналог представляет собой установку, на которой можно наблюдать хорошо известное явление, заведомо описываемое подлежащей решению системой алгебраических или дифференциальных уравнений.

Электрические модели-аналоги широко применяются для расчета тепловых полей. В этих моделях токи изображают тепловые потоки, а тепловые сопротивления заменяются электрическими.

При математическом моделировании, так же как и при физическом, весьма целесообразно пользоваться теорией подобия, помогающей обобщить результаты эксперимента (критерии подобия, критериальные уравнения и т. п.), а также так называемой теорией (принципом) размерностей.

При проведении эксперимента, как правило, мы выражаем результаты исследования некоторыми цифрами, определяющими те измеряемые определенным способом элементы (параметры), которые нам представляются существенными для характеристики изучаемого явления, и устанавливаем (конечная цель исследования) зависимости между измеренными величинами, представляющими собой аналитические выражения изучаемого явления.

Кроме того, представляя результаты эксперимента в виде безразмерных отношений, тем самым устанавливаются те области, на которые могут быть закономерно распространены выводы, получаемые нами при исследовании.

Таким образом, исследуя какое-либо явление при некоторых размерах, скоростях и т. д., можем установить, как будет протекать это явление при других размерах и скоростях в том случае, если безразмерные отношения, составленные из этих переменных, для обоих случаев будут одинаковы. Это позволяет исследовать влияние какого-либо фактора, например размеров тела, не изменяя его непосредственно при опыте.

Выводы, полученные из опытов с данными размерами тела, будут очевидно справедливы и для любых других размеров тела при условии одинаковости безразмерных отношений  $\lambda$  с наблюдаемыми на опытах.

Из изложенного могут быть установлены те условия, которым должна удовлетворить модель, проектируемая для изучения какого-либо явления.

Возвращаясь в разработке рабочей гипотезы, как к этапу подготовки экспериментального исследования, заметим, что перед исследователем может возникнуть несколько вариантов возможного решения задачи исследования, соответственно различным вариантам формулировки рабочей гипотезы. В данном случае принимается вариант, который предположительно может обеспечить наиболее быстрое и верное решение задачи.

Ставится задача экспериментального установления влияния на предельно прочную (начало разрушения) пластичность, а также на предельно устойчивую пластичность (начало образования локальной деформации) таких факторов, как состояние структуры металла (крупно-, мелкозернистость и др.), его химический состав и ужесточение схемы напряженного состояния (к категории жестких относятся схемы напряженного состояния деформируемого объема с преобладанием растягивающих векторов главных напряжений; к мягким — с преобладанием сжимающих векторов).

После принятия рабочей гипотезы — научно обоснованного предположения о развитии подлежащего изучению явления и попыток его представления символической моделью, отображающей его протекание языком математики — переходят к разработке общей и частных методик экспериментального исследования. Методика экспериментального исследования как совокупность принятых способов, приемов исследования, очевидно, должна ответить на основные вопросы: как наиболее рационально, научно обоснованно и экономично спланировать и осуществить исследовательский процесс; на каком оборудовании; с помощью каких приспособлений и измерительной аппаратуры; следуя какому плану, при какой затрате времени и средств.

При этом общей мы называем методику, относящуюся ко всему исследованию, объединяющую все установленные стержневые способы и приемы, охватывающие все исследования в целом, а частными методиками, отличными от общей, — отдельные опыты или серии опытов, осуществляемые с помощью специфических приемов исследования. С увеличением разнообразия явлений и их отдельных сторон значение частных методик возрастает.

Правильно разработанная методика исследования — залог успеха его осуществления, в то время как неудачно или неверно составленная методика приводит, как правило, к ошибочным выводам или накоплению «сырого», не поддающегося никакой обработке бесполезного материала.

Особое место в программе экспериментальных исследований занимают так называемые поисковые опыты, которые могут или предшествовать разработке общей методики, или составлять ее самостоятельный раздел. Больше того, в некоторых случаях можно рекомендовать до получения результатов поисковых опытов не приступать ни к установлению окончательной рабочей гипотезы, ни к разработке общей методики исследования.

В задачу поисковых опытов входит:

- 1) апробация выдвинутых рабочей гипотезой вариантов возможного, неясного для исследователя хода протекания исследуемого процесса;
- 2) проверка отдельных частей разработанной методики, приспособленности оборудования, в том числе (это наиболее важно) измерительной аппаратуры к тем измерениям, которые предусмотрены общей или частными методиками;
- 3) установление обоснования для расчета количества опытов. Для проведения поисковых опытов обычно составляются частные методики, а их количество предопределяется следующими предположениями:
  - а) при проверке направления развития процесса достаточно ограничиться двумя поисковыми опытами — в начале и в конце процесса;
  - б) при установлении факторов, обуславливающих развитие явления, руководствуются следующими положениями: наименьшее количество поис-

ковых опытов примерно равно удвоенному предполагаемому количеству факторов из расчета два опыта в начале (когда данный фактор явно отсутствует) и в конце (когда он явно присутствует);

в) при проверке вариантов рабочей гипотезы выбирают главный, стержневой фактор гипотезы и по небольшой серии (три—пять опытов) определяют ход изменения основных кривых рабочей гипотезы.

Любая рабочая гипотеза может быть установлена только на основании заранее определенных факторов, предопределяющих развитие явления, иначе говоря, она связана с независимыми переменными (аргументами), влияющими на изменение зависимых переменных (функций). В экспериментальном исследовании измеряются или отмечаются величины и качественные показатели, характеризующие как факторы (аргументы), так и показатели развития явления (функции).

Как правило, начинают с определения величин и свойств, характеризующих факторы. Однако множественность величин, подлежащих измерению, может по разным причинам затруднить исследование. Так, изучение суммарного влияния многих количественно не определенных факторов, сочетающихся в произвольных и неясных для исследователя соотношениях, может привести к неясным закономерностям или даже к ошибочным выводам. В этих и подобных случаях следует все факторы, обуславливающие явление, разделить на основные, оказывающие наибольшее влияние на развитие явления, и дополнительные, влияющие на развитие явления второстепенно. В таком случае в опытах отмечают или измеряются лишь величины и свойства, характеризующие лишь основными факторами. Однако вопрос деления факторов на основные и второстепенные во многих случаях исключительно сложен и может быть разрешен весьма условно. Действительно, даже при небольшом изменении условий опыта дополнительные, второстепенные факторы могут стать основными, и наоборот.

По мере развития наших знаний, факторы, считавшиеся ранее основными, могут оказаться составленными из ряда дополнительных второстепенных

и как таковые оказаться на втором плане. С другой стороны, неучет влияния второстепенных факторов вообще иногда может привести к серьезным ошибкам, поскольку вносимые дополнительными факторами количественные изменения способны привести к качественным изменениям процесса. Надо всегда помнить, что выбор основных элементов исследования является одним из самых трудных и ответственных вопросов, от удачного решения которого зависит успех всего исследования.

Для того чтобы если не устранить, то по крайней мере уменьшить ошибку, появляющуюся вследствие неудачного деления факторов на основные и дополнительные, можно идти по пути нейтрализации действия дополнительных факторов, т. е. создания таких условий, при которых их влияние было бы по возможности незначительным, а главное неизменным, а величины и свойства, характеризующие эти факторы, приближались бы к постоянным. При этом исследователю надо стремиться к тому, чтобы в своей работе оперировать лишь с основными факторами. Таким образом, общим принципом исследования явится постоянство всех остальных факторов при изменении избранных.

На практике применяются разные приемы нейтрализации дополнительных второстепенных факторов, к числу которых относится прием резкого изменения переменных факторов при относительно малом изменении остальных. Применяются также приемы сравнительной оценки влияния второстепенных факторов, постановки «чистых» опытов в лабораторных условиях, перемены знаков изменяющихся аргументов и др.

Поскольку возможность одновременного изучения влияния ряда переменных факторов на протекание одного процесса обычно мало осуществима, то, для того чтобы получить с достаточной степенью надежности четкие закономерности явления, во многих случаях следует выделять в качестве основного фактора лишь один (в нашем примере фактор жесткости схемы напряженного состояния) и нейтрализовать все остальные факторы. Изменение одного фактора при постоянстве остальных является характерной чертой



многих проведенных в технологии процессов формоизменения исследований.

После нейтрализации величин, влияние которых желательно сделать неизменным, переходят к выбору и установлению способов направления и пределов изменения основных факторов. Последняя задача относится скорее к организационной или экономической стороне исследования, так как от этого выбора зависит объем предстоящей работы: проводить ли основные опыты без поисковых и во скольких направлениях следует изучать изменения основных факторов. И еще следует обратить внимание на одно важное обстоятельство. При разработке методики исследования следует стремиться получить такие опытные данные, которые не только устанавливают закономерности развития явлений, но и помогают объяснить закономерности их развития, их физическую основу.

Каждое экспериментальное исследование может включать от одной до десятка и больше серий опытов. Чем же следует руководствоваться при планировании количества опытов? Здесь необходимо исходить из двух главных положений.

Во-первых, из оценки количества опытов в одной серии, предназначенных для выявления подлежащих определению функциональных связей между переменными величинами, или, представляя эти связи графически (речь идет о том минимальном количестве опытных точек, которое смогло бы обеспечить достоверность графического выражения функции). К примеру, если исследователь уверен в том, что имеет дело с линейной зависимостью, то можно ограничиться двумя опытами при достаточном промежутке между ними; если опытная кривая представляет собой часть окружности определенного радиуса, то можно ограничиться тремя точками; наконец, при сложных кривых, рассматривая их как комбинацию простых кривых, сопряженных прямыми линиями, каждый перегиб кривой должен быть, выявлен не менее чем тремя точками и т. д.

В случае же графического выражения не только общей закономерности, но и возможно более точного численного значения функций каждый перегиб кривой должен быть обоснован не менее чем пятью опытами (в районе рассматриваемого перегиба).

Во-вторых, при планировании количества опытов необходимо исходить из количества повторных измерений для обеспечения «весомости» одной опытной точки графика — обстоятельство. Наконец, при планировании всего экспериментального исследования необходимо учитывать время и затраты труда на проведение опытов.

В общее время экспериментального проведения исследования необходимо еще включить время, потребное на подготовку опытов (без учета времени на производство и приобретение оборудования), а также на организационную работу. Практика показывает, что это время приблизительно соответствует (а иногда и намного превышает) времени, потребному на проведение всех опытов.

К числу организационных мероприятий, связанных с подготовкой экспериментального исследования (подготовка машин-орудий, измерительной аппаратуры и рабочих мест) необходимо отнести подготовку регистрационной документации; журналов, бланков, блокнотов и др.

В соответствии с методикой и планом исследований оформление журналов регистрации опытов производится заранее таким образом, чтобы испытуемому было легко разобраться в том, что, куда и в какой последовательности надо заносить. Рекомендуется для результатов измерений, проводимых в одной из серий опытов, отводить в журнале не менее одной страницы или одного разворота журнала и не рекомендуется записывать на эти же страницы (даже при наличии свободного места) результаты других серий опытов. В заголовках каждой таблицы измерений требуется внести дату опыта, объект измерений, основное оборудование и приборы, а также общие условия, сопутствовавшие измерениям (можно в виде примечаний). Результаты повторных

измерений заносятся в отдельные рубрики, причем рубрики первичных и повторных измерений получают каждая свой номер.

В журнал должны заноситься все без исключения проводимые при опыте прямые (непосредственные) измерения и отметки, а также, если позволяют размеры журнала, в него помещаются графы для результатов посредственных измерений. В том случае, когда измерения проводятся несколькими испытателями параллельно и одновременно, результаты измерений лучше всего записывать также в заранее разграфленные записные книжки или блокноты, причем форма этих записей должна соответствовать какой-либо части формы записи основного журнала.

Описание окончательной процедуры подготовки экспериментального исследования — общее его планирование, используют наиболее совершенный метод — метод так называемого сетевого планирования.

В общих чертах метод СПУ основан на графическом изображении определенного комплекса работ, отражающем их логическую последовательность, взаимосвязь и длительность с последующей оптимизацией разрабатываемого графика при помощи прикладной математики и вычислительной техники, а также его использованием для текущего руководства. К числу основных областей применения метода сетевого планирования и управления относятся комплексные теоретические и главным образом экспериментальные научные исследования, проектирование и подготовка производства объектов новой техники и ряд других.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

#### 3.1. Методология моделирования

Основными методами моделирования технологических процессов являются методы координатных сеток, визиопластичности, муарового эффекта, фотоупругих покрытий и вдавливания индентора (методы твердости и безобразцовый) применительно к рассматриваемым задачам исследования.

Возможность моделирования целого ряда процессов горячей и холодной обработки металлов давлением при соблюдении определенных условий и в том числе удовлетворении основным законам подобия раскрывает перед исследователем широкие перспективы.

Развитые для пластически обрабатываемых материалов А. А. Ильюшиным основные положения теории моделирования исходят из законов подобия, в силу которых протекание процесса в модели будет происходить подобно протеканию процесса в натуре, если известно:

- что модель геометрически подобна натуре;
- граничные и начальные условия (условия однозначности) для величин, характеризующих процесс в модели, подобны таковым для аналогичных величин в натуре;
- критерии подобия, составленные из величин, входящих в условия однозначности для модели, равны критериям подобия для природы.

Простейшей моделью строения реального поликристаллического металла может служить объем, сплошным образом заполненный весьма малыми «материальными» элементами, центр тяжести которых будем называть материальными точками. Зная начальное и конечное местоположение таких точек в исходном и деформированном теле, можно по величине и характеру их смещения и исходя из условия сплошности строения воспроизвести картину формоизменения тела в целом и установить параметры его деформированного состояния. Однако, идя по этому пути, при перенесении полученных модельных данных на реальное тело мы встречаемся с рядом принципиальных затруднений. Так, исключительно сложным является фиксирование коорди-

нат местоположения интересующих нас точек (например, узлов прямоугольной сетки или центров малых окружностей) в реальном теле, без предварительного его физического расчленения.

Физическое расчленение тела плоскостями реза с последующим сложением частей и формоизменением тела в целом закономерно только в том случае, когда плоскости реза являются главными плоскостями деформации, а нормальные напряжения на этих плоскостях сжимающие — обстоятельство, крайне сужающее задачи исследования. В стремлении разрешить эту задачу исследователи шли различными путями:

- склеиванием расчлененных не по главным плоскостям деталей (исследования проф. И. Я. Тарновского и др.);
- созданием слоистых моделей (исследования проф. Л. Г. Драпкина);
- сопоставлением естественных сеток, образуемых очертаниями отдельных зерен микрошлифов (исследования по микроструктурному анализу проф. Г. А. Смирнова-Алиева и др.).

В Ленинградском механическом институте под руководством проф. Л. Г. Драпкина разработан метод исследования пластической деформации деталей на моделях, изготовленных из многослойных металлов, представляющих собой монолитную композицию из тонких цветных пластин или различающихся по цвету после травления черных металлов, соединенных горячим прессованием (прокаткой) посредством твердых растворов замещения (внедрения,) образующихся на их границах в процессе взаимной атомной диффузии.

Испытуемая модель детали, изготовленная из соответствующего многослойного металла, подвергается деформированию в реальных условиях нагружения. В интересующих зонах формоизменений модели изготавливается макрошлиф, по которому и устанавливается картина и величина конечного пластического формоизменения детали. Так, например, если произвести какую-либо операцию формоизменения двух заготовок из многослойного металла в совершенно идентичных условиях, но при различном (взаимно пер-

пендикулярном) расположении слоев, сфотографировать их в одинаковом масштабе и совместить полученные негативы, то фотоотпечаток с совмещенных негативов представит собой как бы естественную сетку. По размерам ячеек сетки до и после деформирования можно приближенно оценить величину основных количественных параметров напряженно-деформированного состояния при монотонном процессе пластического формоизменения детали.

