

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)**

Методология выбора материалов и технологий в машиностроении и приборостроении

Конспект лекций

Ростов-на-Дону
2021

Введение

Создание новых машин, отвечающих современным требованиям, наряду с соответствующей конструктивной проработкой определяется выбором материала и технологии изготовления. Выбор материала в значительной степени влияет на повышение качества и надежности машин, устройств и механизмов (далее изделий), их материалоемкость, энергопотребление и себестоимость; в ряде случаев от наличия материалов зависит возможность осуществления технических решений.

Казалось бы, это не новые задачи, но дело в том, что прежде решение таких задач осуществлялось на основе опыта, качественных сопоставлений, а иногда и интуиции. В современном же машиностроительном производстве из-за усложнения изделий и увеличения номенклатуры применяемых материалов такой подход недостаточен. Необходимо получение количественных оценок, базирующихся на моделировании функционирования изделий в реальных условиях эксплуатации. Особо важное значение в этом плане приобрело математическое моделирование в сочетании с системным рассмотрением задач выбора материалов и технологий обработки соответствующих деталей.

Таким образом, **целью курса является обоснование подходов и изложение методологии решения задач оптимизации выбора материалов и технологий, формирующих свойства изготавливаемых из них изделий (далее – упрочняющие технологии), на основе сочетания традиционных для материаловедения методов качественного анализа с методами математической статистики, теории надежности и исследования операций.**

Достижение данной цели достигается путем реализации последовательности переходов от изделия и специфики его работы к материалу, способному обеспечить его успешную эксплуатацию. Такая последовательность включает:

- порядок разработки изделий с выявлением возникающих материаловедческих задач;
- обоснование требований, предъявляемых к изделиям и деталям по качеству материалов;
- статистическая характеристика свойств материалов;
- материаловедческие основы выбора с классификацией материалов по применению и их краткой характеристикой;
- сравнительная оценка предварительно выбранных материалов;
- оптимизация выбора материала математическим моделированием работы детали (для ответственных и дорогих объектов);
- оптимизация (уточнение) технологии упрочняющей обработки выбранного материала по себестоимости возможных вариантов ее осуществления;
- оптимизация выбора систем и методов контроля.

1.Порядок разработки изделий с выявлением возникающих материаловедческих задач

Изделиями считаются результаты работы, оцениваемые количественно в виде дискретной величины (экземпляры, штуки и др.). Процесс создания изделия имеет важное значение для обеспечения его качества. Именно в это время закладываются основные показатели качества изделия, осуществляется выбор материалов и технологий упрочняющей обработки.

Порядок разработки и постановки изделия на производство регламентируется ГОСТ 15001-88, который определяют обязанности заказчиков, разработчиков и изготовителей в процессе создания изделий; в нем же установлена последовательность оценки качества разрабатываемого изделия с определением свойств материалов.

Разработка изделия обычно проводится в две стадии: проектирование и испытание (опытная отработка).

Проектирование включает:

- обоснование технического задания – документа, устанавливающего основное назначение, технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемому изделию;
- разработку технического предложения – совокупности технических решений на основе анализа технического задания, в которых обосновывается технико-экономическая целесообразность создания изделия и содержится сравнительная оценка разрабатываемого и существующих изделий;

Разработку эскизного проекта – комплекса конструкторских решений, дающих общее представление об устройстве, принципе работы, основных параметрах разрабатываемого изделия;

- разработку технического проекта – комплекта конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения и полностью определяющих устройство разрабатываемого изделия;
- подготовку рабочей документации – комплекта исполнительских конструкторских документов, необходимых для изготовления изделия в условиях производства.

Опытная отработка включает автономные испытания основных элементов изделий и комплексные испытания группы элементов или всего изделия. Испытания производятся на физических моделях либо на опытных (натурных) образцах, причем для их проведения могут создаваться специальные стенды или же они проводятся в реальных условиях эксплуатации. Основная задача этого этапа – качественная проверка работоспособности объекта и оценка работоспособности его основных узлов, а также изделия в целом.

В соответствии с ГОСТ 16504 – 81 испытания подразделяются на предварительные (заводские) и приемочные (ведомственные, межведомственные и государственные). По результатам предварительных испытаний решается вопрос о необходимости доработки изделия или же возможности допуска его к приемочным испытаниям. В ходе приемочных испытаний окончательно определяется соответствие разрабатываемого изделия требованиям технического задания и стандартов, оценивается возможность постановки его на производ-

ство. При решении вопроса о постановке изделия на производство определяется и объем необходимых доработок.

Таким образом, процедура разработки изделия представляет собой систему с рядом иерархических уровней. Соответственно по каждому из них по мере необходимости проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и испытания.

Проведение всех этих работ нуждается в соответствующем материаловедческом обеспечении. Его конечной целью является обоснование выбора материалов с оптимизацией конструкций по каким-либо критериям, а также технологии их обработки, формирующей свойства всех деталей. Соответственно указанным уровням иерархии при этом непрерывно проводятся необходимые научно-исследовательские работы, разрабатываются математические модели оценки свойств в условиях эксплуатации, проводятся лабораторные исследования и стендовые испытания. В ходе опытной отработки изделия определяются виды испытаний, фиксируется поведение материалов в деталях, в том числе в условиях реальной эксплуатации (в пределах установленных сроков службы).

При постановке изделия на производство уточняется технология упрочняющей обработки с учетом конкретных условий, оценивается возможность унификации и уменьшения количества применяемых марок материалов, определяются режимы работы оборудования и завершается отработка нормативно-технической документации на используемые материалы.

В процессе производства изделий также проводятся испытания по проверке качества. Эти испытания являются контрольными. Применительно к серийному и массовому производству они подразделяются на приемосдаточные и периодические. По результатам первых осуществляется сдача (приемка) штатной продукции; целью вторых является подтверждение стабильности показателей качества в процессе производства.

На стадии производства изделия материаловедческое обеспечение, помимо осуществления соответствующих технологических операций, включает в себя обоснование видов испытаний с учетом специфики работы материала в деталях, методов проведения испытаний и соответствующих количественных нормативов.

2. Обоснование требований, предъявляемых к изделиям и деталям по качеству материалов

Под качеством изделий понимается совокупность свойств, обуславливающих пригодность изделия удовлетворить определенные потребности в соответствии с их назначением (ГОСТ 1567 – 79).

Показатели качества могут быть единичными (относятся к одному из свойств) и комплексными (относятся к нескольким свойствам). К изделиям в целом могут применяться и интегральные показатели качества (комплексные показатели, отражающие соотношение эффективности использования изделия и затрат на его создание и эксплуатацию). Номенклатура показателей качества зависит от назначения изделий.

При производстве изделий машиностроения требования по качеству предъявляются и контролируются на стадиях исследования и проектирования, изготовления и эксплуатации (совокупность всех фаз существования изделия от времени его изготовления до прекращения использования или списания). Все многообразие эксплуатационных режимов в основном сводится к следующим.

1. Рабочий режим – непосредственное использование по назначению; изделие подвергается воздействию рабочих нагрузок, обусловливаемых внутренними факторами.
2. Хранение – перерыв в использовании по назначению; изделие подвергается воздействию внешних факторов, в основном климатическим.
3. Транспортирование – перемещение изделия; на изделие воздействуют в основном внешние факторы (вибрации, удары), Для дорожных машин – это рабочий режим.

При формировании требований к изделию надо ориентироваться не только на рабочий но и на другие режимы. Кроме того, следует учитывать опыт эксплуатации изделий-аналогов, в частности характер имевших место неисправностей и отказов.

Требования к изделию формулируются как потребителем, так и разработчиком на основе конъюнктуры рынка. Они излагаются в техническом задании. Важнейшим показателем является надежность изделия.

Заданные на изделие количественные характеристики надежности в ходе проектирования распределяются между элементами изделия. На основе соответствующих расчетов затем определяются требуемые показатели качества применительно к деталям. Эта работа выполняется конструктором при участии материаловеда, который оценивает принципиальную возможность обеспечения предполагаемого качества деталей, их технологичность и возможные виды упрочняющей обработки.

Отработка требований к деталям обычно включает:

- определение характера нагружения (статическое, динамическое, знакопеременное) и схемы напряженно-деформированного состояния;
- определение действующих нагрузок (перегрузок) и напряжений, способных вызывать разрушение деталей (или затупление инструмента);
- определение возникающих деформаций и оценку их допустимых значений;
- оценку возможности и степени нагрева детали при эксплуатации, обоснование допустимой величины снижения прочности (режущей способности для инструмента), ползучести, необходимой длительной прочности;
- оценку возможности охрупчивания металла в условиях эксплуатации изделия и определение требуемого значения вязкости, порог хладноломкости;
- оценку характера знакопеременных нагрузок и необходимость обеспечения определенного уровня сопротивления усталостному разрушению;
- оценку наличия истирающих нагрузок и необходимость обеспечения определенного уровня износостойкости;

- оценку возможности и характера агрессивных воздействий рабочей (внешней) среды и необходимость обеспечения коррозионной стойкости, сопротивления старению;

- оценку возможности появления каких-либо физических воздействий и обеспечения определенного уровня теплозащиты и электропроводности, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, коэффициента теплового расширения.