*Метод искаженных сеток.* Наносится ли сетка на свободную поверхность изучаемого тела, на поверхность предварительного физического сечения или она образуется линиями раздела слоистых моделей, ее искаженный деформацией вид фиксируется и измеряется в целях последующей математической обработки.

В экспериментальной исследовательской практике наметилось несколько методов расчета напряженно-деформированного состояния пластически формоизмененного тела по нанесенной на его поверхности сетке и в том числе метод, основывающийся на так называемой деформационной теории (метод конечной деформации). Применение этого метода прямо показано в случае монотонного или квазимонотонного протекания пластической деформации тела, т. е. в предположении соблюдения следующих двух условий: совпадения в исследуемом теле за весь процесс деформации направления главных осей скоростей деформации с одними и теми же материальными волокнами тела и сохранения одного и того же вида деформированного состояния.

Обработка сетки построена на следующих принципах:

1) основные параметры локального (в пределах единичной ячейки делительной сетки) формоизменения определяются из сопоставления конечной формы и размеров ячейки с ее начальной (исходной) формой и размерами;

2) полагается, что в выделенном объеме изотропного тела элементарная сфера (или окружность — сечение сферы плоскостью) превращается в ре-

зультате однородной конечной деформации и эллипсоид (эллипс), главные оси которого определяют направление главных осей тензора деформации;

3) главные компоненты тензора деформации определяются натуральными логарифмами отношений главных диаметров эллипса к диаметру исходной сферы;

4) главные оси тензора напряжений изотропного тела совпадают с направлением главных осей эллипсоида;

5) интенсивность деформированного состояния, выражаемая значениями главных компонентов деформации, определяет физическое состояние материала и работу, затрачиваемую на его формоизменение;

6) ввиду того что деформация рассматриваемой материальной частицы (т. е. в достаточно малой области значений начальных координат — переменных Лагранжа) совершалась монотонно, главные оси результирующей (итоговой) деформации должны совпадать с главными осями тензора скорости деформации и главными осями напряженного состояния в любой рассматриваемой стадии процесса, а главные компоненты девиатора тензора напряжений должны быть пропорциональны главным компонентам результирующей деформации;

7) вычисление самих компонентов напряжений связано с решением уравнений равновесия при осесимметричном напряженно-деформированном состоянии, а интенсивность напряженного состояния устанавливается в зависимости от степени деформации по данным испытания материала на простое растяжение.

К основанному на деформационной теории методу обработки искаженной сетки следует отнести и так называемые методы поэтапного исследования, когда на каждом малом этапе стационарного процесса формоизменения все параметры определяются подобно случаю больших конечных деформаций, а направление главных осей тензора деформаций определяет направление главных осей тензора напряжений.

Принципиально отличающимися от рассмотренных являются методы обработки искаженных сеток, построенные на принципах теории течения, применяемые в случаях немонотонного процесса деформации. Ввиду выраженной немонотонности протекания изучаемого процесса деформации возникает необходимость расчленения его на ряд монотонных по времени фаз при главенствующем факторе — скорости деформации. Таким образом, непрерывно изменяющиеся форма и размеры ячейки делительной сетки рассматриваются как непрерывные функции некоторого параметра (времени, смещения материальных точек и пр.). Текущие значения компонентов тензора скоростей деформации (производных по параметру) определяются в любой момент в произвольной системе координат и используются как для нахождения текущего положения главных осей, так и для определения производной интенсивности деформированного состояния.

*Метод визиопластичности.* К экспериментальным методам определения скоростей деформации по искаженной сетке следует отнести и так называемый визиопластический метод, заключающийся в установлении векторного поля скоростей и на его основании вычисления напряжений.

Построение поля скоростей осуществляется несколькими способами, например расположением делительной сетки на меридиональной плоскости осесимметричной детали или на плоскости, составляющей прямой угол с направлением течения металла в случае плоской задачи. Плоскость, на которой располагаются линии сетки, после каждого очередного приращения деформации фотографируется и таким образом по смещению положений узлов сетки фиксируется движение частиц металла.

Метод визиопластичности по сравнению с методом, основанным на деформационной теории пластичности, имеет следующие основные недостатки: необходимость прерывания процесса деформации, что неизбежно связано с изменениями контактных условий задачи, неизбежность при повторных нагружениях известных отклонений от предшествующих взаиморасположении расчлененных половинок образца, невысокая точность определения скоро-



стей деформации, обусловленная графическими расчетными построениями. Последнее обстоятельство особенно неблагоприятно при неустановившемся течении металла, когда представляется возможным осуществить только одну малую ступень деформации.

За обработку сетки по методу деформационной теории говорит тот факт, что здесь необходимо измерять координаты узловых точек только в конечной стадии деформации и при этом с точностью, во много раз превышающей точность расчетных графических построений по методу визиопластичности.

*Методы муарэфекта и фотоупругих покрытий.* Эти методы следует отнести к особой группе экспериментальных исследований, объединяемых общностью заложенной в них идеи — изучением деформации тела по деформации скрепляемых с ним инородных покрытий (пленок). Применяемые независимо или совместно с экспериментальными методами малобазисной тензометрии и делительных сеток методы эти методы могут в ряде случаев дать ответы для задач технологии обработки давлением там, где аналитические решения затруднены или недостижимы вообще.

Получивший за последние годы известность новый метод экспериментального исследования деформаций и напряжений на свободных поверхностях упруго-пластически формоизменяемых твердых тел — метод муарэфекта — основан, как это следует из его названия, на оптических явлениях, возникающих при наложении одной на другую достаточно мелких сеток, и заключается в образовании картин чередующихся темных и светлых полос. Обладая наглядностью поляризационно-оптического метода, метод муаровых полос вследствие своего чисто геометрического характера позволяет исследовать деформации независимо от их физической природы: упругие, вязко-упругие, пластические, деформации ползучести и др.

Измерения этим методом могут осуществляться как при нормально так и при высокой температурах, при статическом и динамическом нагружениях. В соответствии с характером решаемых задач получили распространение

несколько разновидностей метода муарэфекта, различающихся как по виду сеток для образования муаровых картин, так и по методу их нанесения.

1. Сетка наносится непосредственно на изучаемую поверхность плоских или объемных деталей.
2. Нанесенная на экран сетка отражается от зеркальной поверхности исследуемой детали или на нее проектируется и служит объектом изучения изменения углов наклона, кривизны изогнутых поверхностей и других геометрических параметров.
3. Муаровая картина получается с помощью сетки, наложенной на поверхность детали, и ее совмещенного отражения.
4. В качестве сеток используются семейства линий оптической интерференции в целях определения изменения толщины деталей, прогиба пластин и пр.
5. В целях определения изменения толщины прозрачных деталей используется изображение сетки, искаженное в результате преломления при прохождении света сквозь исследуемую деталь.

Все перечисленные методы исследования деформаций объединяются общностью использования картин муаровых полос, возникающих в результате механического наложения систем линий (сеток) или их отражений. Искажение (деформация) одной (или обеих) из совмещенных сеток связано с деформацией исследуемой детали, а возникающие муаровые полосы являются линиями уровня некоторых геометрических величин (смещений, углов наклона, прогибов, кривизны и т. п. или их комбинаций). Таким образом, исследуемая величина оказывается заданной в виде картины своих линий уровня. Вдоль линий уровня она остается постоянной, а при переходе от одной муаровой полосы к соседней изменяется на некоторую постоянную величину.

Анализ функций, заданных картиной линий уровня, сводится к следующим, общим для всех разновидностей метода операциям:

- 1) определение линий, вдоль которых производные функции обращаются в нуль и которые разделяют всю исследуемую область на области с одинаковым знаком производных;

- 2) построение графиков изменения функций в различных направлениях;
- 3) графическое или численное дифференцирование и интегрирование функций;
- 4) определение величины частных производных путей наложения со сдвигом в направлении дифференцирования изображений линий уровня функции (механическое дифференцирование);
- 5) определение величин производных по параметру нагружения или времени, путем наложения картин линий уровня, соответствующих началу и концу этапа нагружения или интервала времени.

Общими для всех перечисленных разновидностей метода муарэффекта являются и экспериментальные способы получения картин муаровых полос, которые сводятся к следующему:

- 1) двукратному фотографированию сетки до и после деформирования;
- 2) фотографированию картины муаровых полос, наблюдаемой непосредственно в процессе эксперимента путем наложения эталонной сетки на поверхность детали или на матовое стекло фотоаппарата;
- 3) получению картины муаровых полос после проведения эксперимента путем наложения негативов или увеличенных изображений сеток до и после деформации;
- 4) получение муаровых (растровых) сеток подобно координатному способу — фотохимическим путем.

Разновидностью методов фотоупругих покрытий является поляризационно-оптический метод измерения напряжений. Он основан на использовании эффекта двойного лучепреломления в прозрачных напряженных моделях и заключается в том, что обычные, упруго деформируемые, оптически активные материалы, обладающие низкими значениями модуля упругости (например, эпоксидные смолы), наносятся, в виде тонких слоев на отражающую поверхность пластически деформируемого тела с нормальным для металла модулем упругости.

Поляризационно-оптические исследования непрерывно сцепленных с деформируемым телом покрытий, проводимые при помощи односторонне смонтированной поляризационной установки, дают возможность количественно и качественно установить деформированное состояние самого тела.

*Методы вдавливания индентора.* Широко известны теоретически и опытным путем установленные факты, что затраченная на пластическое формоизменение металлов работа приводит одновременно к существенным изменениям их физико-механических свойств: при холодной обработке давлением способность металлов сопротивляться последующей пластической деформации возрастает, а способность их эту деформацию выявлять — снижается. В частности, подвержен изменению благодаря упрочнению, вызванному пластической деформацией, и такой яркий показатель физико-механических свойств, как твердость. Отсюда вытекает, что если бы удалось заранее выявить функциональную связь между числом твердости, замеренной в интересующей нас зоне, и степенью произведенной в этой зоне деформации, а следовательно, и интенсивностью напряженного состояния, то по замеренной твердости можно было бы судить о степени деформированного и интенсивности напряженного состояния в интересующей нас зоне.

В курсе сопротивления материалов пластическому деформированию Г. А. Смирнова-Аляева приведены описания метода твердости и примеры его использования в технологии пластической обработки металлов. Так, исходя из теории потенциальной энергии деформации и условий ее монотонного протекания, в исследованиях методом твердости применяется предварительно построенная для рассматриваемого металла диаграмма зависимости твердости от соответствующих стадий деформации в отдельных фазах процесса растяжения данного металла. Такая диаграмма, построенная для реального металла, позволяет определить степень деформации пластически деформируемого тела по данным замеров твердости в различных зонах исследуемых заготовок.

Перспективным для пластической обработки металлов представляется метод экспериментального определения повышенного наклепом предела текучести путем вдавливания наконечника—индентора (безобразцовый метод).

Исходя из известного предела текучести металла в его исходном состоянии, замеренных нагрузок на вдавливаемый в металл индентор до и после упрочнения, а также величин замеренных диаметров образовавшихся вокруг отпечатка наплывов, метод этот при условии монотонно протекавшего процесса деформации позволяет практически достаточно надежно рассчитать новый, повышенный благодаря упрочнению металла предел его текучести.

### 3.2. Определение регрессионных зависимостей

#### 3.2.1. Понятие связи. Виды связи в статистике

Происходящие явления и процессы органически связаны между собой, зависят друг от друга и обуславливают друг друга. Взаимосвязь и взаимообусловленность проявляются в работе любой фирмы, компании, предприятия. Так, замена одних станков на другие с коэффициентом полезного действия в два раза выше заменяемых станков приводит к снижению себестоимости единицы продукции, а следовательно, к увеличению прибыли, повышению материальной заинтересованности работников. Поэтому одной из важнейших задач статистики является изучение, измерение и количественное выражение взаимосвязей между явлениями жизни, установленными на основе качественного анализа.

Существует два вида связи: *функциональная* и *корреляционная*.

Функциональной называется зависимость при которой каждому значению одной переменной строго соответствует одно определенное значение другой переменной (например  $y=x^2$ ). При функциональной связи каждому значению одной величины (аргумента) соответствует одно или несколько вполне определенных значений другой величины (функции). Функциональная связь находит широкое распространение в точных науках, и в первую очередь в математике. Например, зависимость между площадью круга и ра-

диусом ( $S=\pi R^2$ ). К функциональным связям относятся и такие, в которых результат является функцией нескольких факторов, влияющих на него в определенной степени, причем степень этого влияния известна. Такова связь между площадью треугольника, его основанием и высотой.

В различных процессах, характеризующихся статистическими закономерностями, нет строгой зависимости между причиной и результатом, и обычно не представляется возможным выявить строгую зависимость явлений от изучаемых факторов, потому что закономерности складываются под влиянием множества причин и условий, действующих одновременно и взаимосвязано с различной силой в различных направлениях. Кроме того, точно неизвестно, в какой мере каждый из факторов влияет на величину явлений. Связь, при которой каждому значению аргумента соответствует не одно, а несколько значений функций и между аргументом и функциями нельзя установить строгой зависимости, называется *корреляционной*.

*Пример.* Себестоимость единицы продукции зависит от уровня производительности труда; чем выше производительность труда, тем ниже себестоимость. Но себестоимость зависит и от ряда других факторов: стоимости сырья и материалов, топлива, электроэнергии, их расходов на единицу продукции, общепроизводственных и общехозяйственных расходов и т.д. Поэтому нельзя утверждать, что при повышении производительности труда, допустим на 10%, себестоимость снизится также на 10%. Может случиться, что, несмотря на рост производительности труда, себестоимость не только снизится, но даже несколько повысится, если на нее окажут более сильное влияние действующие в обратном направлении другие факторы.

Различают прямую и обратную корреляционную связь. По направлению различают прямую и обратную связь. Если с увеличением аргумента  $X$  функция  $y$  также увеличивается без всяких единичных исключений, то такая связь называется полной прямой связью. Если с увеличением аргумента  $X$  функция  $y$  уменьшается без всяких единичных исключений, то такая связь называется полной обратной. При наличии исключений, которые, однако, не

нарушают общей тенденции, имеет место частичная связь – прямая или обратная. Когда признаки варьируют независимо друг от друга, это свидетельствует о полном отсутствии связи.

*Пример.* Имеются два взаимосвязанных признака X и Y, которые ведут себя в разных случаях следующим образом:

X	3	5	7	10	
y	15	17	20	22	- полная прямая связь
y	22	20	17	15	- полная обратная связь
y	15	20	17	22	- частичная прямая связь
y	22	17	20	15	- частичная обратная связь
y	20	15	22	17	- полное отсутствие связи

Точное аналитическое выражение имеют только функциональные связи. Корреляционные связи могут быть выражены лишь приближенно, при наличии определенных условий. Изучение взаимосвязей между признаками статистической совокупности заключается в определении формы и количественной характеристики, а также степени тесноты (сопряженности) связи. Применение методов корреляционного анализа дает возможность выразить связь между признаками аналитически – в виде уравнения – и придавать ей количественное выражение. Корреляционный анализ и решает эти две основные задачи.

*Первая задача* заключается в определении математической зависимости

*Вторая задача* состоит в измерении тесноты, т.е. меры зависимости между признаками.

### 3.2.2. Определение математической зависимости

По аналитическому выражению корреляционная связь может быть прямолинейной и криволинейной.

*Прямолинейной* называется связь, когда величина явления изменяется приблизительно равномерно в соответствии с изменением величины

влияющего фактора. Математически прямолинейная связь может быть выражена уравнением прямой

$$y = a_0 + a_1x .$$

Если происходит неравномерное изменение явления в связи с изменением величины влияющего фактора, то такая связь называется *криволинейной*.

*Криволинейная* связь может быть в виде:

А) параболы, имеющей уравнение  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ;

Б) гиперболы, имеющей уравнение  $y = a_1 + \frac{a_0}{x}$ ;

В) показательной функции  $y = a_0a_1^x$ ;

Определяющая роль в выборе математической зависимости между явлениями принадлежит теоретическому анализу. Так, например, выпуск продукции и стоимость основных фондов, урожайность и количество внесенных удобрений взаимосвязаны между собой. Анализ показывает, что чем больше имеет предприятие основных фондов (факторный признак), тем больше, при прочих равных условиях, оно выпускает продукции (результативный признак). С ростом факторного признака здесь, как правило, равномерно растет и результативный, поэтому зависимость между ними может быть выражена уравнением прямой  $y = a_0 + a_1x$ , которое называется *линейным уравнением регрессии*.

При этом параметр  $a_1$  называется коэффициентом регрессии и показывает, насколько в среднем отклоняется величина, результативного признака  $y$  при отклонении величины факторного признака  $x$  на одну единицу. Увеличение количества внесенных удобрений приводит, при прочих равных условиях, к росту урожайности, но чрезмерное внесение их без изменения других элементов к дальнейшему повышению урожайности не приводит, а, наоборот, снижает ее. Такая зависимость может быть выражена уравнением кривой второго порядка – парабола:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ . Параметр  $a_2$  характеризует степень ускорения или замедления кривизны параболы и при  $a_2 > 0$  параболо-



ла имеет минимум, а при  $a_2 < 0$  – максимум. Параметр  $a_1$  характеризует крутизну кривой, а параметр  $a_0$  – вершину кривой.

Параметры для всех уравнений ( $a_0, a_1, a_2$ ) чаще всего определяют из системы нормальных уравнений. Системы имеют следующий вид:

а) для линейной зависимости

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{cases} \quad (3.1)$$

б) для зависимости в виде параболы

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 \\ \sum x^2 y = a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 \end{cases} \quad (3.2)$$

в) для зависимости в виде гиперболы

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum 1/x \\ \sum y/x = a_0 \sum 1/x + a_1 \sum 1/x^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

г) для показательной функции

$$\begin{cases} \sum \lg y = n \lg a_0 + \lg a_1 \sum x; \\ \sum x \lg y = \lg a_0 \sum x + \lg a_1 \sum x^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

*Пример.* Анализ данных табл.1 показывает, что с увеличением стоимости основных фондов растет, как правило, и выпуск продукции. Однако мы

не можем утверждать, что увеличение стоимости основных фондов, например на 1 млн. руб., приводит к фактическому увеличению выпуска продукции на определенную сумму. Здесь можно говорить только о каких-то средних тенденциях. Чтобы установить, насколько повышается в среднем выпуск продукции при увеличении основных фондов на 1 млн. руб., прежде всего, определим форму связи. Допустим, что между стоимостью основных фондов и выпуском продукции существует прямолинейная связь, которая выражается уравнением прямой  $y = a_0 + a_1x$ . Необходимо по данным таблицы 2.2. найти параметры  $a_0$  и  $a_1$ , что позволит определить теоретические значения  $y$  для разных значений  $x_i$ . Неизвестные параметры определим используя систему уравнений 2.7.

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{cases}$$

Для определения параметров уравнения регрессии воспользуемся приведенными в таблицы расчетами и подставим в систему нормальных уравнений соответствующие данные:

$$\begin{cases} 47,2 = 10a_0 + 108a_1 \\ 539,1 = 108a_0 + 1236a_1 \end{cases}$$

Таблица 3.1 - Данные по предприятиям

Название предприятий	Стоимость основных фондов (x), млн.руб.	Выпуск продукции (y), млн.руб.	xy	x <sup>2</sup>	y —
«Лидер»	6	2,4	14,4	36	2,692
«Слава»	8	4,0	32,0	64	3,537
«Олимп»	9	3,6	32,4	81	3,958
Перспектива»	10	4,0	40,0	100	4,380
«XXI век»	10	4,5	45,0	100	4,380
«Фаворит»	11	4,6	50,6	121	4,802
Компрессор»	12	5,6	67,2	144	5,224
«Борец»	13	6,5	84,5	169	5,646
«Флагман»	14	7,0	98,0	196	6,068
«Рубин»	15	5,0	75,0	225	6,490
Итого	108	47,2	539,1	1236	47,177

Решим систему нормальных уравнений, для чего каждый член обоих уравнений поделим на коэффициенты при  $a_0$  и из второго уравнения вычтем первое:

$$\begin{cases} 47,2=10a_0+108a_1 & 4,72=a_0+10,8a_1 \\ 539,1=108a_0+1236a_1 & 4,99=a_0+11,44a_1 \\ 0,27=0,64a_1 & \end{cases}$$

Определим параметр  $a_1$ :

$$a_1 = 0,27/0,64=0,422$$

Подставим значение, а в первое уравнение и найдем параметр  $a_0$ :

$$4,72=a_0+10,8\cdot 0,422, \text{ откуда } a_0 =4,72-4,56=0,16.$$

Линейное уравнение корреляционной связи будет иметь следующий

вид:

$$y=0,16+0,422x.$$

Параметр  $a_1$  показывает, что с увеличением стоимости основных фондов на 1 млн.руб. выпуск продукции увеличивается в среднем на 0,422 млн.руб. Параметр  $a_0$  – свободный член уравнения,  $a_0 = 0,16$ , когда  $x=0$ .

Подставляем значения параметров  $a_0$  и  $a_1$  в уравнение прямой  $y=a_0+a_1 x$  и находим теоретические, выровненные значения  $y$ :

$$y_1=0,16+0,422 \cdot 6=2,692$$

$$y_2=0,16+0,422 \cdot 8=3,537 \text{ и т.д.}$$

Теоретические значения  $\bar{y}$  даны в таблице 3.2.

*Пример.* Имеются данные о возрасте и выработке по группе рабочих предприятия «Слава».

Возраст (x), лет	18-22	23-27	28-32	33-37	38-42	43-47	48-52	53-50
Выборка деталей на одного рабочего, шт.	5	6	7	8	10	8	6	5

В результате качественного анализа установлена криволинейная зависимость, принимающая форму кривой второго порядка. В этом случае связь выражается уравнением кривой  $y=a_0+a_1 x+a_2 x^2$ . Задача сводится к нахождению параметров  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$ . Для этого необходимо решить систему трех нормальных уравнений:

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 \\ \sum x^2 y = a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 \end{cases}$$

Подставим данные в систему нормальных уравнений:

{

$$55=8a_0+300a_1+12300a_2$$

$$2075=300a_0+12300a_1+540000a_2$$

$$84175=12300a_0+540000a_1+24922500a_2$$

Поделим каждый член уравнения на коэффициент при  $a_0$  и получим следующие уравнение:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,88=a_0+37,5a_1+1537a_2 \\ 6,92=a_0+41,0a_1+1800,0a_2, \\ 6,84=a_0+43,9a_1+2026,2a_2, \end{array} \right.$$

Вычтем из второго уравнения первое, из третьего – второе и поделим каждый член уравнений на коэффициенты при  $a_1$ :

$$0,04=3,5a_1+262,5a_2 \quad +0,0011=a_1+75a_2$$

$$-0,08=2,9a_1+226,2a_2 \quad -0,028=a_1+78a_2$$

Вычтем теперь из второго уравнения первое и получим:

$$-0,017=3a_2, \quad \text{откуда} \quad a_2 = -0,0057.$$

Подставим в уравнение значение

$$a_2: 0,011=a_1+75(-0,0057),$$

$$\text{откуда} \quad a_1=0,4275+0,011=0,4385.$$

Методом подстановки получаем значение  $a_0$ :

$$6,88=a_0+37,5 \cdot 0,4385+1537,5(-0,0057);$$

$$6,88=a_0+16,44375-8,76375, \quad \text{откуда} \quad a_0=-0,8.$$

Теперь можно записать уравнение параболы:

$$y = -0,8+0,4385x-0,0057x^2$$

Отрицательное значение  $a_2$  показывает, что после определенного возраста (в данном случае 43-47 лет) выработка рабочих начинает падать.

Определим теоретические (выровненные) значения  $y_x$ , для чего в уравнение кривой подставим значения:  $x$

$$y_{x1} = -0,8 + 0,4385 \cdot 20 - 0,0057 \cdot 400 = 5,690;$$

$$y_{x2} = -0,8 + 0,4385 \cdot 25 - 0,0057 \cdot 625 = 6,600 \text{ и}$$

Аналогично находят параметры кривой и более высокого порядка.

С увеличением числа параметров теоретическая кривая будет всё больше приближаться к эмпирической (первоначальной) кривой. Если такое приближение будет чрезмерным, то теоретическая кривая может воспроизвести не только закономерности первоначальной кривой, присущие изучаемому явлению, но и влияние случайных факторов.

### 3.2.3. Определение тесноты корреляционной зависимости

При изучении корреляционной связи важно выяснить не только форму, но и тесноту (сопряженность) связи между факторными и результативными признаками. Для этого в статистике установлен объективный числовой показатель, который вычисляется по определенным правилам. Чтобы измерить тесноту прямолинейной связи между двумя признаками, пользуются парным коэффициентом корреляции, который обозначается  $r_{xy}$ .

В большинстве случаев коэффициент корреляции вычисляется по формулам:

$$r = a_1 \frac{\bar{x}}{\bar{y}};$$

$$r = \frac{\bar{xy} - \bar{x} \bar{y}}{\bar{x} \bar{y}}.$$

Величина по-казателя	Характер связи
До + 0,3	Практически отсутствует
+0,3- +0,5	слабая
+0,5- +0,7	умеренная
+0,7- +1,0	сильная

#### 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

#### 4.1. Общие понятия в математическом планировании эксперимента

Из множества задач, решаемых технологами при исследованиях существующих процессов и создании новых, можно выделить три весьма распространенных вида:

- выявление количественных зависимостей между параметрами процесса;
- отыскание оптимальных условий протекания процесса;
- выбор оптимального состава многокомпонентных смесей.

Так как в большинстве случаев информация о закономерностях взаимосвязи технологических параметров чрезвычайно мала, для решения поставленных задач целесообразно использование кибернетического подхода, в основе которого лежит идея «черного ящика». Он представляет собой систему связей, недоступную для наблюдения, так как о механизме процесса нам ничего не известно или известно лишь частично (рис.4.1)

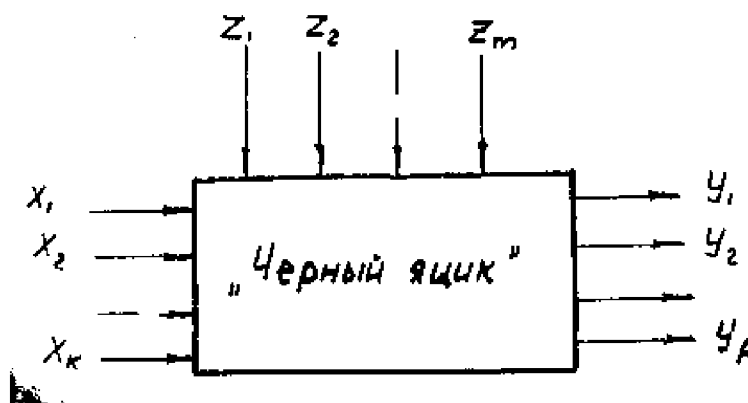


Рисунок 4.1 – Схема «черного» ящика.

Входные параметры называются факторами процесса и могут быть управляемыми  $X$  и неуправляемыми  $Z$ . Выходные параметры  $Y$  называются откликами и являются результатом экспериментов.



Зависимость между выходным параметром – откликом и входными параметрами – факторами называется функцией отклика и имеет общий вид

$$y \hat{=} f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k). \quad (4.1)$$

Уравнению (4.1) соответствует некоторая гиперповерхность в многомерном пространстве, называемая поверхностью отклика, а пространство, в котором существует указанная поверхность, называется факторным пространством. Если фактор один, то поверхность вырождается в кривую, если факторов три и больше, мы имеем дело с гиперповерхностью, которую нельзя изобразить, но с которой, тем не менее, можно работать, как с «обычной» поверхностью.

На рис.4.2 пунктирными линиями показана некоторая поверхность отклика в двухфакторном пространстве кодированных факторов. Пунктирной линией подчеркивается то, что эта поверхность существует, но неизвестна нам. Информацию об этой поверхности можно получить в виде любого числа принадлежащих ей точек путем проведения эксперимента при различных сочетаниях факторов  $x_1$  и  $x_2$ . Полученная информация используется для построения аппроксимирующей поверхности (сплошная линия на рис. 2), которая должна проходить как можно ближе к поверхности отклика. При обработке эмпирической информации, в которой содержатся случайные ошибки, с целью получения аппроксимирующей зависимости, описывающей функцию отклика, широко применяется метод наименьших квадратов. В методе наименьших квадратов в качестве критерия точности аппроксимации используется следующий показатель: сумма квадратов отклонений между известными значениями исследуемой функции отклика и соответствующими значениями аппроксимирующей функции должна быть минимальной:

$$\sum_{u \hat{=} 1}^N (y_u \hat{=} \hat{y}_u)^2 \hat{=} \min, \quad (4.2)$$

где  $N$  – число экспериментальных точек, по которым проводится аппроксимация;

$u$  – номер точки;

знак  $\hat{\phantom{x}}$  - обозначения, предсказанные аппроксимирующим выражением.

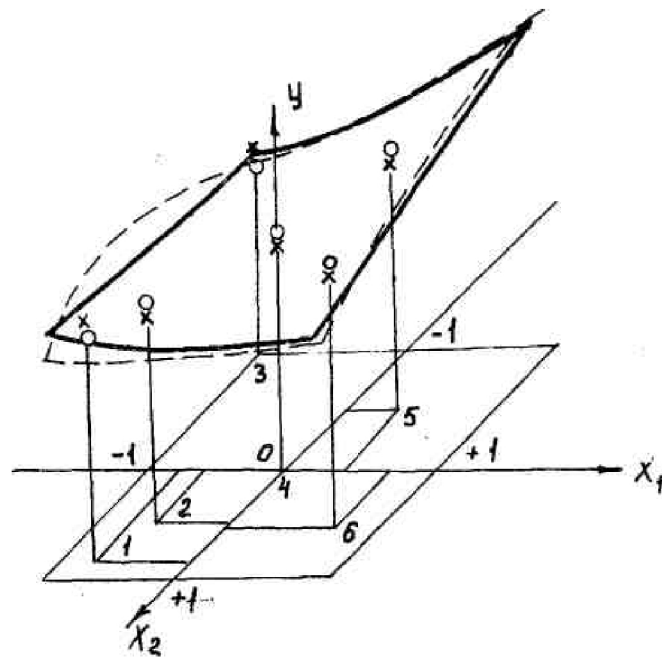


Рисунок 4.2 – Поверхность отклика (пунктир) и аппроксимирующая поверхность (сплошные линии).

В математическом планировании эксперимента наиболее широкое распространение в качестве аппроксимирующей функции получили полиномы некоторой степени:

$$y \hat{=} b_0 \hat{+} \sum_{i=1}^k b_i x_i \hat{+} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \hat{+} \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \hat{+} \dots, \quad (4.3)$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  - выборочные коэффициенты регрессии, которые можно получить, пользуясь результатами эксперимента.

Полученное эмпирическим путем уравнение регрессии (3) часто называют математической моделью процесса.