Соответственно всем этим направлениям с учетом характера дефектов при производстве и отказов при эксплуатации изделий-аналогов должны быть установлены количественные характеристики свойств, предъявляемых к материалу и гарантирующих такое качество детали, которое обеспечит получение требуемой надежности изделия.

Требования по качеству деталей должны выбираться по возможности из числа характеристик, получаемых при стандартных испытаниях материалов. В случае же отсутствия уверенности в их достаточно строгой корреляции с работой детали в изделии устанавливаемые требования считаются предварительными и уточняются при разработке изделия по результатам испытаний.

3. Статистическая характеристика свойств материалов.

При измерении любой физической величины обычно пользуются приборами, с которых снимают показания, а по снятым показаниям вычисляются искомые значения. При этом получается не истинное, а лишь приближенное значение. Это объясняется как принципиально ограниченной возможностью точности измерения, так и природой измеряемых объектов. Применительно к материалам последняя определяется большим количеством производственных процессов, подверженных воздействию целого ряда факторов, влияние которых невозможно полностью оценить. Тем не менее получаемая система повторяющихся значений обладает характерными свойствами и подчиняется определенным статистическим закономерностям. С помощью получаемых при этом величин (статистик) решаются следующие задачи:

- описание данных, полученных по результатам наблюдения (выборка);
- оценка параметров совокупности, из которой взята выборка;
- сравнение и сопоставление выборок, а по ним – и соответствующих совокупностей;
- установление связей (зависимостей) между изучаемыми величинами (параметрами).

3.1. Элементы математической статистики.

Экспериментальное определение любых свойств материалов сопровождается разбросом получаемых значений. **Величина, которая при данных неизменных условиях эксперимента принимает различные значения, называется случайной, а ее конкретные значения – реализациями.**

Случайная величина характеризуется областью возможных значений, которые она может принимать в результате опыта, и вероятностью получения этих значений. Различают дискретные и непрерывные случайные величины. **Дискретная случайная величина** может принимать отдельные **изолированные** возможные значения из некоторой конечной или бесконечной области (последовательность значений, не заполняющих сплошь никакой интервал).

Большинство свойств материалов и технологических процессов характеризуются **непрерывными случайными величинами**, возможные значения которых образуют некоторый **интервал**. Поэтому рассматриваются непрерывные случайные величины.

Для описания случайной величины необходимо знание вероятности принятия ею различных значений. Зависимость между возможными значениями этой величины и соответствующими вероятностями называется законом распределения.

Наиболее важной характеристикой случайной величины является интегральная функция $F(x)$, которая называется функцией распределения. Она характеризует вероятность появления значений случайной величины X , непревосходящих значения x .

$$F(x) = P(X \leq x).$$

Графическое изображение функции распределения показано на рис. 1.а. Ясно, что значение функции распределения находится в интервале $0 < F(x) \leq 1$, а вероятность нахождения случайной величины X в интервале $x < X \leq x$ будет

$$P(x < X \leq x) = F(x) - F(x).$$

Функция распределения является исчерпывающей характеристикой случайной величины. Однако по ней трудно судить о характере распределения величины в окрестности точек вблизи числовой оси. Более наглядное представление о характере распределения непрерывной случайной величины дает дифференциальная функция, которая называется плотностью распределения вероятностей $f(x)$; при этом

$$f(x) = F'(x).$$

Ее графическое изображение представлено на рис. 1.б. Очевидно, что

Вероятность попадания значения случайной величины в интервалах в этом случае будет

Таким образом, знание закона распределения случайной величины в виде функции распределения или плотности распределения позволяет оценивать вероятности попадания их значений в определенный интервал.

Наряду с указанными характеристиками случайных величин существуют числовые характеристики, которые в сжатой форме выражают наиболее существенные особенности распределения; их использование возможно и при неизвестном законе распределения. Основными такими характеристиками являются **математическое ожидание** и **дисперсия** или связанное с ней **среднее квадратическое отклонение**.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины (среднее значение случайной величины) определяется выражением:

$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

По результатам n реализаций случайной величины x_1, x_2, \dots, x_n (вариационный ряд) может быть найдено приблизительное значение математического ожидания, которое является его выборочной оценкой, тем более точной, чем больше число наблюдений

$$M(X) = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

Дисперсия показывает, насколько тесно сгруппированы реализации (рассеяние); это математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины с функцией плотности $f(x)$ от ее математического ожидания:

$$D(X) = M(X^2) - [M(X)]^2.$$

На практике часто пользуются средним квадратическим отклонением

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}.$$

Напомним некоторые неочевидные свойства математического ожидания и дисперсии:

- постоянный множитель C выносится за знак следующим образом

$$M(CX) = CM(X),$$

$$D(CX) = C^2 D(X)$$

- дисперсия суммы и дисперсия разности равна сумме дисперсий

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y),$$

$$D(X-Y) = D(X) + D(Y);$$

- дисперсия среднего квадратичного n независимых случайных величин в n раз меньше дисперсии каждой из величин

$$D(\bar{X}) = \frac{D}{n}.$$

3.2. Законы распределения непрерывных случайных величин

При оценке свойств материалов используются нормальное (Гауссово), логарифмически нормальное и усеченное нормальное распределения, т.к. именно они описывают большинство явлений, связанных с измерениями.

О порядке проведения работ по выбору материалов и упрочняющих технологий.

В следующих разделах будет дана характеристика сущности работы по выбору материалов и упрочняющих технологий. Содержательный же перечень таких работ будет определяться конкретными условиями ее проведения. Вместе с тем представляется полезным дать общие рекомендации по проведению таких работ, имея в виду, что необходимость и глубина соответствующих обоснований на разных этапах в каждом конкретном случае будет определяться с учетом специфики и условий эксплуатации изделия (детали).

Ниже приводится рекомендуемый перечень и последовательность работ по выбору материалов и упрочняющих технологий

ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА.

1.Обоснование требований к деталям (материалам) с учетом условий их работы в разрабатываемом изделии.

2.Систематизация и анализ дефектов (отказов), выявленных при эксплуатации изделий-аналогов и корректировка соответствующих требований.

РАБОТА ПО ОБОСНОВАНИЮ (ОПТИМИЗАЦИИ) ВЫБОРА МАТЕРИАЛА.

1. Определение класса и подкласса материалов соответственно назначению детали (изделия при одновременном учете предъявляемых требований.

2. Выбор группы (подгруппы) материалов с учетом характера напряженного состояния детали при ее работе в изделии в условиях эксплуатации.

3. Формирование перечня марок материалов в рамках выбранных групп (подгрупп), удовлетворяющих предъявляемым требованиям с учетом потенциальных возможностей улучшения свойств упрочняющей обработкой.

4.Проведение сравнительной оценки материалов, входящих в подготовительный перечень по:

- определяющим физико-механическим свойствам;
- массопотреблению (массоёмкости);
- стоимости;
- технологичности (обрабатываемость резанием и давлением);
- дефицитности исходных продуктов и составляющих компонентов;
- возможности устранения (локализации) дефектов, выявленных при эксплуатации изделий-аналогов.

5. Оптимизация выбора материала математическим моделированием работы детали (для ответственных и дорогих объектов).

6. Оптимизация (уточнение) технологии упрочняющей обработки выбранного материала по себестоимости возможных вариантов ее осуществления.

7. Оптимизация выбора и размещения оборудования, необходимого для проведения упрочняющей обработки.

Выбор методов и оптимизация системы контроля качества материала детали (изделия) в процессе производства.

Лекция 2.

1. ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1. Выбор стали для деталей машин

Следствием неправильного выбора материалов является плохое качество конструкций, машин и оборудования. Нередко эти условия являются очень специфичными: низкие или высокие температуры, агрессивные химические среды, знакопеременные циклические нагрузки, особые условия трения и др. Часто материалы работают в условиях одновременного воздействия перечисленных выше факторов. Поэтому при выборе материала в первую очередь требуется всестороннее рассмотреть условия его работы и ранжировать факторы, воздействующие на материал, по степени их влияния на надежность машины или механизма.