Так как степень полинома заранее предсказать нельзя, то пользуются идеей шагового поиска, т.е. сначала процесс описывается линейной моделью, и если качество модели неудовлетворительное, то увеличивают число членов полинома, повышая его степень.

Для получения выборочных оценок, коэффициентов уравнения регрессии можно организовать проведение эксперимента двумя принципиально различными путями.

Информация, собранная при так называемом «активном» эксперименте по математически обоснованному плану, учитывающему цели эксперимента и методы обработки его результатов, имеет много бóльшую ценность, чем информация от эксперимента, поставленного по традиционной методике, когда изменяется каждый фактор в отдельности (так называемый «пассивный» эксперимент). При этом практически всегда уменьшаются затраты ресурсов (материальных и временных) на активный эксперимент и существенно облегчается интерпретация моделей. В работах В.В. Налимова на основе большого опыта сформулированы преимущества активных экспериментов:

- минимизируется число опытов;
- оптимально используется факторное пространство;
- вводится четкая логика для всех процедур, последовательно совершаемых экспериментатором;
- рандомизируются условия опыта;
- благодаря направленной организации эксперимента выполняются исходные предпосылки статистического анализа;
- оценивается элемент неопределенности, дающий возможность сопоставлять результаты, полученные разными исследованиями;
- повышается контроль за точностью эксперимента.

Спланировать эксперимент – это, в частности, значит:

а) выбрать из  $N_x$  действующих в технологическом процессе факторов те наиболее существенные факторы  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_k$ , уровни которых технолог собираются изменить;

б) наметить пределы их варьирования  $f_{X_i}^{\min}$  и  $f_{X_i}^{\max}$ ;

в) наметить комбинацию уровней  $k$  факторов  $X_i$ , при которых будет исследоваться процесс;

г) определить число повторений опытов и измерений в каждой из выбранных комбинаций  $k$  факторов.

Началом экспериментального исследования является изучение и анализ всех имеющихся данных о технологическом процессе. В соответствии с идеей шагового поиска эксперимент проводится в несколько этапов, число которых и действия на каждом из них зависят от конечной цели исследования. Из всего многообразия конечных целей исследования можно выделить две:

1. найти адекватное описание функции отклика в заданной части факторного пространства;
2. найти оптимальные условия протекания процесса.

В зависимости от сочетания результата предыдущего этапа и вида конечной цели принимается решение о действиях на следующих этапах исследования (рис. 4.3).

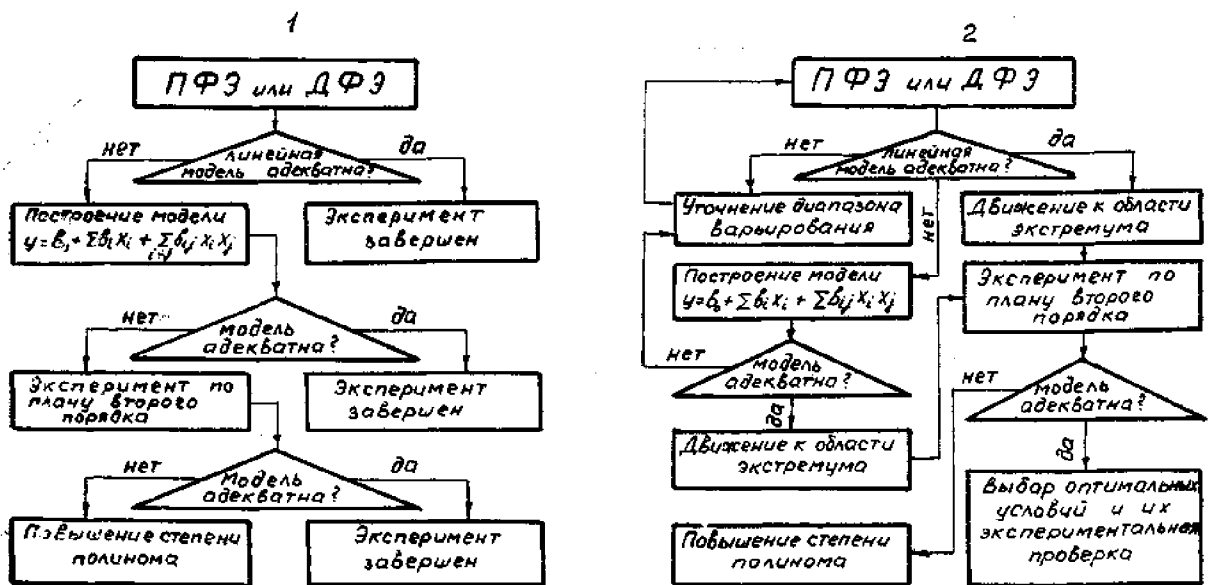


Рисунок 4.3 - Структурная схема решения задач по математическому описанию (1) и определению оптимальных условий протекания (2) технологических процессов.

При отыскании оптимальных режимов технологических процессов, в случае отсутствия данных об области этих режимов, целесообразно применять шаговые или последовательные методы планирования, такие, как методы крутого восхождения или последовательного симплекса планирования. В этих методах поверхность отклика аппроксимируется в локальной области, достаточно далекой от экстремума, линейным приближением с помощью минимально необходимого числа экспериментальных точек. Затем продвижение в область экстремума идет в направлении градиента линейного приближения или путем отбрасывания вершин симплекса с минимальным значением отклика. Эти методы факторного планирования эксперимента позволяют достигнуть «почти стационарной области» - области оптимальных режимов технологического процесса. Если эта область достигнута вышеуказанными методами или получена на основании анализа опытных данных, необходимо для выяснения взаимосвязи отклика и варьируемых параметров построить математическую модель исследуемого процесса, уравнение связи. Обычно в области экстремума поверхность отклика аппроксимируется полиномами второго и более высших порядков.

#### 4.2. Определение и выбор параметров оптимизации и факторов технологических процессов

При проведении «активного» эксперимента, т.е. по методике математического планирования эксперимента, к отклику и факторам исследуемого технологического процесса предъявляется ряд принципиальных требований.

Отклик – это результат опыта в соответствующих условиях. Его часто называют также функцией цели, критерием эффективности, критерием оптимальности, параметром оптимизации и др. Все приведенные термины можно считать синонимами.

Отклики должны отвечать следующим требованиям:

а) характеризовать наиболее общие свойства технологического процесса;

б) оцениваться количественно и быть однозначными, причем важно, чтобы они имели физический смысл и легко вычислялись;

в) обладать статистической эффективностью, т.е. быть нечувствительными к малым случайным воздействиям, и иметь минимальную ошибку воспроизводимости для параллельных опытов одной серии.

В случае, если интересующий нас признак качественный, а критерий, по которому мы оцениваем качество – сложный, необходимо использовать ранговый подход. Ранг – это количественная оценка параметра оптимизации, но она носит условный (субъективный) характер. Мы ставим в соответствие качественному признаку некоторое число – ранг.

Желательно, чтобы параметров в оптимизации было как можно меньше. Однако не следует добиваться уменьшения числа параметров оптимизации за счет полноты характеристики процесса. При планировании эксперимента целесообразно измерять все параметры, затем оценивать корреляции между ними и строить модели для их минимально возможного числа или же воспользоваться обобщенным параметром. Построение обобщенного параметра оптимизации связано с созданием единого признака, количественно определяющего закономерности технологического процесса с многими входными параметрами. Несколько различных способов построения обобщенного показателя рассмотрено в работе.

Важным вопросом при планировании эксперимента является определение и выбор входящих параметров – факторов технологического процесса.

Факторы могут быть качественными и количественными. В инженерной практике, как правило, встречаются количественные факторы: температура, давление, концентрация и т.п. К качественным факторам относятся: вид катализатора, тип аппарата, исполнители и др. Хотя качественным факторам не соответствует числовая шкала в том смысле, как это понимается для количественных факторов, однако можно построить условную порядковую шкалу, в которой уровням качественного фактора соответствуют числа натурального ряда, т.е. производится кодирование.

Каждый фактор, участвующий в процессе, имеет определенный предел изменения своей величины. Совокупность всех значений, которые принимает фактор, называется областью определения фактора. Но в области определения необходимо найти локальную подобласть для планирования эксперимента, т.е. для каждого фактора необходимо указать интервал варьирования параметров, в пределах которого проводятся исследования. Конкретные значения, которые имеет фактор во время эксперимента, называются уровнями.

Факторы в области определения исследуемых процессов должны отвечать следующим принципиальным требованиям. Они должны быть:

а) управляемыми, т.е. в течение всего опыта экспериментатор может управлять каждым фактором в отдельности;

б) совместными, т.е. все комбинации уровней осуществимы и безопасны;

в) независимыми, т.е. необходимо обеспечить возможность их поддержания на любом уровне в течение всего эксперимента все зависимости от уровней других факторов.

В практических задачах области определения факторов, как правило, ограничены. Ограничения могут носить принципиальный либо технический характер.

В результате сбора предварительной априорной информации об изучаемом процессе исследователь должен составить полный список факторов, исходя из того, что лучше назвать несколько малозначащих факторов, чем пропустить один существенно значимый, а также задать ориентировочные пределы изменения факторов с учетом требований к ним. Если количество факторов окажется большим (семь и более), необходимо обратиться к методам отсеивания незначащих факторов.

В качестве примера рассмотрим порядок выбора основных факторов и области их определения при изучении процесса диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ12У с высокопрочной сталью ЭИ961. Технологический процесс диффузионной сварки изучался

применительно к получению сварного соединения рабочего колеса с валом роторов турбин малоразмерных ГТД.

Обычно для количественной оценки качества сварных изделий используют показатели механических свойств полученных соединений. Испытание на растяжение является основным и наиболее распространенным методом исследования механических свойств материалов. Использование этого метода для контрольных испытаний регламентируется Государственным стандартом. Важнейшей характеристикой свойств материалов, а также соединений, полученных сваркой, является предел прочности  $\sigma_B$  (временное сопротивление), определяемый при испытаниях на растяжение.

Следует отметить, что этот вид испытаний не требует больших затрат времени и средств, чем, например, усталостные испытания. Учитывая, что технология ДСВ стали ЭИ961 и сплава ВЖЛ12У предусматривает внесение в стык мягкой прослойки из чистого никеля, то для ряда испытаний, например, определения ударной вязкости этого соединения требуется уточнение и доработка стандартных методик. Предел прочности при растяжении отвечает всем требованиям, предъявляемым к критериям оптимизации. В дальнейшем для уточнения механических свойств сварных узлов была проведена серия испытаний – высокотемпературных, усталостных, комплексных на специальных стендах и натурных изделиях.

При диффузионной сварке соединяемые детали пластически деформируются под воздействием давления сжатия и температуры сварки. Величина остаточной деформации в значительной мере определяет доработку узла после сварки, а также необходимые припуски на детали до сварки.

Выбор величины остаточной деформации в качестве критерия оптимизации позволил выбрать режим ДСВ роторов, при котором пластическая деформация ограничивается минимально необходимой.

Следовательно, в качестве откликов или параметров оптимизации целесообразно выбрать прочность на растяжение  $\sigma$  и остаточную макропластическую деформацию сварного соединения  $\epsilon$ . Причем целью исследований яв-



ляется определение оптимальных значений технологических факторов, при которых сварное соединение будет иметь максимальную прочность  $U_{\max}$  при минимально возможной остаточной пластической деформации  $Z_{\min}$ .

Процесс диффузионной сварки в вакууме характеризуется целым рядом факторов. К числу наиболее ответственных технологических параметров следует отнести:

- температуру сварки;
- удельное давление сжатия;
- время сварки;
- глубину вакуума; класс шероховатости свариваемых поверхностей;
- материал и геометрию прослоя;
- род растворителей для удаления загрязнений с поверхности перед сваркой;
- характер термической и механической обработки сплавов перед сваркой.

Анализ технологических параметров показывает, что их количество достигает десяти и среди них имеются такие, которые поддаются количественной оценке или отражают качественные характеристики технологии ДСВ.

Исходя из требований, предъявляемых к факторам, и учитывая, что с увеличением числа факторов при оптимальном планировании экспериментов значительно увеличивается объем математической обработки результатов, целесообразно при исследовании процесса ДСВ жаропрочных сплавов, на основании опыта проведенных работ, выбрать минимально возможное число варьируемых переменных.

Для отсеивания факторов и выбора, наиболее ответственных из них в данной работе были проанализированы результаты исследований по ДСВ различных сочетаний материалов, а также проведены предварительные эксперименты.

Для отсеивания факторов и выбора, наиболее ответственных из них в данной работе были проанализированы результаты исследований по ДСВ

различных сочетаний материалов, а также проведены предварительные эксперименты.

Анализ литературных данных показал, что такие качественные факторы, как род растворителей для удаления загрязнений и характер термической обработки сплавов перед сваркой, незначительно зависят от сочетания металлических сплавов и могут быть выбраны предварительно. Так, в качестве растворителей для удаления загрязнений можно выбрать бензин и ацетон. Исследуемые сплавы должны проходить термическую обработку согласно техническим условиям на поставку.

Понижение класса поверхности, т.е. увеличение высоты микронеровностей, как правило, приводит к уменьшению площади фактического контакта, на которой развиваются диффузионные процессы, а, следовательно, и снижению конструкционной прочности соединения. Особенно это свойственно для материалов, поверхностный слой которых характеризуется высокой твердостью (ВЖЛ12У  $H_{\text{н}} = 5500$  МПа, ЭИ961  $H_{\text{н}} = 3200$  МПа), а также подвергающихся ДСВ на режимах с пониженными значениями температуры сварки. Применяемый в данной технологии сварки прослой из чистого никеля значительно снижает влияние микрогеометрии поверхности на величину площади фактического контакта, так как при температурах сварки он достаточно пластичен ( $\sigma_{\text{T}} \leq 30$  МПа).

Следует отметить, что с повышением класса чистоты обработки поверхности условия формирования площади фактического контакта улучшаются. В связи с тем, что получение класса шероховатости поверхности выше восьмого связано с усложнением технологии, а высота микронеровностей при 4 – 5 классе сравнима с толщиной прослоя (50 мкм), целесообразно использовать детали роторов ТК и ТС со шлифованными до седьмого класса поверхностями под сварку.

На основании опыта работ и анализа свариваемых материалов (сплав ВЖЛ12У и сталь ЭИ961), а также предварительных экспериментов были выбраны материал и толщина прослоя. Как показала расчетная оценка, мягкая

прослойка из чистого никеля толщиной 0,05 мм на прочность натуральных узлов не оказывает существенного влияния.

Одним из параметров технологического процесса ДСВ жаропрочных сплавов является глубина вакуума. В настоящей технологии для разрушения слоя окислов на свариваемых поверхностях, а также для сохранения чистых поверхностей в течение всего времени сварки нагрев деталей осуществляется в вакууме  $10^{44} - 10^{45}$  мм рт.ст., обычно применяемом для ДСВ на серийных сварных установках. Как показывают эксперименты, при нагреве выше 873 К в вакууме  $10^{44} - 10^{45}$  происходит разрушение окисных пленок на свариваемых материалах, причем более интенсивно на стали ЭИ961.

Таким образом, шероховатость поверхности, материал, геометрия прослойки и глубина вакуума могут быть приняты за постоянные параметры, являющиеся оптимальными. Такие факторы, как температура сварки, удельное давление сжатия и время сварки, являются основными параметрами процесса ДСВ, определяющими процессы формирования физического контакта, диффузионного массообмена в зоне сварки, структурные превращения основных материалов, а, следовательно, и качество соединения в целом. Эти параметры полностью отвечают требованиям, предъявляемым к факторам процессов, исследуемых с помощью методики оптимального планирования эксперимента.