Определяющие факторы должны быть учтены обязательно, менее определяющие - по возможности. Так, например, при выборе сталей и сплавов для газовых турбинных двигателей и сопел ракет, работающих в условиях воздействия активных газовых сред, следует рассматривать влияние на свойства материалов высоких температур, коррозионного растрескивания, питтинговой и щелевой коррозии, коррозии под напряжением, водородного охрупчивания, эрозии и общей коррозии. Однако обязательно следует учитывать влияние только первых шести факторов, а общую коррозию как менее важный фактор учитывают по возможности.

Определение перечня параметров является наиболее важным этапом при выборе стали. Для этого удобно представить процесс в виде *граф-дерева* с его свойствами, расположенными на различных уровнях (рисунок 1).

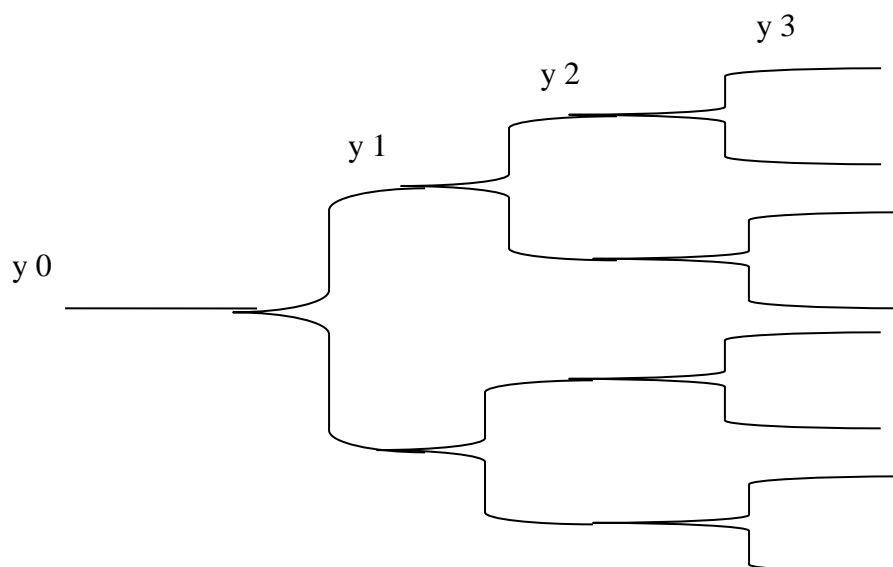


Рисунок 1 Построение граф-дерева.

Пусть на нулевом уровне находится интегральное свойство, характеризующее объект в целом. Далее дерево постепенно разветвляется, образуя первый, второй, третий и т.д. уровни. Число таких уровней не ограничено. Однако строя такое разветвление желательно доходить до такого уровня рассмотрения, на котором находятся простые, не разлагаемые на другие, наименее общие свойства. Такое построение логической структуры свойств стали ускоряет выбор перечня свойств.

В перечне параметров для каждого параметра необходимо указать его абсолютное значение или интервал возможного его изменения. Эти данные являются оценочными для выбора стали из ряда. При этом часто используют наиболее часто метод расстановки приоритета. Сравнивая между собой параметры эксперт определяет отношение между ними (больше, меньше, равно) с присвоением коэффициентов, составляет матрицу и определяет параметры. После выполнения таких действий находят сталь, совпадающую по свойствам с установленными теоретическим путем параметрами. Поиск выполняют по соответствующей таблице с главным определяющим признаком (прочности, теплостойкости, изностойкости, ударной вязкости, и др.).

С учетом этих соображений порядок выбора пластмассы следующий:

I. Составление поискового образа стали для:

- составление графа дерева свойств изделия,
- составление параметрического ряда и определение значения параметров,
- определение веса параметров с использованием метода расстановки приоритетов,
- установление порога совпадения поисковых параметров;

II. Порядок выбора:

- выбор материала по поисковым параметрам, начиная с наиболее ценного, методом последовательного приближения,
- при наличии нескольких равноценных марок материала сопоставление и выбор лучшей с помощью обобщенного показателя или по результатам опробования.

Следующим этапом выбора материала должен быть процесс определения комплекса необходимых свойств стали, обеспечивающих надежную и долговечную работу конструкций, машин и оборудования в заданных условиях эксплуатации. Так как конструкционные материалы характеризуются механическими, физико-химическими и технологическими свойствами, то рассматривать необходимо всю гамму свойств, особенно если в конструкции должны работать разные материалы.

К сожалению, часто комплекс требуемых свойств материала, оформленных в виде технических требований или технических условий к материалу, составляется не на основе точного анализа и моделирования условий работы, а. на приблизительных качественных данных или на опыте предыдущей эксплуатации аналогичного или схожего изделия или конструкции. Однако более правильным является формирование технических требований к материалу на основании моделирования условий работы изделия в реальных условиях эксплуатации с использованием специальных стендов, на которых с помощью тензометрирования можно определять уровень локальных пиковых напряжений в изделии.

Физико-химические свойства

Физические свойства определяют поведение материалов в тепловых, гравитационных, электромагнитных и радиационных полях. Из важных физических

свойств можно выделить теплопроводность, плотность, коэффициент линейного расширения. Низкая теплопроводность уменьшает теплопритоки и придает материалу теплоизолирующие свойства, а высокая теплопроводность способствует снижению температурных градиентов в изделиях. Для летательных аппаратов большое значение имеет уменьшение массы конструкции, поэтому для них целесообразно использовать материалы с большой удельной прочностью, которая определяется отношением прочности материала к его плотности. В этом отношении более перспективны алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, а также композиционные материалы. Применение в соединениях деталей из различных материалов обуславливает необходимость учета их коэффициентов линейного расширения.

Под химическими свойствами понимают способность материалов вступать в химическое взаимодействие с другими веществами, сопротивляемость окислению, проникновению газов и химически активных веществ. Детали любого изделия должны быть совместимы с рабочей средой. Коррозия, коррозионная усталость, коррозия под напряжением, водородное охрупчивание и т. д. могут вызвать повреждения в металле и привести к хрупкому разрушению конструкции. Для криогенных конструкций важное значение имеет влияние химического взаимодействия: низкокипящих продуктов (жидкий кислород, водород и др.) со сплавами, из которых изготавливаются эти конструкции. Такие химически активные металлы, как титан и его сплавы, магниевые сплавы, алюминиевые сплавы, при ударном нагружении могут самопроизвольно загораться при контакте с жидким кислородом.

Механические свойства

Основой выбора материалов для создания надежной и работоспособной техники являются их механические свойства, в первую очередь, прочностные, которые характеризуют способность материалов сопротивляться деформации и разрушению под действием различного рода нагрузок, в разных средах и при различных температурных условиях.

Расчет конструкции на прочность производят по допустимым напряжениям $[\sigma]$, определяемым из условий прочности при статическом нагружении или долговечности при циклическом нагружении. При статическом нагружении допустимое напряжение равно отношению предельного для данного материала напряжения к коэффициенту безопасности, т.е. к коэффициенту запаса прочности n . Для пластичных материалов за предельное напряжение принимают предел текучести, для квазихрупких - временное сопротивление:

$$[\sigma] = \sigma_T / n_T \text{ или } [\sigma] = \sigma_B / n_B.$$

Значение коэффициента запаса прочности зависит от многих факторов: разброса характеристик прочности; присутствия в материале дефектов, допускаемых техническими условиями; степени схематизации расчетной процедуры и т. д.

Технологические свойства

При выборе материалов конструктор обязан учитывать не только механические, физические и химические, но и технологические свойства, а также воз-

возможности производства, где предполагается изготавливать проектируемое изделие.

Технологические свойства (литейные свойства у литейных сплавов; обрабатываемость давлением у деформируемых сплавов, обрабатываемость резанием, свариваемость) весьма важны и могут быть решающими при выборе материала для изготовления высококачественных изделий в производственных условиях. Например, нельзя изготовить литьем тонкостенные протяженные детали из сплава с низкой жидкотекучестью и плохой заполняемостью. Нельзя также изготавливать сварные конструкции из сталей с высоким содержанием углерода (высоким углеродным эквивалентом), так как в зоне сварного шва всегда будут образовываться сварные трещины. Все это надо предвидеть и соответственно учитывать при выборе материала для конкретного изделия.

В том случае, когда не имеется возможности использовать стенд для измерения рабочего напряжения, возникающего в изделии при его эксплуатации, следует использовать расчетные методы.

Выбор стали для изготовления той или другой детали машин и метод ее упрочнения определяются уровнем требуемой конструкционной прочности, технологичностью механической, термической и химико-термической обработки, объемом производства, дефицитностью, стоимостью материала и себестоимостью упрочняющей обработки.

При выборе стали и упрочняющей обработки исходят из общих требований, приведенных ниже.

Лекция 3.