Температурный режим диффузионной сварки в вакууме влияет на все стадии процесса и при выборе интервала варьирования температуры сварки  $T_{св}$  необходимо это учитывать.

Удаление окисных пленок с поверхности высоколегированных сталей и сплавов, как правило, наиболее интенсивно происходит при температурах, превышающих 1223 – 1273 К в вакууме  $10^{44} - 10^{45}$  мм рт. ст., что и подтверждают эксперименты на изучаемых материалах. Следовательно, в целях сокращения времени, необходимого на разрушение окисных пленок в условиях сварки, целесообразно, чтобы нижняя граница интервала варьирования  $T_{св}$  была не ниже 1273 К.

Развитие физического контакта в значительной степени определяется механическими свойствами поверхностных слоев соединяемых деталей. При температурах выше 1273 К пластичность изучаемых сплавов резко увеличивается. Это позволяет при сравнительно небольших усилиях сжатия обеспечить физический контакт через прослой чистого никеля по всей поверхности соединения.

Температурный режим ДСВ стимулирует диффузионные процессы как в самих сплавах, так и взаимную диффузию в переходной зоне между ними. Исследуемые материалы являются жаропрочными высоколегированными сплавами. Наличие в структуре упрочняющих фаз, например, в сплаве ВЖЛ12У –  $\sigma'$  – фазы, ограничивает температуру нагрева ввиду возможных необратимых структурных изменений.

Более чувствительным к перегреву является сплав ВЖЛ12У. Так, нагрев выше температуры закалки 1473 К приводит к необратимым структурным изменениям, вследствие чего прочность и жаростойкость этого материала значительно снижаются.

Наличие в сплавах большого количества легирующих элементов, особенно в ВЖЛ12У, затрудняет протекание диффузионных процессов, а также процессов релаксации внутренних напряжений. Так, для снятия внутренних напряжений в сплаве ВЖЛ12У проводится отжиг при 1223 К в течение двух часов. Следовательно, для стимулирования взаимной диффузии свариваемых сплавов целесообразен нагрев до температур не ниже 1273 К. Следует отметить, что уменьшение температуры сварки ниже 1273 К, как показал опыт, приводит к резкому падению прочности соединения.

Таким образом, диапазон варьирования сварочных температур целесообразно принять равным от 1273 до 1473 К, чтобы полностью отключить возможность перегрева сплава ВЖЛ12У.

Удельное давление сжатия для жаропрочных сплавов обычно выбирается экспериментально. Величина удельного давления влияет, в первую очередь, на относительную деформацию сварного соединения, которую целесо-

образно ограничить. Минимальные макропластические деформации сварного соединения могут быть получены лишь при сварке с применением относительно низких удельных давлений. В то же время давление сжатия должно быть достаточным для образования физического контакта по всей поверхности соединяемых деталей, что определяется пластическими свойствами используемых материалов. В связи с тем, что для свариваемых сплавов точные характеристики пластичности при высоких температурах отсутствуют, интервал варьирования удельного давления сжатия выбран достаточно широким от 5 до 20 МПа.

В настоящее время длительность изотермической выдержки при сварке, особенно для разнородных сложных сочетаний, выбирается экспериментально. Длительные выдержки при сварке значительно снижают производительность процесса ДСВ, а так же приводят к увеличению остаточных деформаций сварного соединения. Ограничение времени может привести к незавершенности формирования физического контакта и снижению величины зоны объемного взаимодействия между свариваемыми материалами. Предварительные эксперименты показали, что выдержка в течение 15 – 20 мин. в диапазоне вышеуказанных интервалов температур и удельных давлений обеспечивает удовлетворительное качество соединения; дальнейшее повышение длительности сварки до 1 ч не приводит к заметному росту механических свойств сварных образцов.

Область факторного пространства, в которой целесообразно исследовать процесс ДСВ сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961, следующая:

$$1273 \text{ K} \leq T_{\text{сз}} \leq 1473 \text{ K};$$

$$5 \text{ МПа} \leq P_{\text{св}} \leq 20 \text{ МПа};$$

$$5 \text{ мин} \leq \tau_{\text{св}} \leq 20 \text{ мин}.$$

Таким образом, анализ информации о процессе диффузионной сварки и свойствах исследуемых сплавов, а также небольшое количество предварительных экспериментов позволили существенно снизить число варьируемых

факторов и достаточно объективно определить границы изучаемого факторного пространства.

В табл. 4.1 представлены наиболее важные факторы и параметры оптимизации для ряда новых технологических процессов изготовления деталей летательных аппаратов и их сборки. При определении факторов и параметров оптимизации пользовались описанной выше схемой их выбора на основании теоретического и экспериментального опыта по исследованию рассматриваемых процессов.

Таблица 4.1 – Основные факторы и критерии оптимизации (отклики) для некоторых технологических процессов в производстве летательных аппаратов

<i>Технологический процесс</i>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
<i>Диффузионная сварка и пайка</i>	<i>Температура</i>	<i>Давление сжатия</i>	<i>Время</i>	<i>Глубина вакуума</i>	<i>Хим. состав прослой (припоя)</i>	<i>Толщина прослой (припоя)</i>	<i>Шероховатость пов-ти</i>	<i>Прочность</i>	<i>Плоскостность</i>	<i>Деформация</i>
<i>Магнитно-импульсная обработка материалов</i>	<i>Внешний радиус индуктора</i>	<i>Внутр. радиус индуктора</i>	<i>Длина индуктора</i>	<i>Число витков</i>	<i>Радиус детали</i>	<i>Толщина детали</i>	<i>Напряжение батареи</i>	<i>Перемещение заготовки</i>	<i>Скорость перемещения заготовки</i>	<i>-</i>
<i>Ионно-плазменное напыление</i>	<i>Ток разряда</i>	<i>Индукция магнитн. поля</i>	<i>Потенциал подложки</i>	<i>Давление реакционного газа</i>	<i>Энергия ионов</i>	<i>Плотность потока энергии</i>	<i>Температура</i>	<i>Адгезия</i>	<i>Износостойкость</i>	<i>Остаточн. напряжжения</i>
<i>Штамповка эластичной средой</i>	<i>Сила тока дуги</i>	<i>Расход плазмообразующ. газа</i>	<i>Расход водорода</i>	<i>Дистанция напыления</i>	<i>Скорость плазмотрона</i>	<i>Шаг попереч. перемещ.</i>	<i>Расход порошка</i>	<i>Адгезия</i>	<i>Износостойкость</i>	<i>Пористость</i>
<i>Плазменное (газотермич.) покрытие</i>	<i>Высота пуансона матрицы</i>	<i>Величина припуска</i>	<i>Толщина заготовки</i>	<i>Твердость эластичной среды</i>	<i>Механич. свойства материалов</i>	<i>Величина противо-давления</i>	<i>Форма инструмента</i>	<i>Угол пружинения</i>	<i>Отклонения геометр. детали</i>	<i>Угол скола</i>
<i>Дорнование</i>	<i>Диаметр</i>	<i>Угол</i>	<i>Натяг</i>	<i>Скорость</i>	<i>Пластич-</i>	<i>Чув-</i>	<i>Вид</i>	<i>Усилие</i>	<i>Точность</i>	<i>Предел</i>

<i>и запрессовка болтов</i>	<i>отверстия</i>	<i>заборного конуса</i>			<i>ность материала</i>	<i>ствит. к динам. нагрузкам</i>	<i>смазки</i>	<i>дорнования</i>	<i>отверстий</i>	<i>выносливости</i>
<i>Клепка</i>	<i>Диаметр отверстия</i>	<i>Толщина пакета</i>	<i>Схема клепки</i>	<i>Тип заклепки</i>	<i>Усилие расклеывания</i>	<i>Скорость деформирования</i>	<i>-</i>	<i>Натяг</i>	<i>Герметичность</i>	<i>Ресурс</i>



### 4.3. Полный факторный эксперимент и дробные реплики

#### 4.3.1. Полный факторный эксперимент

Как при нахождении математической модели технологического процесса в заданной части факторного пространства, так и при нахождении оптимальных условий протекания процесса на первом этапе исследований требуется построение линейных моделей (см. рис. 3), а уже затем принимается решение о действиях на следующих этапах.

Для построения линейных моделей процессов широко применяются математические планы, соответствующие полному факторному эксперименту (ПФЭ) или дробному факторному эксперименту (ДФЭ).

Полным факторным экспериментом называется такой эксперимент, при реализации которого определяется значение параметра оптимизации при всех возможных сочетаниях уровней варьирования факторов. Если мы имеем дело с  $k$  факторами, каждый из которых может устанавливаться на  $q$  уровнях, то для того, чтобы осуществить ПФЭ, необходимо поставить  $n \uparrow q^k$  опытов.

Планирование, проведение и обработка результатов ПФЭ состоят из следующих обязательных этапов:

- кодирование факторов и определение интервалов их варьирования;
- составление плана-матрицы эксперимента;
- проверка воспроизводимости опытов;
- оценка значимости коэффициентов регрессии;
- проверка адекватности линейной модели.

Наибольшее распространение получили эксперименты в которых факторы варьируются на двух уровнях (планы  $2^k$ ). Реже встречаются  $3^k$ , так как с ростом числа уровней факторов резко возрастает количество опытов.

#### *Кодирование факторов*

Поскольку факторы изучаемого процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, их следует привести к единой системе исчисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным.

Связь между кодовым и натуральным значениями фактора задается формулой

$$x_i \uparrow \frac{\tilde{x}_i \hat{\tilde{x}}_i \tilde{x}_{i0}}{\hat{\tilde{x}}_i}, \quad (4.4)$$

где  $\tilde{x}_i$  - натуральное значение фактора;

$\tilde{x}_{i0}$  - натуральное значение фактора на нулевом (основном) уровне

$$\tilde{x}_{i0} \uparrow \frac{\tilde{x}_{i\max} \hat{\tilde{x}}_i \tilde{x}_{i\min}}{2}$$

$$\hat{\tilde{x}}_i \uparrow \frac{\tilde{x}_{i\max} \hat{\tilde{x}}_i \tilde{x}_{i\min}}{2}$$

$x_i$  - кодированное значение фактора.

Вопрос о выборе интервала варьирования требует тщательного рассмотрения. В некоторых случаях границы области исследования факторного пространства могут совпадать с границами интервала варьирования. Однако, особенно при оптимизации процесса, вначале целесообразно описать его линейным уравнением, и поэтому интервал варьирования должен быть достаточно мал для получения линейного уравнения, но вместе с тем достаточно велик, чтобы не получить ошибочного вывода о незначимости какого-либо фактора. В таблице 4.2 приведены результаты кодирования факторов для примера (рассматриваемого в разд. 1) диффузионной сварки сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961.

Таблица 4.2. – Кодированные и натуральные значения факторов процесса диффузионной сварки сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961

Параметры режима	Код	Нулевой уровень, 0	Интервал варьирования, $\hat{\tilde{x}}_i$	Нижний уровень, -1	Верхний уровень, +1
$T_{св}, K$	$x_1$	1348	55	1293	1403
$P_{св}, МПа$	$x_2$	12,5	4,5	8,0	17,0
$\tau_{св}, мин$	$x_3$	12,5	4,5	8,0	17,0

### Составление плана-матрицы эксперимента

Составление плана-матрицы полного факторного эксперимента происходит следующим образом:

для  $X_1$  уровни чередуются в каждом опыте;

для  $X_2$  - через два опыта;

для  $X_3$  - через четыре и т.д.

В результате план-матрица содержит все возможные сочетания факторов исследуемого процесса. План-матрица для ПФЭ типа  $2^3$  приведена в таблице 4.3 и на рисунке 4.4.

Таблица 4.3 – матрица планирования для ПФЭ  $2^3$

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

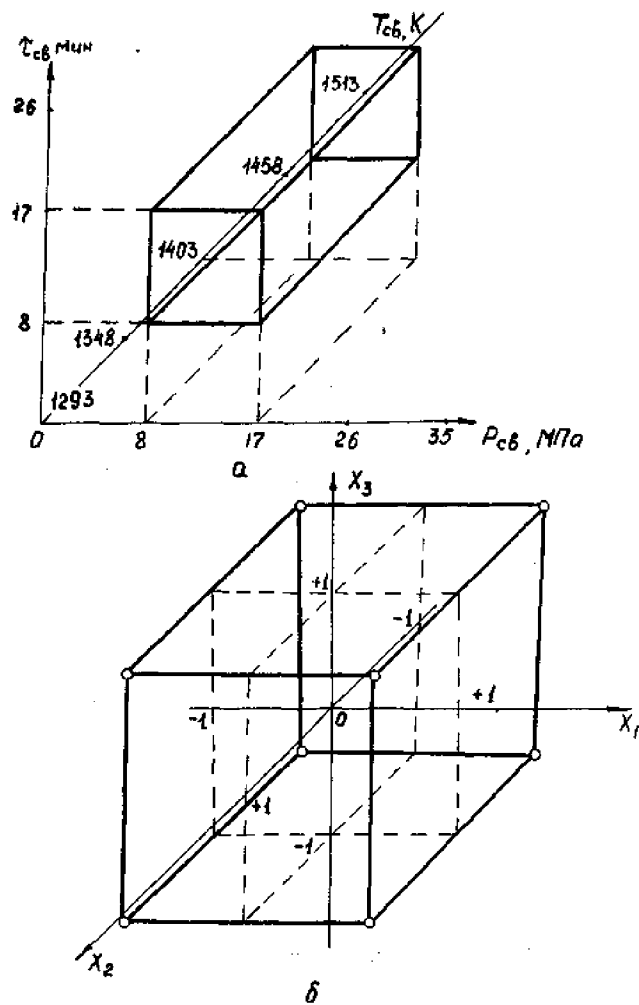


Рисунок 4.4 – Геометрическая интерпретация для плана ПФЭ  $2^3$  в натуральных (а) и кодовых (б) единицах измерений

Планирование согласно полному факторному эксперименту называется ортогональным планированием, при котором определение коэффициентов уравнения регрессии осуществляется независимо друг от друга.

Для составления плана эксперимента, который характеризуется четырьмя факторами, т.е. ПФЭ типа  $2^3$ , матрицу, приведенную в таблице 3, необходимо повторить дважды: при  $X_4$  на нижнем и верхнем уровнях.

Планы факторного эксперимента могут быть записаны в компактной форме: вместо каждой строки в матрице выписать только те факторы, которые находятся на верхнем уровне, а строчку, в которой все факторы находятся на нижнем уровне, обозначить через 1 (таблица 4.4).

### *Рандомизация опытов*

Рандомизацией называется процедура установления случайного порядка проведения опытов по времени, так как кроме варьируемых факторов при исследовании технологического процесса имеется целый ряд дополнительных факторов, оказывающих влияние на функцию отклика. Чтобы внести элемент случайности влияния дополнительных факторов на результат в целях обоснованного применения аппарата математической статистики, осуществляется рандомизация опытов. Для ее осуществления пользуются таблицами случайных чисел, извлечением номеров опытов из урны и т.п.