1.1.1. Эксплуатационные требования

Сталь должна удовлетворять условиям работы в машине, т.е. обеспечивать заданную конструкционную прочность, что вначале определяется расчетными данными. Деталей, рассчитываемых на статическую прочность, сравнительно мало. Это детали с большим начальным натягом, детали котлов и сосудов высокого давления, диски компрессоров и турбин и некоторые детали с малым числом плавных нагружений (иногда проводится расчет на малоцикловую усталость). Многие детали машин работают в условиях, когда возникают напряжения переменные по времени. Расчеты сопротивления усталости этих деталей при стационарном нагружении ведут по пределу выносливости с учетом конструктивных и технологических факторов. По критерию жесткости (E -модуль упругости) рассчитывают станины, корпусные детали машин, станков, валы коробок передач, шпиндели станков и т.д. Однако какими бы точными не были расчеты, только по ним нельзя судить о надежности работы детали. Необходимы натурные испытания, т.е. испытания самих деталей как на специальных стендах, так и непосредственно в эксплуатации. Имея информацию о стойкости деталей, можно установить комплекс прочностных и других параметров, которые находятся в наибольшей корреляции с эксплуатационными свойствами деталей машин. При установлении этих параметров кроме стандартных механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , КСЧ) с учетом прокаливаемости

стали должны учитываться: работа распространения трещины КСТ, трещиностойкость K_{1C} , предел выносливости σ_{-1} , σ_{-1K} , сопротивление контактной усталости, сопротивление износу и т.д.

Элементы машин и конструкций могут работать в экстремальных условиях, при низких или высоких температурах, испытывать большие динамические, статические и циклические перегрузки, воздействие агрессивных сред и т.д., приводящие к отказам деталей машин. При перегрузках в деталях из пластичных материалов возможна пластическая деформация (изгиб оси и валов, растяжение болтов, слияние посадочных поверхностей в крепежных деталях и т.д.) или вязкое разрушение. При длительной эксплуатации при высоких температурах за счет ползучести нередко наблюдаются недопустимые деформации. Ползучесть материала лопаток и дисков турбин, паропроводов и других деталей ограничивает срок их службы.

В соответствии со статистическими данными деформация и вязкое разрушение являются причиной 15-20% всех отказов. Образование хрупких трещин чаще всего происходит при низких температурах эксплуатации, наличии исходных дефектов типа трещин, повышенных остаточных напряжений, возникновении статических и динамических перегрузок, а также при увеличении размеров начальных дефектов под воздействием циклических эксплуатационных нагрузок и коррозии. Хрупкое разрушение судов, мостов, кранов и дорожных машин обычно начинается в зонах концентрации напряжений и происходит после некоторой наработки. Это говорит о роли накопления эксплуатационных повреждений и увеличения вероятности одновременного сочетания факторов, способствующих снижению сопротивления хрупкому разрушению.

Повышение сопротивления деталей машин (конструкции) хрупкому разрушению не может быть достигнуто повышением запасов статической прочности, т.е. снижением их номинальной напряженности и увеличением сечения. Это должно достигаться использованием более стойких к переходу в хрупкое состояние материалов, надлежащих конструктивных форм и технологии изготовления, повышением требований к дефектоскопическому контролю на стадии изготовления машин или конструкций для отбраковки некачественного металла или некачественно изготовленных деталей.

Следует отметить, что интенсивное изучение критериев надежности материалов началось с момента широкого применения в технике высокопрочных металлических материалов, характерной особенностью которых является склонность к хрупкому разрушению. Надежность работы конструкции во многом определяется сопротивлением материала распространению трещины, т.е. его вязкостью разрушения K_{1C} . Конструктивную прочность сплавов нередко оценивают с помощью так называемых диаграмм конструктивной прочности, построенных в координатах $K_{1C} - \sigma_{0.2}$. Повысить сопротивление хрупкому разрушению при сохранении высокой статической прочности можно измельчением зерна, ТМО, очисткой стали от вредных примесей, а также использованием мартенситно-старееющих сталей.

Для многих строительных и машиностроительных сталей ($\sigma_B < 1000 \text{ МПа}$) определение вязкости разрушения K_{IC} затруднено. Поэтому о сопротивлении хрупкому разрушению судят по температурному порогу хладноломкости t_{50} . Наиболее низкую конструктивную прочность имеют горячекатаные стали обыкновенного качества (Ст2, Ст3, Ст4 и др.) с ферритно-перлитной структурой. Чем больше в них содержание углерода, тем выше σ_T и t_{50} . Термическое упрочнение углеродистых сталей повышает σ_T и несколько снижает порог хладноломкости.

Низколегированные стали имеют более высокую конструктивную прочность в горячекатаном и нормализованном состояниях. После термической обработки низколегированных сталей возрастает σ_T , а t_{50} практически не меняется. Верхняя часть области НЛ относится к сталям с карбидным упрочнением (14Г2АФ, 15Г2СФ и др.), а нижняя к сталям 14Г2, 10Г2С1, 15ХСНД и др. Высокой конструктивной прочностью обладают низколегированные строительные стали после контролируемой прокатки. Машиностроительные легированные стали после закалки и низкого отпуска имеют высокую прочность σ_T , но склонны к хрупкому разрушению. Улучшение в зависимости от температуры отпуска и состава стали обеспечивает низкий порог хладноломкости при достаточной прочности σ_T . Наилучший комплекс механических свойств (σ_T , K_{IC} , t_{50}) легированные стали имеют после термомеханической обработки (ТМО).

Для изделий требующих высоких значений K_{CU} , K_{CT} , K_{IC} , низкого порога хладноломкости (работающих при низких температурах с высокими скоростями приложения нагрузки и при наличии концентраторов напряжения), следует применять мелкозернистые, спокойные стали, предпочтительно легированные никелем и молибденом.

Работоспособность зубчатых колес, валов, осей железнодорожных вагонов, коленчатых валов, штоков, рам, транспортных и грузоподъемных машин, сварных соединений и многих других деталей и конструкций определяет сопротивление усталости. Для оценки характеристик сопротивления усталости натуральных деталей проводят их усталостные испытания, чтобы определить предел выносливости детали σ_{-1} . Значение обычно в 2-6 раз меньше σ_{-1} определенного на образцах.

Концентрации напряжений возникают у галтели при переходе от одного сечения вала к другому, галтелей основания зуба шестерни, у дна канавки резьбы, шпоночного паза, около отверстий в деталях, у дна выточек и др. Поэтому большое значение для сопротивления усталости имеет оптимизация форм изделия с целью снижения концентрации напряжения. Для снижения концентраций напряжения необходимо предавать деталям плавные очертания, скруглять внутренние углы, применять разгрузочные канавки (отверстия), размещать источники концентрации напряжения в зонах малых номинальных напряжений или смещать максимум местных напряжений от различных источников.

Предел выносливости возрастает с увеличением σ_B и $\sigma_{0,2}$, однако, у высокопрочных сталей, обладающих высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, предел выносливости может быть пониженным. Снижается и

вязкость разрушения K_{IC} , а следовательно, и сопротивление росту усталостной трещины (живучесть). Это нужно учитывать, когда из соображения снижения массы конструкции выбирают сталь с высоким $\sigma_{0,2}$.

Компромиссное решение в данном случае заключается в том, чтобы при проектировании среди конкурирующих сталей выбрать сталь с наиболее низким $\sigma_{0,2}$. Это ведет к некоторому увеличению массы конструкции, но повышает предел выносливости, живучесть и сопротивление хрупкому разрушению. Возможно и применение более дорогих сталей, например мартенситно-старееющих или прошедших ТМО.

Наличие на поверхности напряжений сжатия затрудняет образование усталостных трещин, приводит к повышению предела выносливости и живучести. Для повышения предела выносливости и уменьшения влияния концентратора напряжения широко применяют закалку с индукционным нагревом, химико-термическую обработку, пластическую поверхностную деформацию и другие технологические процессы, упрочняющие поверхность и создающие на поверхности остаточные напряжения сжатия.

Большинство отказов деталей машин (до 80-90%) связано с различного рода изнашиванием вследствие потери точности, снижения КПД и повышения амплитуды переменных нагрузок, что вызывает усталостное разрушение.

Уменьшение износа достигается правильной конструкцией узлов трения (выбор вида трения в опорах, системы смазки, созданием устройств для очистки воздуха и смазочного масла и др.), применением износостойких материалов, упрочнением поверхностной закалкой, химико-термической обработкой, наплавкой износостойкими сплавами, нанесением на поверхность тонкого слоя нитридов или карбидов и др.

Такие детали, как подшипники качения, зубья колес, железнодорожные колеса и многие другие подвержены усталостному изнашиванию (контактной усталости). Контактная усталость тем выше, чем больше твердость. Отношение предела контактной выносливости σ_{K-1}^K при числе циклов нагружения $N = 10^7$ к твердости HRC поверхности является постоянной величиной.

$$\sigma_{K-1}^K = K \cdot HRC$$

где K - коэффициент, зависящий от твердости и вида термической обработки.