### *Реализация плана эксперимента*

В результате реализации плана эксперимента определяются значения откликов или параметров оптимизации в каждом опыте и фиксируются в таблице результатов. В рассматриваемом примере в качестве параметров оптимизации были выбраны прочность сварного соединения на растяжение  $y$  и остаточная макропластическая деформация  $z$ . Для оценки воспроизводимости опытных данных план эксперимента был реализован трижды (таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Матрицы для ПФЭ типов  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $2^4$ ,  $2^5$

<i>Опыт</i>	<i>Тип эксперимента</i>			
	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^5$
<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>2</i>	$x_1$	$x_1$	$x_1$	$x_1$
<i>3</i>	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_2$
<i>4</i>	$x_1 x_2$	$x_1, x_2$	$x_1, x_2$	$x_1, x_2$
<i>5</i>		$x_3$	$x_3$	$x_3$
<i>6</i>		$x_1, x_3$	$x_1, x_3$	$x_1, x_3$
<i>7</i>		$x_2, x_3$	$x_2, x_3$	$x_2, x_3$
<i>8</i>		$x_1, x_2, x_3$	$x_1, x_2, x_3$	$x_1, x_2, x_3$
<i>9</i>			$x_4$	$x_4$
<i>10</i>			$x_1, x_4$	$x_1, x_4$
<i>11</i>			$x_2, x_4$	$x_2, x_4$
<i>12</i>			$x_1, x_2, x_4$	$x_1, x_2, x_4$
<i>13</i>			$x_3, x_4$	$x_3, x_4$
<i>14</i>			$x_1, x_3, x_4$	$x_1, x_3, x_4$
<i>15</i>			$x_2, x_3, x_4$	$x_2, x_3, x_4$

16			$X_1, X_2, X_3, X_4$	$X_1, X_2, X_3, X_4$
17				$X_5$
18				$X_1, X_5$
19				$X_2, X_5$
20				$X_1, X_2, X_5$
21				$X_3, X_5$
22				$X_1, X_3, X_5$
23				$X_2, X_3, X_5$
24				$X_1, X_2, X_3, X_5$
25				$X_4, X_5$
26				$X_1, X_4, X_5$
27				$X_2, X_4, X_5$
28				$X_1, X_3, X_4, X_5$
29				$X_3, X_4, X_5$
30				$X_1, X_3, X_4, X_5$
31				$X_2, X_3, X_4, X_5$
32				$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$

Таблица 4.5 – Результаты экспериментов и оценка их воспроизводимости

<i>Опыт</i>	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$x_2 x_3$	$Y_{u1},$ <i>МПа</i>	$Y_{u2},$ <i>МПа</i>	$\bar{y}_u,$ <i>МПа</i>	$S_{y_u}^2$	$\hat{z}_u,$ %	$z_{u2},$ %	$\bar{z}_u,$ %	$S_{z_u}^2$
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	690	720	705	450	0,65	0,95	0,8	0,045
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1015	1025	1020	50	2,9	3,7	3,3	0,32
3	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	895	915	905	200	1,3	2,5	1,9	0,72
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	998	1022	1010	288	6,8	7,4	7,1	0,18
5	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	849	863	856	78	0,7	1,3	1,0	0,18
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1029	1061	1045	512	4,4	4,6	4,5	0,02
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	929	937	933	32	2,4	3,4	2,9	0,50
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1002	1018	1010	128	8,6	9,6	9,1	0,50

$$G_y \uparrow \frac{S_{u \max}^2}{n} \uparrow \frac{512}{1738} \uparrow 0,3 < G_{(0,05;8;1)} \uparrow 0,6798; \quad (4.5)$$

$$G_z \uparrow \frac{0,72}{2,465} \uparrow 0,3 < G_{(0,05;8;1)} \uparrow 0,6798;$$

$$S_u^2 \uparrow \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} \uparrow \frac{1738}{8} \uparrow 217,25;$$

$$S_z^2 \uparrow \frac{2,465}{8} \uparrow 0,308$$

Планируя эксперимент, мы стремимся получить линейную модель. Однако у нас нет уверенности в том, что в выбранных интервалах варьирования процесса описывается линейная модель. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, то влияние одного фактора на отклик зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Это означает, что имеется эффект взаимодействия факторов. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффект взаимодействия. Для этого необходимо воспользоваться расширенной планом-матрицей (таблица 4.5), в которой учитывается произведение факторов.

При этом математическая модель процесса ДСВ сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 будет иметь вид системы двух уравнений регрессии:

$$\begin{aligned} y &\uparrow b_0 \uparrow b_1 x_1 \uparrow b_2 x_2 \uparrow b_3 x_3 \uparrow b_{12} x_1 x_2 \uparrow b_{13} x_1 x_3 \uparrow b_{23} x_2 x_3 \uparrow b_{123} x_1 x_2 x_3 \\ z &\uparrow b'_0 \uparrow b'_1 x_1 \uparrow b'_2 x_2 \uparrow b'_3 x_3 \uparrow b'_{12} x_1 x_2 \uparrow b'_{13} x_1 x_3 \uparrow b'_{23} x_2 x_3 \uparrow b'_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4.6) \end{aligned}$$

#### *Проверка воспроизводимости опытов*

При одинаковом числе параллельных опытов на каждом сочетании уровней факторов воспроизводимость процесса проверяется по критерию Кохрена (см. прил.1):



$$G_y \leq \frac{S_{u_{\max}}^2}{n} \leq G_{(0,05;f_u;f_n)} \quad (4.7)$$

где  $S_{u_{\max}}^2$  – наибольшая из дисперсий в строчках плана;

$$S_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{pu} - \bar{y}_u)^2}{m - 1} \quad \text{– дисперсия, характеризующая рассеяние результа-}$$

тов опытов на  $u - \mu$  сочетании уровней факторов;

$p = 1, 2, \dots, m$  – число параллельных опытов;

$G_{(0,05;f_u;f_n)}$  – табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости /3/;

$f_u = m - 1$  – число степеней свободы каждой оценки;

$f_n = n$  – число независимых оценок дисперсии;

$y_{pu}$  – результат отдельного опыта;

$\bar{y}_u$  – среднее значение опытов на  $u$ -м сочетании уровней факторов.

Число степеней свободы  $f$  – понятие, учитывающее в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Значение  $f$  подсчитывается как разность между числами выполненных опытов и числом констант (коэффициентов, средних и т.д.), подсчитанных по результатам тех же опытов.

Уровень значимости  $\alpha$  – мера точности ответа. Для инженерных расчетов обычно выбирается  $\alpha = 0,05$ , что соответствует вероятности правильного ответа 0,95 или 95%.

Процесс считается воспроизводимым, т.е. ряд дисперсии однороден, если выполняется неравенство (7). Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} \quad (4.8)$$

где  $n$  – число строк матрицы планирования, т.е. число опытов в плане.

Наряду с дисперсией часто используется еще одна величина – среднее квадратичное отклонение (средняя квадратичная ошибка или стандарт), определяемое как корень квадратный из дисперсии, взятый со знаком плюс:

$$S_u = \sqrt{S_y^2 + \frac{\sum_{i=1}^n S_{u_i}^2}{n}} \quad (4.9)$$

Если равенство (4.7) не выполняется, то необходимо уточнить результаты опытов, имеющих максимальное значение дисперсии.

Необходимо отметить, что по возможности следует избегать случаи, когда число повторений каждого опыта неодинаково. Если почему-либо числа повторений опытов неодинаковы, т.е. дисперсии  $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots$ , найдены с различными степенями свободы, однородность дисперсий можно оценить по критерию Вартлета.

В рассматриваемом примере выполняли по три определения величин  $y_u$  и  $z_u$ . Проведенный анализ показал, что процесс воспроизводим с вероятностью 0,95, так как неравенство (4.7) выполняется. При этом дисперсия воспроизводимости по отклику  $y$  равна  $S_y^2 = 217,25$ , а по отклику  $z$   $S_z^2 = 0,308$ .

#### *Определение коэффициентов уравнения регрессии*

По результатам эксперимента определяются коэффициенты математической модели – уравнений регрессии. Все коэффициенты в случае полного факторного эксперимента определяются независимо друг от друга по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 b_0 & \uparrow \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n} \\
 b_i & \uparrow \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n} \\
 b_{ij} & \uparrow \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

где  $\bar{y}_u$  – среднее значение отклика в  $u$ -той строке плана-матрицы;

$x_{iu}$  – значение  $i$ -го фактора в  $u$ -той строке плана-матрицы.

Для рассматриваемого примера:

$$b_0 \uparrow \frac{705 \text{ \textcircled{+}} 1020 \text{ \textcircled{+}} 905 \text{ \textcircled{+}} 1010 \text{ \textcircled{+}} 856 \text{ \textcircled{+}} 1045 \text{ \textcircled{+}} 933 \text{ \textcircled{+}} 1010}{8} \uparrow 935,5;$$

$$b_1 \uparrow \frac{\text{ \textcircled{+}} 705 \text{ \textcircled{+}} 1020 \text{ \textcircled{+}} 905 \text{ \textcircled{+}} 1010 \text{ \textcircled{+}} 856 \text{ \textcircled{+}} 1045 \text{ \textcircled{+}} 933 \text{ \textcircled{+}} 1010}{8} \uparrow 85,75.$$

Аналогично определяются другие коэффициенты:

$$b_2 = 29,0;$$

$$b_3 = 25,5;$$

$$b_{12} = -40,25;$$

$$b_{13} = -19,25;$$

$$b_{23} = -18,5;$$

$$b_{123} = 11,25;$$

$$b'_0 = 3,825;$$

$$b'_1 = 2,175;$$

$$b'_2 = 1,425;$$

$$b'_3 = 0,55;$$

$$b'_{12} = 0,675;$$

$$b'_{13} = 0,25;$$

$$b'_{23} = 0,2;$$

$$b'_{123} = 0.$$

### *Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии*

Коэффициент считается значимый, если выполняется равенство

$$|b_i| \geq t_{t(0,05;f_y)} \sqrt{\frac{S_y^2}{n}}, \quad (4.11)$$

где  $t(0,05;f_y)$  – значение критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости;

$f_y$  – число степеней свободы при определении  $S_y^2$ ;

$n$  – число опытов в плане.

Смысл этого неравенства заключается в том, что абсолютная величина коэффициента должна быть в  $t$  раз больше, чем ошибка его определения. Средняя квадратичная ошибка определения коэффициентов в условиях полного факторного эксперимента постоянна:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_y^2}{n}}. \quad (4.12)$$

Члены уравнения регрессии с незначительными коэффициентами отбрасываются, так как данный фактор не влияет или влияет незначимо на параметр оптимизации. Однако на величину коэффициента регрессии влияет не только роль данного фактора, но также выбранный интервал варьирования. Если интервал варьирования данного фактора увеличить, то его роль может возрасти, что отразится на величине коэффициента уравнения регрессии.

Для рассматриваемого примера значение  $\Delta b_i$ , определяющий доверительный интервал определения коэффициентов в уравнении для прочности сварного соединения,  $\Delta b_{y_i} = 12,04$ , а в уравнении для остаточной макропластической деформации сварного соединения  $\Delta b_{z_i} = 0,453$ .

Коэффициенты регрессии  $b_{123} = 11,25$ ;  $b'_{13} = 0,25$ ;  $b'_{23} = 0,2$ ;  $b'_{123} = 0$  незначимы и их можно не учитывать в математической модели процесса. Таким образом, математическая модель процесса ДСВ сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 имеет следующий вид:

$$y \hat{=} 935,5 \hat{+} 85,75x_1 \hat{+} 29x_2 \hat{+} 25,5x_3 \hat{+} 40,25x_1x_2 \hat{+} 19,25x_1x_3 \hat{+} 18,5x_2x_3; \quad (4.13)$$

$$z \hat{=} 3,825 \hat{+} 2,175x_1 \hat{+} 1,425x_2 \hat{+} 0,55x_3 \hat{+} 0,675x_1x_2. \quad (4.14)$$

#### *Проверка адекватности математической модели*

Адекватность модели проверяется с помощью критерия Фишера (см. прил. 3):

$$F \hat{=} \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \hat{=} F_{(0,05; f_{ад}; f_y)}, \quad (4.15)$$

$$\text{где } S_{ад}^2 \hat{=} \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u \hat{=} \hat{y}_u)^2}{n \hat{=} 1};$$

$\bar{y}$  – среднее значение отклика в  $u$ -м опыте;

$S_y^2$  – дисперсия воспроизводимости опытов;

$F_{(0,05; f_{ад}; f_y)}$  – табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости;

$f_{ад} \hat{=} n \hat{=} \ell$  – число степеней свободы при определении  $S_{ад}^2$ ;

$\hat{y}_u$  – расчетное (согласно уравнению регрессии) значение отклика в  $u$ -м опыте;

$\ell$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Если неравенство (4.15) выполняется, то с вероятностью 0,95 можно считать, что уравнению регрессии адекватно описывает, т.е. достаточно точно аппроксимирует, функцию отклика.

Результаты проверки на адекватность математической модели в рассматриваемом примере приведены в таблице 4.6. Как показали расчеты,

математическая модель (13) неадекватна, т.е. погрешность аппроксимации функции отклика очень велика.

Таблица 4.6 – Оценка адекватности математической модели

Опыт <i>m</i>	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{y}$	$\hat{y}$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{n}$	$\bar{z}$	$\hat{z}$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{z}_i - \hat{z}_i)^2}{n}$
1	-1	-1	-1	705	717,25	150,06	0,8	0,35	0,2025
2	+1	-1	-1	1020	1007,75	150,06	3,3	3,35	0,0025
3	-1	+1	-1	905	892,75	150,06	1,9	1,85	0,0025
4	+1	+1	-1	1010	1022,25	150,06	7,1	7,55	0,2025
5	-1	-1	+1	856	843,75	150,06	1,0	1,45	0,2025
6	+1	-1	+1	1045	1057,25	150,06	4,5	4,45	0,0025
7	-1	+1	+1	933	945,25	150,06	2,9	2,95	0,0025
8	+1	+1	+1	1010	997,75	150,06	9,1	8,65	0,2025

$$S_{y(\text{ад})}^2 \doteq \frac{1200,48}{8 \dot{H} 7} \doteq 1200,48 \text{ при } f_{\text{ад}} = 1; S_y^2 = 217,25;$$

$$F_y \doteq \frac{1200,48}{217,25} \doteq 5,53 > F_{(0,05;1;8)} \doteq 5,31;$$

$$S_{z(\text{ад})}^2 \doteq \frac{0,82}{8 \dot{H} 5} \doteq 0,273 \text{ при } f_{\text{ад}} = 3; S_z^2 = 0,308;$$

$$F_z \doteq \frac{0,273}{0,308} \doteq 0,87 < F_{(0,05;3;8)} \doteq 4,066 .$$

В связи с этим необходимо увеличить степень полиномов, описывающих зависимости прочности и остаточной макропластической деформации

сварного соединения от температуры, давления сжатия и времени сварки. Для решения этой задачи используются специальные планы второго порядка.

Уравнение регрессии (4.14) адекватно описывает зависимость остаточной пластической деформации сварного соединения от температуры, давления сжатия и времени сварки. Следовательно, полученное уравнение регрессии, т.е. математическую модель, можно использовать для анализа и прогнозирования значений остаточной пластической деформации при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижнем уровнями.

#### 4.3.2. Дробный факторный эксперимент

Число опытов в полном факторном эксперименте быстро растет с увеличением размерности факторного пространства. Применение планирования по типу дробного факторного эксперимента (ДФЭ) позволяет существенно снизить число опытов при достаточно большом числе факторов.

Идея ДФЭ заключается в том, что в случае, когда некоторые взаимодействия факторов не оказывают влияния на отклик, т.е. коэффициенты при них незначимы, столбцы плана-матрицы, соответствующие этим взаимодействиям, можно использовать еще для ряда новых факторов.

Например, полный факторный эксперимент типа  $2^2$  имеет расширенную матрицу планирования (табл.4.7), в которой незначимый эффект взаимодействия  $x_1x_2$  можно заменить новым фактором  $x_3$ . При этом мы будем иметь план дробного факторного эксперимента типа  $2^{3\frac{1}{2}}$ . В отличие от ПФЭ  $2^3$  число опытов для нахождения линейной математической модели сокращено вдвое.