Например, ГОСТ 21354-87 для цементованных (нитроцементованных) сталей с твердостью 58-62 HRC принимает предел контактной выносливости равный 23 HRC. Однако опыт показывает, что при наличии дефектов диффузионного слоя (трооститной сетки, темной составляющей и др.) допустимые напряжения следует снизить на 20-25%.

Повышение предела контактной выносливости достигается упрочнением поверхности, повышением предела прочности материала, снижением нагрузки в зоне контакта, улучшением чистоты поверхности, а также повышением вязкости масла.

Перспективным, но еще недостаточно изученным методом повышения сопротивления износу является избирательный перенос при движении сочлененных

деталей машин. При избирательном переносе в зоне контакта образуется тонкая металлическая пленка, обладающая свойствами:

- 1) многократной деформации без разрушения;
- 2) регенерации массы, так как частицы износа вновь схватываются с изнашиваемой поверхностью;
- 3) неокисляемости.

Такая пленка обычно образуется на основе меди при трении стали по бронзе в восстановительных смазках (глицерин, спиртоглицериновые смеси, консистентные смазки типа ЦИАТИМ-201). В этом случае можно говорить о безизносных или малоизносных парах трения.

Для тяжелых нагруженных пар трения ("сталь по стали", "сталь по чугуну") "возбуждение" избирательного переноса достигается металлоплакированием при использовании смазочных материалов, содержащих порошки мягких металлов (Cu, Pb, Sn и др.) или нанесением медных (латунных, бронзовых) покрытий на поверхности пары трения.

Узлы трения являются самыми массовыми и наиболее повреждаемыми, поэтому повышение долговечности этих узлов не только увеличит долговечность машин, но и высвободит значительные сварные и прочие ресурсы.

В табл. 1 приведены примеры различных видов отказов (внезапных, постепенных, конструктивных, эксплуатационных) некоторых деталей машин и конструкций и пути их устранения.

Таблица 1

Виды и причины разрушения стальных деталей машин в процессе эксплуатации

Виды разрушения металла	Примеры деталей склонных к данному разрушению	Причина разрушения	Пути предупреждения дефекта
1	2	3	4
Деформация: искажение геометрической формы детали (изгиб, удлинение, вмятины и т.д.)	Напряженные болты тяги, рычаги, штанги, подшипники скольжения, поверхности катания бандажей, рельсов и др.	Длительное действие переменных контактных, растягивающих или сжимающих напряжений, повышение температуры	Использование материалов с высокими значениями σ_T и HRC
ползучесть	Лопатки, диски паровых и газовых турбин, трубы паропроводов, крепежные детали и др.	Напряжение выше предела ползучести при данной температуре и продолжительности работы	Снижение температуры (нагрузки) Применение более жаропрочной стали
Разрушение: вязкое	Несущие элементы мостовых ферм и др. пространственных конструкций, анкерные болты, валы, шатуны и др.	Значительные перегрузки вследствие нарушения условий эксплуатации	Соблюдение правил эксплуатации
хрупкое	Детали строительных	Эксплуатация при низ-	Применение сталей с

	и дорожных машин, кранов, судов, сварных конструкций и др.	ких температурах, наличие исходных дефектов (трещин), высокий порог хладноломкости стали, наличие концентраторов напряжений, статистическая динамическая нагрузки	низким порогом хладноломкости и высоким КСТ и K_{IC} , устранение концентраторов напряжений, соблюдение правил эксплуатации
усталостное	Валы, коленчатые валы, листовые рессоры, пружины, зубчатые колеса, шатуны и др.	Циклические напряжения, наличие концентраторов напряжений, работа в коррозионной среде, наличие на поверхности растягивающих напряжений	Улучшение конструкции детали; повышение качества поверхности ХТО, закалкой, ППД; замена стали
Изнашивание: абразивное	Рабочие органы экскаваторов, бульдозеров, гусеницы трактора, открытые зубчатые передачи, детали сх/машин и др.	Взаимодействие трущихся поверхностей с абразивными частицами	Наплавка износостойкими порошковыми сплавами: ПР-Н77Х18С3Р2 ПР-Н70Х17С4Р4 ПР-Н80Х13С2Р и др.
эрозия	Деталей гидронасосов, трубопроводы, плунжерные пары, сопла и лопатки реактивных двигателей, обшивки космических кораблей и т.д.	Воздействие потоков газов, жидкости, твердых частиц (в жидкостных или газовых потоках), космический потоков, раскаленных газов на поверхность изделия.	Замена стали
При схватывании 1-го рода	Подшипники скольжения, зубчатые колеса и др. детали	Интенсивная деформация, разрушение защитных пленок оксидов, отсутствие разделяющего слоя смазочного материала (выдавливание масляной пленки).	Повышение твердости стали, подбор материалов, не склонных к схватыванию, создание на поверхности неметаллических пленок, применение смазочных материалов с противозадирными присадками.
1	2	3	4
Изнашивание: при схватывании II-го рода	Детали поршневой группы, втулки, направляющие и др.	Недопустимое повышение температуры на поверхности трения, размягчение, деформация поверхностных слоев, контактирование ювелирных поверхностей	Применение теплоустойчивых материалов, добавление противозадирных присадок к смазочным материалам, охлаждение узлов трения, специальные покрытия

Окислительное	Подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, кулисы, поршневые кольца, втулки и др. детали работающие в условиях нормального износа	Длительное трение сопряженных поверхностей	Упрочнение поверхности, применением смазочного материала с износостойкими присадками, оптимизация приработки защита от абразива, оптимизация температурного режима
При фреттинг-коррозии	Болтовые и заклепочные соединения, посадочные поверхности подшипников качения, листовые рессоры, шестерни, муфты, детали, находящиеся в подвижном контакте	Непрерывное разрушение оксидной пленки в точках подвижного контакта	Увеличение жесткости соединения в площади контакта, использование материалов с высокой адгезией оксидных пленок, упрочнение улучшением, цементацией (нитроцементацией), азотированием, цианированием
усталостное	Зубчатые передачи, подшипники качения, рельсы, бандажи и др.	Пониженная контактная прочность материала, высокие контактные напряжения	Упрочнение поверхности ХТО, закалкой, повышение чистоты поверхности, уменьшение контактных напряжений, применение соответствующего смазочного материала

1.1.2. Технологические требования

Сталь должна удовлетворять требованиям минимальной трудоемкости изготовления детали. В частности, сталь должна обладать хорошей обрабатываемостью резанием и давлением, и поэтому особое значение приобретает выбор правильного режима предварительной термической обработки заготовок, который назначается с учетом последующих процессов упрочнения.

Предварительная термическая обработка осуществляется в заготовительных цехах и сводится к нормализации (углеродистые стали), нормализации и высокому отпуску при 600-670°C (легированные стали), отжигу, изотермическому или высокому отпуску на твердость 156-220 НВ.

1.1.3. Экономические требования

Материал должен быть возможно дешевле, с учетом всех затрат, включающих не только стоимость стали, но и изготовление деталей и наконец, их

эксплуатационную стойкость в машинах, в которых они должны работать. В первую очередь нужно стремиться выбрать менее дорогую сталь, углеродистую или низколегированную. Стоимость этих сталей невысока. Дорогие же легированные конструкционные стали, содержащие дефицитные Ni, Mo, W, и другие элементы, следует применять лишь в тех случаях, когда более дешевые стали не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к изделию. Легированные стали применяют, когда нужно обеспечить требуемую надежность и долговечность (низкий порог хладноломкости, высокую прокаливаемость, сопротивление усталости, износостойкость и др.), получение особых свойств (коррозионной стойкости, жаропрочности, магнитных свойств и т.д.), улучшение технологических свойств (обработки резанием, штампуемости и т.д.), а также снизить расход металла на единицу готовой продукции или повысить мощность машины. Применение легированной стали должно быть технически и экономически целесообразно и оправдано в том случае, если оно дает экономический эффект за счет повышения долговечности деталей и уменьшения расхода запасных частей и, таким образом, экономии металлопроката.

Эти общие требования к материалу нередко противоречивы. Так, например, более прочные материалы менее технологичны, труднее обрабатываются при резании, холодной объемной штамповке, сварке и т.д. Решение при выборе материала обычно компромиссно между указанными требованиями к стали. В массовом машиностроении предпочитают упрощение технологии и снижение трудоемкости в процессе изготовления детали, некоторой потере свойств или увеличению массы детали. В специальных отраслях машиностроения, где проблема прочности (или проблема удельной прочности) играет решающую роль, выбор материала и последующая технология термической обработки должны рассматриваться из условия достижения только максимальных эксплуатационных свойств. Вместе с тем не следует стремиться к излишне высокой долговечности деталей по отношению к долговечности самой машины.

При решении вопроса о выборе стали для получения требуемых механических свойств и других характеристик также важно установить оптимальный вид упрочняющей термической или химико-термической обработки. Вопросы выбора материала и технологии термической обработки следует рассматривать применительно к конкретным производственным условиям. Один и тот же процесс термической обработки в различных производственных условиях приводит к разным экономическим результатам. На экономичность технологических процессов влияют объем выпуска продукции, использование энергоресурсов, возможность создания или применения оборудования и другие организационно-экономические условия производства.

При выборе упрочняющей обработки, особенно в условиях массового производства, предпочтение следует отдавать наиболее экономичным и производительным технологическим процессам, например поверхностной закалке при поверхностном или глубинном индукционном нагреве, газовой цементации, нитроцементации и т.д.

Для проведения упрочняющей обработки на каждую деталь составляется технологическая карта с указанием марки стали, режима термической обработки, применяемого оборудования, приспособления, контроля качества и т.д.

Обычно рассматривается возможность применения нескольких марок стали и способов упрочнения. Это позволяет выбрать наиболее рациональный вариант, обеспечивающий наряду с высокими эксплуатационными свойствами детали хорошую технологичность при выполнении механической и термической обработки.

Для выбора и проектирования наиболее экономичных вариантов термической и химико-термической обработки в настоящее время широко используется компьютерное моделирование.

Лекция 4.

1.2. Примеры термической и химико-термической обработки деталей машин

В зависимости от условий работы деталей машин их упрочнение достигается закалкой и отпуском, поверхностной закалкой или химико-термической обработкой, чаще цементацией и нитроцементацией с последующей закалкой и низким отпуском, реже азотированием.

1.2.1. Объемная закалка и отпуск

Объемную закалку с последующим низким или высоким отпуском для получения требуемых механических свойств широко применяют в машиностроении. Например, в машиностроении 35-40% упрочняемых деталей подвергается объемной закалке и отпуску.

Получить высокую прочность у обычных машиностроительных сталей (до 0,5-0,6%С) можно путем объемной закалки и низкого отпуска. Однако повышение прочности (σ_b , σ_T) сопровождается уменьшением сопротивления хрупкому разрушению, о чем свидетельствует понижение KCU, KCT, K_{1C} и порога хладноломкости. Чем выше содержание в стали углерода, тем ниже вязкость разрушения K_{1C} сталей со структурой отпущенного мартенсита.

Низкому отпуску (180-220°C) подвергают детали машин (табл.3), требующих по условиям работы высокой твердости (58-62 HRC), сопротивления износу и контактными нагрузкам в условиях статического или циклического их действия. В этом случае для изготовления деталей машин используют высокоуглеродистые легированные стали.

Таблица3

Типовые детали машин, упрочняемые объемной закалкой и низким отпуском

ДЕТАЛИ		Рекомендуемая сталь	Твердость HRC
Условия работы	Наименование		
1	2	3	4
Высокое сопротивление износу и контактными	Детали подшипников: накладные направляющие качения металлор-	ШХ15, X15CG, ШХ15, 7XГ2BM	62-66 58-60

напряжениям. Стабильность формы и размеров при эксплуатации (температура отпуска 150-175°C)	ежущих станков и др. оборудования; ролики толкателей, ходовые винты пар качения металлорежущих станков и др.	ХВГ, 7ХГ2ВМ, ШХ15	58-60
Высокое сопротивление износу при трении скольжения. Стабильность формы и размеров при эксплуатации (температура отпуска 150-180°C)	Детали насосов: статоры, лопасти, клапаны, золотники плунжеры и др.	ШХ15, 30Х13, 40Х13. 30Х13Н7С2	58-60
	Детали кузнечно-прессового оборудования: детали кулачковых механизмов, кулачковые ролики, копиры, плунжеры, цанги, делительные диски, опоры и др.	У8А, У10А, ХВГ ШХ15, 9ХС	58-60
	Детали металлорежущих станков: направляющие втулки, накладные направляющие скольжения, втулки, упоры, кулачки, катки, копиры, червяки делительных пар и др.; винты передачи скольжения	ШХ15, ХВГ, 9ХС, ХВСТ ХВГ	58-60 54-58
Повышенное сопротивление износу, статическим, динамическим и циклическим нагрузкам (температура отпуска 180-240°C)	Крепежные детали: болты, шпильки, гайки	35, 45, 40Х, 35ХМ, 40ХФА, 30ХГСА, 50ХН	40-50
	Детали кузнечно-прессового оборудования: валы, цилиндры, штоки, оси, валики, кулаки, копиры, вилки, направляющие, червячные и кулачковые муфты, эксцентрики и др.	40ХН, 40ХН2МФ, 40ХН2МА	45-53
	шпиндели, гильзы, пиноли, червяки, втулки, толкатели, рейки, валы, оси, вилки, штоки, плунжеры, зубчатые колеса точных кинематических передач и др.	45, 40Х, 50Х, 50ХН, 40ХГТР	40-56

Низкому отпуску подвергают и некоторые детали машин из конструкционных сталей, содержащих 0,35-0,45% С и требующих высокой твердости 40-56 HRC (табл.3)

Для изготовления нагруженных болтов, баллонов высокого давления, некоторых деталей шасси самолета нашли применение высокопрочные ($\sigma_B = 1800-2000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1500-1700$ МПа, $\delta = 10-12$ %, $\psi = 45-50$ %) стали 40ХГСНЗВА, 35ХГС, 35Х2АФ, проходящие объемную закалку и отпуск при 200-250°C. Высокопрочные низкоотпущенные стали чувствительны к концентраторам напряжений, водородной хрупкости и анизотропии механических свойств. Для низкоотпущенных конструкционных сталей большое значение имеет чистота стали по неметаллическим включениям, газам и вредным примесям. Чем чище сталь, тем выше предел выносливости σ_{-1} и пластичность стали.

Низкому отпуску подвергают и низкоуглеродистые цементуемые (нитроцементуемые) стали, которые обеспечивают высокую конструкционную прочность, особенно если они мелкозернистые.

Объемной закалке с последующим отпуском при 420-500°C подвергают упругие элементы машин (табл.4), изготавливаемые из сталей 60, 60Г, 55С2, 65С2ВА, 50ХГФА и др. (ГОСТ 14959-79). Максимальные упругие свойства достигаются при сквозной прокаливаемости, поэтому марки стали подбирают по прокаливаемости.

Таблица 4

Стали и термическая обработка упругих элементов машин (типовые детали)

Детали	Рекомендуемая сталь	Требуемая твердость HRC
Пружинные шайбы, скобы, зажимы, тарельчатые пружины, стопорные кольца и др.	50, 55, 65, 65Г, 50С2	40-50
Пружины буксирных устройств, насосов карбюраторов, кузовов, прицепов, клапанов и др.	60, 65Г, 70Г, 55С2	38-48
Ответственные пружины на транспортных машинах (пружины сцепления, демпферов, рулевых тяг), навиваемые в холодном состоянии.	60С2ВА, 50ГФА	42-58
Рессорные листы легковых автомобилей, реактивные штанги	50ГФА (толщина полосы до 9мм)	40-46 388-444 НВ
Рессорные листы грузовых автомобилей.	50С2, 60С2, 60ХГС (толщина листа 6-18мм). 50ХГА (толщина листа 6мм)	38-46 363-444 НВ

Критический диаметр прокаливаемости для стали 50С2 составляет 12-16мм, а для стали 60С2, 60С2ХА и 60С2ФА при закалке в масле соответственно - 20, 45 и 80мм.

Подавляющее число деталей машин из среднеуглеродистых (0,3-0,5%С) конструкционных сталей подвергается закалке и высокому отпуску при 550-650 °С, который обеспечивает хорошую конструкционную прочность - высокие значения работы распространения трещины КСТ и вязкости разрушения K_{IC} при низком пороге хладноломкости (сталь 40ХМФ):

Температура отпуска, °С	400	520	600	620	650
σ_B , МПа	1550	1300	1200	1150	1000
t_{50} , °С	60	-40	-60	-70	-90

После улучшения стали обладают высокой живучестью (низкой скоростью роста трещины усталости) несмотря на ранее по времени образование трещины усталости.

После закалки и высокого отпуска предел выносливости повышается на 30-40%, долговечность - от 2 до 5 раз, предел контактной выносливости - на 20-50%, сопротивление фреттинг-коррозии - в 2-5 раз, и значительно возрастает вязкость разрушения K_{IC} . Однако после улучшения сталь чувствительна к концентраторам напряжений.