Таблица 4.7 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента  $2^{3\frac{1}{2}}$

<i>Номер опыта</i>	$x_1$	$x_2$	$x_3 \uparrow x_1x_2$
--------------------	-------	-------	-----------------------

1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

Если расширить матрицу планирования, приведенную в таблице 4.7, до такой, какая показана в таблице 4.8, то при сравнении столбцов можно сделать следующие выводы. Столбец  $x_2x_3$  полностью повторяет столбец  $x_1$ ; столбец  $x_1x_3$  точно такой же, как столбец  $x_2$ ; столбец  $x_1x_2$  имеет те же знаки, что столбец  $x_3$ , столбец  $x_1x_2x_3$  соответствует так называемой фиктивной переменной, которая используется для определения свободного члена  $b_0$ . Таким образом, коэффициенты уравнения регрессии, найденные по результатам опытов, являются оценками для совместных эффектов:

$$b_1 \hat{=} \hat{\beta}_1 \hat{G} \hat{\beta}_{12};$$

$$b_2 \hat{=} \hat{\beta}_2 \hat{G} \hat{\beta}_{13};$$

$$b_3 \hat{=} \hat{\beta}_3 \hat{\beta}_{23};$$

$$b_0 \hat{=} \hat{\beta}_0 \hat{G} \hat{\beta}_{123},$$

где  $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$  – истинные значения коэффициентов;

$\hat{\beta}_{12}, \hat{\beta}_{13}, \hat{\beta}_{23}, \hat{\beta}_{123}$  – истинные значения взаимодействий.

Таблица 4.8 – Расширенная матрица планирования дробного факторного эксперимента  $2^{3H1}$

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	-	-	+	+	-	-	+
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	+	+	+	+

В дробном факторном эксперименте линейные эффекты смешаны с эффектами парных взаимодействий, что свидетельствует о некоторой потере информации. Однако, если при этом резко уменьшается количество экспери-



ментов, а принятая модель линейна и взаимодействия пренебрежимо малы, то точность расчета будет достаточной.

Полный факторный эксперимент может быть разбит на реплики различной дробности с максимальной разрешающей способностью относительно линейных эффектов. Чем больше эффектов позволяет оценить дробный факторный эксперимент, тем бóльшей разрешающей способностью он обладает.

Выбор степени дробности эксперимента должен производиться всякий раз в зависимости от поставленной задачи и имеющихся сведений о процессе. Часто встречаются задачи, в которых важно иметь отдельные независимые оценки не линейных эффектов, а эффектов парных взаимодействий. Этого можно добиться подбором плана дробного факторного эксперимента.

#### 4.3.3. Интерпретация результатов факторного эксперимента.

В результате проведения экспериментов по плану полного факторного эксперимента или дробной реплики получаем математическую модель процесса в виде полинома. Если полученная модель адекватно описывает экспериментальные данные, то ее можно использовать для определения значений отклика при любых значениях факторов, находящихся между нижним и верхним уровнями.

В рассматриваемом примере уравнение

$$z \hat{=} 3,825 \hat{+} 2,175x_1 \hat{+} 1,425x_2 \hat{+} 0,55x_3 \hat{+} 0,675x_1x_2 \quad (4.16)$$

адекватно описывает зависимость остаточной пластической деформации сварного соединения сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 от температуры сварки в диапазоне 1293...1403 К, давления сжатия 8...17 МПа и времени сварки 8...17 мин.

Коэффициенты уравнения регрессии показывают, насколько изменяется значение отклика, если фактор изменить на величину одного интервала варьирования. Следовательно, из уравнения (4.16) получается, что при времени

сварки 17 мин и давлении сжатия 17 МПа изменение температуры сварки с 1293 до 1403 К приводит к росту остаточной пластической деформации сварного соединения с 2,9% до 9,1%, т.е. на 6,2%, а при постоянных значениях температуры сварки 1403 К и давлении сжатия 17 МПа увеличение времени сварки с 8 до 17 мин приводит к росту деформации с 7,1% до 9,1%, т.е. на 2%. Необходимо отметить, что бóльший по абсолютной величине коэффициент перед фактором  $x_1$  еще не дает оснований утверждать, что его влияние на отклик существеннее факторов  $x_2$ ,  $x_3$ , коэффициенты перед которыми меньше. Дело в том, что сами по себе единицы варьирования факторов несоизмеримы между собой.

При исследовании математических моделей технологических процессов используется множество вариантов графической интерпретации. Так, на рисунке 5,а показана поверхность отклика  $z$  при постоянном значении  $x_2 = 0$  (12,5 МПа), представляющая собой в координатах  $x_1$  и  $x_3$  гиперплоскость, которая проходит через точку  $z = b_0$  (3,825%). Если рассечь плоскость ABCD любой плоскостью, перпендикулярной оси  $z$ , то в пересечении плоскостей получим прямую, каждой точке которой соответствует одно и то же значение отклика. Таким образом, строятся линии равного выхода (отклика) в области факторного пространства.

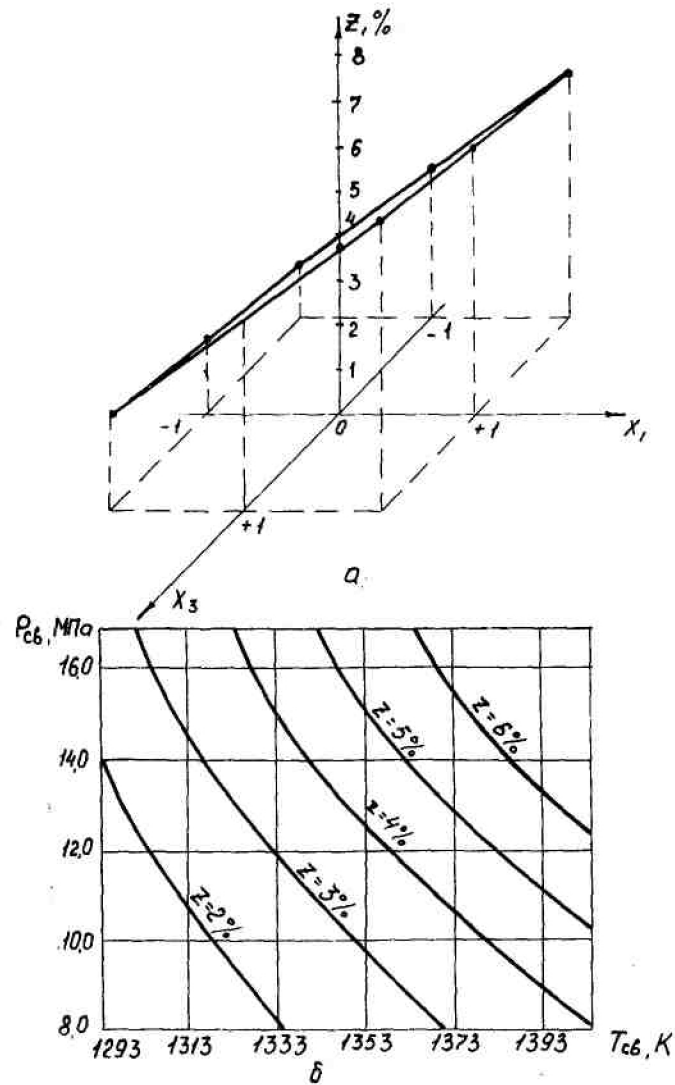


Рисунок 4.5 – Зависимость величины остаточной макропластической деформации сварного соединения от температуры и давления сжатия при сварке (а) и линии равных значений остаточной макропластической деформации сварных соединений (б).

На рисунке 4.5,б показаны линии равной остаточной пластической деформации сварного соединения при условии, что  $x_3 = 0$  (12,5 мин), а  $x_1$  и  $x_2$  изменяются в пределах их интервалов варьирования. Каждой точке кривой, например при  $z = 3\%$ , соответствуют координаты  $T_{cb}$  и  $P_{cb}$ , которые определяют возможные условия получения отклика с заданным значением. Из графика также видно, что для снижения пластической деформации сварного соединения необходимо уменьшать температуру и давление сжатия при сварке.

Способ графической интерпретации, показанный на рисунке 4.5,б, является достаточно удобным для анализа полученных математических моделей.

Однако окончательные выводы по оптимизации технологического процесса можно делать только после анализа нескольких откликов.

Так, задачей в рассматриваемом примере является выбор режимов сварки, позволяющих получать прочные сварные соединения с минимально возможной их пластической деформацией. Поэтому целесообразно получить адекватную модель, описывающую зависимость прочности сварных соединений от варьируемых факторов ( $T_{св}$ ,  $P_{св}$ ,  $\tau_{св}$ ). Затем с помощью графических методов наложить линии равной прочности сварных соединений на линии равной остаточной пластической деформации. После этого можно определить диапазон возможности режимов диффузионной сварки сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961.

Для получения математической модели, адекватно описывающей экспериментальные данные по прочности сварных соединений от  $T_{св}$ ,  $P_{св}$ ,  $\tau_{св}$ , целесообразно использовать математические планы второго порядка.

## 5. АНАЛИЗ И ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1. Анализ теоретико-экспериментальных исследований и формулирование выводов и предложений

Основой совместного анализа теоретических и экспериментальных исследований является сопоставление выдвинутой рабочей гипотезы с опытными данными наблюдений.

Теоретические и экспериментальные данные сравнивают методом сопоставления соответствующих графиков. Критериями сопоставления могут быть минимальные, средние и максимальные отклонения экспериментальных результатов от данных, установленных расчетом на основе теоретических зависимостей. Возможно также вычисление среднеквадратического отклонения и дисперсии. Однако наиболее достоверными следует считать критерии адекватности (соответствия) теоретических зависимостей экспериментальным.

В результате теоретико-экспериментального анализа могут возникнуть три случая:

1) установлено полное или достаточно хорошее совпадение рабочей гипотезы, теоретических предпосылок с результатами опыта. При этом дополнительно группируют полученный материал исследований таким образом, чтобы из него вытекали основные положения разработанной ранее рабочей гипотезы, в результате чего последняя превращается в доказанное теоретическое положение, в теорию;

2) экспериментальные данные лишь частично подтверждают положение рабочей гипотезы и в той или иной ее части противоречат ей. В этом случае рабочую гипотезу изменяют и перерабатывают так, чтобы она наиболее полно соответствовала результатам эксперимента. Чаще всего производят дополнительные корректировочные эксперименты с целью подтвердить изменения рабочей гипотезы, после чего она также превращается в теорию;

3) рабочая гипотеза не подтверждается экспериментом. Тогда ее критически анализируют и полностью пересматривают. Затем проводят новые экспери-

ментальные исследования с учетом новой рабочей гипотезы. Отрицательные результаты научной работы, как правило, не являются бросовыми, они во многих случаях помогают выработать правильные представления об объектах, явлениях и процессах.

После выполненного анализа принимают окончательное решение, которое формулируют как заключение, выводы или предложения. Эта часть работы требует высокой квалификации, поскольку необходимо кратко, четко, научно выделить то новое и существенное, что является результатом исследования, дать ему исчерпывающую оценку и определить пути дальнейших исследований. Обычно по одной теме не рекомендуется составлять много выводов (не более 5—10). Если же помимо основных выводов, отвечающих поставленной цели исследования, можно сделать еще и другие, то их формулируют отдельно, чтобы не затемнить конкретного ответа на основную задачу темы.

Все выводы целесообразно разделить на две группы: научные и производственные. При выполнении НИР заботятся о защите государственного приоритета на изобретения и открытия.

Далее приведена примерная схема анализа теоретико-экспериментальных исследований.

- А) Общий анализ теоретических и экспериментальных исследований.
- Б) Сопоставление экспериментов с теорией.
- В) Анализ расхождений.
- Г) Уточнение теоретических моделей, исследований и выводов.
- Д) Дополнительные эксперименты (в случае необходимости).
- Е) Превращение гипотезы в теорию.
- Ж) Формулирование выводов, составление научно-технического отчета.
- З) Рецензирование.
- И) Составление доклада.
- К) Исправление рукописи.

## 5.2. Внедрение научных исследований

Внедрение завершенных научных исследований в производство — заключительный этап НИР.

Внедрение — это передача производству научной продукции (отчеты, инструкции, временные указания, технические условия, технический проект и т. д.) в удобной для реализации форме, обеспечивающей технико-экономический эффект. НИР превращается в продукт лишь с момента ее потребления производством.

Заказчиками на выполнение НИР могут быть технические управления министерств, тресты, управления, предприятия, НИИ и т. д.

Подрядчик — научно-исследовательская организация, выполняющая НИР в соответствии с подрядным двусторонним договором, обязан сформулировать предложение для внедрения. Последнее в зависимости от условий договора должно содержать технические условия, техническое задание, проектную документацию, временную инструкцию, указание и т. д.

Процесс внедрения состоит из двух этапов: опытно-производственного внедрения и серийного внедрения (внедрение достижений науки, новой техники, новой технологии).

Как бы тщательно ни проводились НИР в научно-исследовательских организациях, все же они не могут всесторонне учесть различные, часто случайные факторы, действующие в условиях производства. Поэтому научная разработка на первом этапе внедрения требует опытной проверки в производственных условиях.

Предложение о законченных НИР рассматривают на научно-технических советах, а в случаях особо ценных предложений — на коллегиях министерства, и направляют на производство для практического применения.

После опытно-производственного испытания новые материалы, конструкции, технологии, рекомендации, методики внедряют в серийное производство как элементы новой техники. На этом, втором, этапе научно-исследовательские организации не принимают участия во внедрении. Они могут по просьбе внедря-

ющих организаций давать консультации или оказывать незначительную научно-техническую помощь.

После внедрения достижений науки в производство составляют пояснительную записку, к которой прилагают акты внедрения и эксплуатационных испытаний, расчет экономической эффективности, справки о годовом объеме внедрения по включению получаемой экономии в план снижения себестоимости, протокол долевого участия организаций в разработке и внедрении, расчет фонда заработной платы и другие документы.

Внедрение достижений науки и техники финансируют организации, которые его осуществляют.

### 5.3. Эффективность научных исследований

Под экономической эффективностью научных исследований в целом понимают снижение затрат общественного и живого труда на производство продукции в той отрасли, где внедряют законченные научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки (НИР и ОКР). Основные виды эффективности научных исследований:

1) экономическая эффективность — рост национального дохода, повышение производительности труда, качества продукции, снижение затрат на научные исследования;

2) укрепление обороноспособности страны;

3) социально-экономическая эффективность — ликвидация тяжелого труда, улучшение санитарно-гигиенических условий труда, очистка окружающей среды и т. д.;

4) престиж отечественной науки.

Наука является наиболее эффективной сферой капиталовложений. В мировой практике принято считать, что прибыль от капиталовложений в нее составляет 100—200% и намного выше прибыли любых отраслей. По данным зарубежных экономистов, на один доллар затрат на науку прибыль в год составляет 4—7 долларов и больше. В нашей стране эффективность науки также



высокая..

С каждым годом наука обходится обществу все дороже. На нее расходуют огромные суммы. Поэтому в экономике науки возникает и вторая проблема — систематическое снижение народнохозяйственных затрат на исследования при возрастающем эффекте от их внедрения. В связи с этим под эффективностью научных исследований понимают также по возможности более экономное проведение НИР.

Хорошо известно, какое большое значение ныне придается вопросам ускоренного развития науки и НТП. Делается это по глубоким стратегическим причинам, которые сводятся к тому объективному факту, что наука и система ее приложений стала реальной производительной силой, наиболее мощным фактором эффективного развития общественного производства.