В табл.5 приведены типовые детали машин, упрочняемые закалкой и высоким отпуском, а также рекомендуемые стали. Для улучшаемых деталей твер-

дость и прочность колеблются в широких пределах в зависимости от температуры отпуска и состава стали ($207-350 \text{ НВ}$ и $\sigma_B = 700-1400 \text{ МПа}$).

Таблица 5

Типовые детали машин, упрочняемые объемной закалкой и высоким отпуском

Детали	Рекомендуемая сталь	Твердость НВ
1	2	3
Разные крепежные детали: пробки, гайки, упоры, болты, винты, штифты, втулки, вилки, крюки, стяжки и др.	35, 45	207-242 240-320 267-313 320-344
Валы карданные, шатуны, цапфы, фланцы, тяги, ступицы и др.	45.40X	207-241 255-302
Оси, валы, шестерни, плунжеры, штоки, диски паровых турбин, валы и роторы паровых турбин, выла, шестерни, работающие при малых скоростях и давлениях, оси, болты, шатуны в тяжелом машиностроении	45X	223-262 212-248 197-235 174-217
Оси, валики водяного насоса, шестерни распределительные, полумуфты, кулачки поворотные, сошки, валы, тяги поперечные, шатуны, ступицы и др. детали автомобиля	45, 35X, 45X, 40XH, 40XH2MA, 20XГТР	241-286
Нагруженные валы, штоки, рейки, шлицевые и гладкие валы, установочные винты металлорежущих станков	40X, 50X, 40XФА	212-293
Разного рода валы в кузнечно-прессовом оборудовании, штоки, поршни и др.	40XH, 40X, 50XH, 40XH2, 40XH2MA, 40XГТР	230-350
Валы, роторы и диски паровых турбин и компрессорных машин, валы экскаваторов, зубчатые колеса, оси, болты и др. особо ответственные тяжело нагруженные детали.	38XH3МФА, 36X2H2МФА, 34XH1М, 34XH3М	293-331 277-321 277-321 293-331
Сечение поковок до 800мм. Твердость тем ниже, чем больше сечение		

Стали с различным содержанием углерода и легирующих элементов после одинакового режима обработки отличаются друг от друга по механическим свойствам. Однако, если различные стали обработать на одинаковую прочность σ_B (твердость НВ), значения $\sigma_{0.2}$, δ , ψ и КСЧ оказываются близкими (рис.5, табл.5). Это положение справедливо для вязкого разрушения.

Если после улучшения $\sigma_B < 1200-1300 \text{ МПа}$, предел текучести может быть использован для расчетов деталей машин без опасения возникновения хрупкого разрушения. При $\sigma_B > 1500$ не удастся получить полностью вязкое разрушение и расчеты следует вести по КСТ и K_{IC} .

Как было указано ранее, оптимальное сочетание прочности и пластичности после улучшения достигается, если сечение изделия соответствует критическому диаметру (95% мартенсита) для данной стали.

Механические свойства стали в первую очередь определяются содержанием в ней углерода, от которого зависит и закаливаемость стали. Прокаливаемость определяется присутствием легирующих элементов.

Таблица 6

Механические свойства улучшенных сталей в зависимости от временного сопротивления (А.П.Гуляев)

σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
МПа		%	
700	500-600	20-30	65-75
900	700-800	18-22	62-73
1100	900-1000	15-18	55-62
1200	950-1100	13-16	50-57
1400	1050-1300	11-15	48-55

В условиях полной прокаливаемости механические свойства мало зависят от природы и степени легированности. Исключение составляют никель и молибден, повышающие сопротивление хрупкому разрушению. Однако не следует стремиться к применению сталей с излишне высокой прокаливаемостью, поскольку необходимое для этого высокое содержание легирующих элементов способствует росту склонности к хрупкому разрушению и ухудшает технологические свойства.

Глубокопрокаливающие легированные стали применяют для крупных деталей с большой толщиной стенки или большим диаметром. Если изделия работают на изгиб (кручение), напряжения по сечению распределяются неравномерно: на поверхности они максимальны, а в середине или центре равны нулю. Для такого рода изделий сквозная прокаливаемость не нужна. Например, сквозная прокаливаемость деталей станков необходима лишь в отдельных случаях.

Для надежного обеспечения ответственных деталей, работающих при эксплуатации в основном на изгиб и кручение, закаленный слой со структурой 95% мартенсита должен располагаться на глубине не менее 1/2 радиуса от поверхности.

Для деталей, работающих на растяжение (шатуны, торсионные валы, ответственные болты и др.), а также для рессор и пружин нужно обеспечить полную прокаливаемость по всему сечению (95% мартенсита в центре заготовки), т.е. равнопрочность по сечению.

Для большинства ответственных деталей машин из улучшаемых сталей твердость после закалки на расстоянии 1/2 радиуса от поверхности должна быть не менее 45 HRC. Для изделий, работающих на растяжение, оптимальная твердость должна быть в сердцевине. Детали сложной конфигурации для уменьшения их деформации в процессе закалки также следует изготавливать из легированных сталей, закаливаемых в масле или даже на воздухе.

При выборе стали следует учитывать, что легирующие элементы повышают устойчивость аустенита против отпуска, поэтому для получения требуемой прочности и твердости легированные стали при улучшении подвергают отпуску при более высокой температуре. Это позволяет не только более полно

снять закалочные напряжения, но и получить в стали лучшее сочетание прочности и вязкости.

На рис.7 приведена схема отжига и антифлокеной предварительной термической обработки крупных поковок из среднелегированных (20ХН, 40ХН, 40ХНМ и др.) и высоколегированных (34ХНЗМ, 38ХНЗМА, 18Х2Н4МА и др.) сталей, склонных к образованию флокенов. Продолжительность отжига поковок в зависимости от марки стали (флокеночувствительности) и размеров поковок составляет 200-1000ч.

1.2.2. Поверхностная закалка при индукционном нагреве

Поверхностную закалку применяют для деталей машин, испытывающих в работе изгиб, кручение и контактные напряжения, т.е. в тех случаях, когда рабочие напряжения максимальны на поверхности. Чаще закалка при индукционном нагреве применяется для валов, коленчатых валов мало- и средненагруженных зубчатых колес и многих других деталей машин.

Индукционная поверхностная и объемно-поверхностная закалка стали по оптимальным режимам и правильный выбор стали значительно повышают предел выносливости, предел контактной выносливости на 50-70%, долговечность в 2-5 раза и сопротивление фреттинг-коррозии в 2-5 раз. В местах обрыва закаленного слоя, не охватывающего концентраторы напряжений (галтели, выточки и др.), образуются остаточные растягивающие напряжения, снижающие долговечность). Эти места нужно упрочнять ППД.

Разработка методов поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве позволила использовать его комплексный способ упрочнения, одновременно повышающий сопротивление статическим и усталостным нагрузкам при изгибе при высоком уровне контактной усталости и сопротивления износу.

Поверхностная закалка при индукционном нагреве по сравнению с химико-термической обработкой менее трудоемка и во многих случаях не уступает цементации (нитроцементации).

Недостатком этого метода упрочнения является трудность его унификации. Для каждой детали конструкции индуктора, охлаждающих устройств и установок в целом разрабатываются отдельно. Поэтому применение для поверхностной закалки индукционного нагрева при единичном и мелкосерийном производстве должно быть технически и экономически обосновано с учетом как затрат непосредственно на термическую обработку, так и эффекта от повышения работоспособности изделий.

В табл. 6 приведены примеры использования поверхностной закалки при индукционном нагреве для упрочнения деталей металлорежущих станков и автомобилей. Некоторые шестерни заднего моста автомобиля (например, коническая ведомая и ведущая шестерни редукторов заднего моста) изготавливают из стали 55ПП и упрочняют поверхностной закалкой при глубинном индукционном нагреве (автомобили ГАЗ, ЗИЛ).