Есть два кардинально различных пути ведения дел в экономике: экстенсивный путь развития и интенсивный. Путь экстенсивного развития — это расширение заводских площадей, увеличение числа станков и т. д. Интенсивный путь предполагает, чтобы каждый завод с каждого работающего станка, сельскохозяйственное предприятие с каждого гектара посевных площадей получали все больше и больше продукции. Это обеспечивается использованием новых научно-технических возможностей: новых средств труда, новых технологий, новых знаний. К интенсивным факторам относится и рост квалификации людей, и вся совокупность организационных и научно-технических решений, которыми вооружается современное производство.

Это очень существенное обстоятельство. Из него вытекает, что и впредь наша хозяйственная политика будет направлена на то, чтобы во всех сферах общественного производства решать проблемы дальнейшего развития преимущественно за счет интенсивных факторов. При этом особая роль отводится науке, а на саму науку распространяется то же самое требование. Сошлемся на характерные цифры. За последние 40—50 лет количество новых знаний увеличилось примерно в два-три раза, в то же время объем информации (публикаций, различной документации) увеличился в восемь-десять раз, а объем

средств, отпускаемых на науку, — более чем в 100 раз. Эти цифры заставляют задуматься. Ведь рост ресурсов, затрачиваемых на науку, не самоцель. Следовательно, научную политику надо менять, необходимо решительно повысить эффективность работы научных учреждений.

Есть еще одно важное обстоятельство. В данном случае нас интересует не сам по себе прирост новых знаний, а прирост эффекта в производстве. Мы должны проанализировать: все ли нормально с пропорциями между получением знаний и их применением на производстве. Нужно опережающе высокими темпами увеличивать вложения в мероприятия по освоению результатов НТП в производство.

Существует некоторая теоретическая модель, построенная из соображений наиболее полного использования новых знаний, новых научных данных. В соответствии с этой моделью, если ассигнования в области фундаментальных исследований принять за единицу, то соответствующие показатели составят: по прикладным исследованиям — 4, по разработкам — 16, по освоению нововведений в производство — 250. Эта модель построена академиком В.М. Глушковым исходя из того, что все разумное (из новых идей, сведений, возможностей), полученное в сфере фундаментальных исследований, будет использовано. Для этого будет достаточно наличных мощностей прикладных наук. Затем возможности практического применения будут реализованы в виде новых технологий, новых конструкций и т. п., теми, кто проектирует, ведет разработки. И у них, в свою очередь, будет достаточно мощностей, чтобы все это принять и полностью пустить в дело. Наконец, необходимо иметь достаточно капиталовложений и свободных мощностей, предназначенных для освоения нововведений на производстве, чтобы освоить и реализовать все объективно необходимые нововведения.

Если суммарные затраты на фундаментальные и прикладные исследования, а также на опытно-конструкторские разработки принять за единицу, то отношение между вложениями в производство новых знаний и вложениями в освоение этих знаний народным хозяйством составит 1:12. А в действительности

сти такое соотношение 1:7. Это свидетельствует о том, что в народном хозяйстве зачастую нет свободных мощностей, не хватает возможностей для маневра (в США такое соотношение 1:11).

В современной науке каждый четвертый — руководитель. Вот и получается, что каждый четвертый, занятый в науке, — руководитель. Руководителей в науке больше, чем физиков, химиков, математиков и пр., отдельно взятых. Но математиков, физиков, химиков и прочих готовят вузы (и профессиональный уровень их знаний, как правило, очень высок). Руководству же научной деятельностью их не обучали. Этому они учатся сами и самым непродуктивным способом — на своих ошибках. Решение этого вопроса тоже сможет поднять эффективность научных исследований.

Одним из путей повышения эффективности научных исследований является использование так называемых попутных или промежуточных результатов, которые зачастую совсем не используются или используются поздно и недостаточно полно.

Например, космические программы. Чем они оправдываются экономически? Конечно, в результате их разработки была улучшена радиосвязь, появилась возможность дальних передач телевизионных программ, повышена точность предсказания погоды, получены большие научные фундаментальные результаты в познании мира и т. д. Все это имеет или будет иметь экономическое значение.

На эффективность исследовательского труда прямо влияет оперативность научных изданий, прежде всего периодических. Анализ сроков нахождения статей в редакциях отечественных журналов показал, что они задерживаются вдвое дольше, чем в аналогичных зарубежных изданиях. Для сокращения этих сроков, по-видимому, целесообразно в нескольких журналах экспериментально проверить новый порядок публикаций: печатать только рефераты статей объемом до 4—5 страниц, а полные тексты издавать методом безнаборной печати в виде оттисков и высылать по запросам заинтересованных лиц и организаций.

Известно, что темпы роста инструментальной вооруженности современной науки должны примерно в 2,5—3 раза превышать темпы роста численности

работающих в этой сфере. В целом по стране этот показатель еще недостаточно высок, а в некоторых научных организациях он заметно меньше единицы, что приводит к фактическому снижению КПД интеллектуальных ресурсов науки.

Современные научные приборы морально изнашиваются столь быстро, что за 4—5 лет, как правило, безнадежно устаревают. При нынешних темпах НТП абсурдной выглядит так называемая бережная (по несколько часов в неделю) эксплуатация прибора.

Рационально приобретать приборов меньше, но самых совершенных, и загружать их максимально, не боясь износа, а через 2—3 года интенсивной эксплуатации заменять новыми, более современными.

Министерство промышленности, обновляя свою продукцию примерно каждые пять и более лет, лишь 10—13% ее выпускает на уровне мировых показателей. Среди причин этого явления важное место занимает распыленность и слабость научного потенциала соответствующих предприятий, делающие их не подготовленными к восприятию существенно нового, а тем более к разработке его силами своих ученых и инженеров.

В современной науке вопросом вопросов являются кадры. Вместе с тем следует признать, что в целом индустриальный сектор науки еще очень слабо обеспечен высококвалифицированными кадрами исследователей. На каждую сотню центральных заводских лабораторий приходится лишь один кандидат наук. Большинство заводских научных подразделений, по масштабам работ сравнимых с обычными НИИ, имеют в несколько раз меньшее число докторов и кандидатов наук.

Особого внимания заслуживает проблема целевой подготовки кадров для индустриального сектора науки.

Для оценки эффективности исследований применяют разные критерии, характеризующие степень их результативности.

Фундаментальные исследования начинают отдавать капиталовложения лишь спустя значительный период после начала разработки. Результаты их обычно широко применяют в различных отраслях, иногда в тех, где их совсем не ожида-

ли. Поэтому подчас нелегко планировать результаты таких исследований.

Фундаментальные теоретические исследования трудно оценить количественными критериями эффективности. Обычно можно установить только качественные критерии: возможность широкого применения результатов исследований в различных отраслях народного хозяйства страны; новизна явлений, дающая большой толчок для принципиального развития наиболее актуальных исследований; существенный вклад в обороноспособность страны; приоритет отечественной науки; отрасль, где могут быть начаты прикладные исследования; широкое международное признание работ; фундаментальные монографии по теме и цитируемость их учеными различных стран.

Эффективность прикладных исследований оценить значительно проще. В этом случае применяют различные количественные критерии.

Об эффективности любых исследований можно судить лишь после их завершения и внедрения, т. е. тогда, когда они начинают давать отдачу для народного хозяйства. Большое значение приобретает фактор времени. Поэтому продолжительность разработки прикладных тем по возможности должна быть короче. Лучшим является такой вариант, когда продолжительность их разработки до трех лет. Для большинства прикладных исследований вероятность получения эффекта в народном хозяйстве в настоящее время превышает 80%.

Как оценить эффективность исследования коллектива (отдела, кафедры, лаборатории и т. д.) и одного научного работника?

Эффективность работы научного работника оценивают различными критериями: публикационным, экономическим, новизной разработок, цитируемостью работ и др.

Публикационным критерием характеризуют общую деятельность — суммарное количество печатных работ, общий объем их в печатных листах, количество монографий, учебников, учебных пособий. Этот критерий не всегда объективно характеризует эффективность научного работника. Могут быть случаи, когда при меньшем количестве печатных работ отдача значительно больше, чем от большего количества мелких печатных работ. Экономическую

оценку работы отдельного научного работника применяют редко. Чаще в качестве экономического критерия используют показатель производительности труда научного работника (выработку в тыс. грн. сметной стоимости НИР). Критерий новизны НИР — это количество авторских свидетельств и патентов. Критерий цитируемости работ ученого представляет собой число ссылок на его печатные работы. Это второстепенный критерий.

Эффективность работы научно-исследовательской группы или организации оценивают несколькими критериями: среднегодовой выработкой НИР, количеством внедренных тем, экономической эффективностью от внедрения НИР и ОКР, общим экономическим эффектом, количеством полученных авторских свидетельств и патентов, количеством проданных лицензий или валютной выручкой.

Экономический эффект от внедрения — основной показатель эффективности научных исследований — зависит от затрат на внедрение, объема внедрения, сроков освоения новой техники и многих других факторов.

Эффект от внедрения рассчитывают за весь период, начиная от времени разработки темы до получения отдачи. Обычно продолжительность такого периода прикладных исследований составляет несколько лет. Однако в конце его можно получить полный народнохозяйственный эффект.

Уровень новизны прикладных исследований и разработок коллектива характеризуют критерием  $K_{\&}$ , т. е. числом завершенных работ, по которым получены авторские свидетельства и патенты. Критерий  $K_{\&}$  характеризует абсолютное количество свидетельств и патентов. Более объективными являются относительные показатели, например количество свидетельств и патентов, отнесенных к определенному количеству работников  $P$  данного коллектива ( $P = 100, 1000$ ) или к числу тем, разрабатываемых коллективом, которые подлежат оформлению свидетельствами и патентами.

Различают три вида экономического эффекта: предварительный, ожидаемый и фактический.

Предварительный экономический эффект устанавливается при обоснова-

нии темы научного исследования и включении ее в план работ. Рассчитывают его по ориентировочным, укрупненным показателям с учетом прогнозируемого объема внедрения результатов исследований в группу предприятий данной отрасли.

Ожидаемый экономический эффект вычисляют в процессе выполнения НИР. Его условно относят (прогнозируют) к определенному периоду (году) внедрения продукции в производство. Ожидаемая экономия — более точный экономический критерий по сравнению с предварительной экономией, хотя в некоторых случаях она является также ориентировочным показателем, поскольку объем внедрения можно определить лишь ориентировочно. Ожидаемый эффект вычисляют не только на один год, но и на более длительный период (интегральный результат). Ориентировочно такой период составляет до 10 лет от начала внедрения для новых материалов и до 5 лет для конструкций, приборов, технологических процессов.

Фактический экономический эффект определяется после внедрения научных разработок в производство, но не ранее, чем через год. Расчет его производят по фактическим затратам на научные исследования и внедрение с учетом конкретных стоимостных показателей данной отрасли (предприятия), где внедрены научные разработки. Фактическая экономия почти всегда несколько ниже ожидаемой: ожидаемую определяют НИИ ориентировочно (иногда с завышением), фактическую — предприятия, на которых осуществляется внедрение.

Наиболее достоверным критерием экономической эффективности научных исследований является фактическая экономия от внедрения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиастроение: Летательные аппараты, двигатели, системы, технологии / Колл. 20 авторов; Под ред. А. Г. Братухина. -М.: Машиностроение, 2000. - 536 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. С. 280.
3. Астапов В.Ю., Усачев Е.В. Некоторые вопросы разработки и исследования техпроцесса изготовления осесимметричных деталей ЛА и применение автоматизированного проектирования оснастки // Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского. Вып. 4 (76). - М.: Латмэс, 2001. - 790 с., ил.
4. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением.-М.:Металлургия, 1983.-352 с.
- 5.Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н. и др. Современные технологии авиастроения. - М.: Машиностроение, 1999. - 832 с.
6. Злотин Б.Л., Зусман А.В. Решение исследовательских задач. - Кишинев: МНТЦ «Прогресс», 1991. -204 с.
7. Ершов В. И., Патраков Н. Н., Курицына В. В. Методология научных экспериментальных исследований в производстве аэрокосмической техники: Учебное пособие. — М.: «МАТИ»—РГТУ им. К.Э.Циолковского, 2003. С. 196.
8. Ершов В.И., Чумадин А.С. Математическое моделирование процессов осесимметричного деформирования листовой штамповки: Учебное пособие.-М.: МФТИ, 1988, С.147 .
9. Недайвода А.К. Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. -М.: Машиностроение, 1998. - 240 с.
10. Плотников А.Н. Статистическое моделирование и системный анализ технологических процессов: Учебное пособие.-Самара: Изд-во СГАУ, 2008.- 155с.



11. Поиск новых идей: от озарения к технологии (Теория и практика решения изобретательских задач)/ Г. С.Алыпшуллер, Б.Л.Злотин, А.В.Зусман, В.И.Фипатов, -Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1989. -81 с.
12. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. — М.: Наука, 1965. С. 386.
13. Чистяков В. В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. — М: Машиностроение. 1990. С. 224.
14. ШенкХ. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972. С. 384.

Контрольные вопросы по главам

ГЛАВА 1

1. На какие этапы методически разделяется исследование операций? методически можно разделить на следующие этапы:
2. На какие группы можно разделить методы математического программирования?
3. Какие бывают эксперименты?
4. Что необходимо для проведения эксперимента?
5. Что такое методика экспериментальных исследований ?
6. Что называется стратегией поиска ?
7. Какие задачи называются детерминированными, стохастическими?
8. Какие стратегии относятся к пассивным, к последовательным?
9. Что можно исследовать применительно к вопросам формоизменения в производстве летательных аппаратов посредством моделирования?
10. На какие комплексы применительно к изучаемым проблемам разбиваются методы экспериментальных исследований?
11. Что относится к комплексу металловедческих экспериментальных исследований?
12. Что относится к комплексу экспериментального изучения механических свойств материалов?
13. На какие основные группы применительно к процессам формоизменения подразделяются современные экспериментальные исследования в области механики материалов?
14. Что относится к комплексу исследований по обоснованию фундаментальных основ прикладной теории пластичности?

ГЛАВА 2

1. Что входит в задачу поисковых опытов?

2. Как определяется количество частных методик для проведения поисковых опытов ?
3. С какой целью в экспериментальных исследованиях используют метод сетевого планирования?

### ГЛАВА 3.

1. В чем заключается метод искаженных сеток?
2. На каких принципах построена обработка сеток?
3. В чем заключается метод визиопластичности?
4. На чем основаны методы муарэфекта и фотоупругих покрытий?
5. Назовите разновидности метода муарэфекта.
6. В чем заключаются методы вдавливания индентора?
7. Какая зависимость называется корреляционной ?
8. Какие задачи решает корреляционный анализ?
9. Что используется для измерения тесноты зависимости?

### ГЛАВА 4

1. Какими путями для получения выборочных оценок и коэффициентов уравнения регрессии организуют проведение эксперимента?
2. Какие преимущества имеют активные эксперименты:
3. Что значит спланировать эксперимент ?
4. Что такое отклик? Каким требованиям должны отвечать отклики?
5. Какие могут быть факторы технологического процесса?
6. Из каких обязательных этапов состоит планирование, проведение и обработка результатов ПФЭ?
7. Какие способы используются в качестве графической интерпретации результатов экспериментальных исследований?

### ГЛАВА 5

1. Какие случаи могут возникнуть в результате теоретико

2. В чем заключается внедрение научных исследований?  
экспериментального анализа
3. Из каких этапов состоит процесс внедрения научных исследований?
4. Что понимается под экономической эффективностью научных исследований в целом?
5. Что относится к основным видам эффективности научных исследований?
6. От каких затрат зависит экономический эффект от внедрения