Таблица 7

Типовые детали машин, упрочняемые закалкой при индукционном нагреве

Детали	Рекомендуемая сталь	Толщина закаленного слоя	Твердость HRC	Примечание
1	2	3	4	5
Детали металлорежущих станков				
Валы	45, 40X, 50ХФА	1,0-1,6	48-56	-
Винты передач: винт – гайка качения	8ХФ	2-8	58-62	Толщина слоя зависит от шага резьбы
Шпиндели с опорами на подшипники качения	45	1,0-1,8	45-55	-
Кулачки, копиры	45, 40X	1,0-1,8	48-56	-
Средненапряженные ($\sigma_B = 250-450\text{МПа}$) зубчатые колеса	40X	2-3 (ниже впадины зуба)	48-54	Для колес с $m = 1-6\text{ мм}$
Детали автомобиля				
Коленчатый вал двигателей: бензиновых дизельных особонагруженных дизельных	45 50Г 50ХФА	2,6-6,5 3-4 3-4	52-62 52-62 52-56 52-56	- Предварительная нормализация Шатунные шейки Коренные шейки
Распределительный вал грузового автомобиля	45	2-3	58-62 46-52 56-62	Кулачки Шестерня Опорные шейки и эксцентрики
Червяки рулевого управления, втулка шатунов, ролики, колодки тормоза, ось коромысла клапана	45	1,0-2,5	56-60	-
Тонкие оси (штоки амортизаторов)	45	4	56-58	Закалка в вертикальном положении
Шаровые пальцы	55, 40X	5% диаметр на сторону	56	Контурная закалка сферы
Зубчатые муфты и венцы	50ХМ	1,5	58-62	Закалка зубьев
Крестовина карданного вала грузового автомобиля	58	1,5 (на галтели) 1,7-3,7	58-62 на концах шипов	-
Цилиндрические ведомые шестерни	58	1,0-2,5	58-63	Закалка зубчатого венца
Полуоси заднего моста грузового автомобиля	47ГТ	> 6 (по длине) > 4 (шлиц)	-	-
После закалки следует самоотпуск или отпуск с повторного нагрева при 200-250°C, который обеспечивает повышение прочности, мало снижает твердость и сохраняет остаточные напряжения сжатия на поверхности; твердость сердцевины 20-25 HRC.				

В зависимости от модуля колеса m рекомендуется применять стали 55ПП с критическим диаметром по прокаливаемости (в сердцевине заготовки полу-

мартенситная структура), равным 6,5-9,0 мм для $m = 3,5-5$; 9-13 мм для $m = 4,5-7$ и 13 мм и более для $m > 7$.

После закалки твердость на поверхности зуба 58-62 HRC, а в сердцевине 30-40 HRC. Толщина упрочненного слоя 1-2 мм. Сталь 55ПП после поверхностной закалки обладает высокой прочностью, а также достаточной вязкостью, поэтому она может быть рекомендована для колес с $m = 4-6$ мм, для которых контактные напряжения не очень велики. Применение стали 55ПП дает большой, экономический эффект вследствие перехода от длительных процессов химико-технической обработки к закалке при индукционном нагреве и замены легированных сталей.

В тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, если к зубчатым колесам не предъявляется высоких требований по износостойкости, их изготавливают из сталей 40, 45, 40X, 40XC и упрочняют закалкой с высоким отпуском и последующей поверхностной закалкой при индукционном нагреве на глубину 1,5-2,5 мм и твердость 54 HRC.

В станкостроении поверхностной закалке при индукционном нагреве подвергают только мало-средненагруженные зубчатые колеса чаще не переключаемые на ходу. Этот метод упрочнения часто используют для шестерен малых и средних размеров, работающих с колесами, подвергнутыми упрочнению, ввиду хорошей их взаимной прирабатываемости. Однако колеса для поверхностной закалки изготавливают из стали 40X и закалывают на глубину 0,2-0,25 m , но не более 1,4-1,8 мм. Закалка венца зубчатых колес ($d > 300$ мм и $m = 1-3$) проводится насквозь и при том глубже их впадины на 1,5-3,0 мм. Для обеспечения высокой износостойкости и прочности твердость на поверхности должна быть на уровне 48-52 HRC. При этом закалка должна быть контурной без перерыва этого упрочненного слоя.

В станкостроении чугунные (СЧ 20, СЧ 28) базовые детали, колонны (стойки) токарных станков-полуавтоматов, радиально-сверлильных и других станков подвергают закалке с индукционным нагревом на толщину упрочненного слоя 0,8-1,8 мм и твердость 48-50 HRC. Для изготовления коленчатых валов сложной формы с большими фланцами и отверстиями наряду со сталью применяют высокопрочные магниевые чугуны (ВЧ 50, ВЧ 60 и др.). Пониженная прочность чугунных валов компенсируется малой чувствительностью чугуна к концентраторам напряжений, в многоопорных валах меньшим смещением опор и снижением опасности резонансных колебаний благодаря повышенной демпфирующей способности.

Чугунные валы весьма разнообразны, начиная от небольших (для двигателей автомобилей ВАЗ, ГАЗ, ЗАЗ) до весьма крупных (массой до 700-1300 кг, длиной 2-3,5 м и диаметром 200-250 мм). Коленчатые валы отливают в оболочковые формы и шейки валов автомобильных двигателей упрочняют поверхностной закалкой при индукционном нагреве на твердость 47-52 HRC. После закалки валы подвергаются низкому отпуску при 180-200 °С 2-3 ч. Перед поверхностной закалкой валы проходят нормализацию с последующей сфероидизацией. Толщина упрочненного слоя 2-3 мм.

Таблица 8

Детали металлорежущих станков, упрочняемых цементацией

Детали	Рекомендуемая сталь	Толщина слоя, мм	Твердость HRC	Модуль m
Валы гладкие, ступенчатые, шлицевые, испытывающие циклические нагрузки при изгибе, кручении и контактных нагрузках.	20X, 18ХГТ	0,8-1,6	56-60	-
Шпиндели	18ХГТ, 12ХН3А	1,0-1,4	58-62	-
Червяки делительных пар и передач	18ХГТ, 12ХН3А	1,0-1,4	58-62	
Кулачки, копиры	20X, 18ХГТ	1,2-1,6	58-62	
Зубчатые колеса: особонапряженные ($\sigma_{изг} = 500-700\text{МПа}$) высоконапряженные ($\sigma_{изг} = 460-500\text{МПа}$) средненапряженные ($\sigma_{изг} = 250-450\text{МПа}$)	25ХГМ, 12ХН3А, 20ХН3А 20X, 18ХГТ, 20ХН3А 20X, 16ХГТ, 25ХГТ	0,12-0,2m 0,2-0,25m 0,2-0,25m 0,2-0,25m 0,2-0,25m 0,2-0,25m 0,2-0,25m	58-62	m=1,5-4 m=1,5-6 m=6-10 m=1,5-4 m=4-10 m=1,5-6 m=6-10

Цементация при 930°C, закалка в масле и отпуск при 170-180°C. Точные цементуемые детали (червяки делительных пар, накладные направляющие и другие детали длиной 1200мм) после цементации подвергают закалке в расплаве солей с температурой 160-180° С с добавлением воды 0,6-0,8% и отпуску при 180-200°C. Сталь 12ХН3А перед закалкой проходит отпуск при 640-660 °С. После чистовой механической обработки длинномерные детали проходят стабилизирующий отпуск при 160-180 °С 8-12ч. Твердость сердцевины 25-40 HRC.

Таблица 9

Детали трансмиссии и двигателя автомобиля, подвергаемые химико-термической обработке

Детали	Рекомендуемая сталь	Химико-термическая обработка	Толщина слоя, мм	Твердость HRC	
				поверхности	сердцевины
1	2	3	4	5	6
Мелкие детали силовых агрегатов (червяки, шестерни)	20	Нитроцементация	0,15-0,3	56-62	-
Шаровые пальцы	20	То же	0,5-0,7	56	-
Детали силовых агрегатов, работающие на износ (кольца, вкладыши, золотники и др.)	35 15X	-“-	0,5-0,7	56	-
		Цементация	0,3-0,5	56-62	-
		То же	0,7-0,9 0,9-1,3	56-62	
Детали главной передачи заднего моста грузовых автомобилей (шестерни ведомые и ведущие, шестерни полуоси)	25ХГТ	-“-	0,9-1,3	58-62	30-45
	30ХГТ	-“-	1,0-1,4	58-62	30-45
	25ХГНМ	-“-	1,0-1,4	58-62	30-45
	25ХГНМТ	-“-	1,5-1,8	58-62	30-45
	18ХГТ	-“-	1,2-1,6	58-62	30-45

	25ХГТ	-“-	1,0-1,4	58-62	30-45
Шестерни и валы коробки передач грузовых автомобилей	25ХГТ	Нитроцементация	0,5-0,8	57-60	35-45
	25ХГМ		0,5-0,8	57-60	35-45
Шестерни ведущих мостов легковых автомобилей	19ХГН	То же	0,8-1,1	59-64	32-45
Зубчатые колеса ведущих мостов легковых автомобилей	19ХГН	-“-	0,8-1,1	58-63	32-45
Шестерни ведущих мостов и раздаточных коробок грузовых автомобилей (модуль шестерен 5, 6, 10)	15ХГН2ТА	Цементация	1,2-1,5	-	-
	20ХГН2ТА 12Х2Н4А	То же	1,2-1,6	58-63	30-45
Детали насоса гидроусилителя руля (роторы и др.)	20ХГНТР	Нитроцементация	0,6-0,8	58-62	30-45
Детали рулевого управления грузовых автомобилей (вал сошки руля, винт рулевого направления)	20Х2Н4А	Цементация	1,2-1,4	56-62	30-45
	25ХГТ	То же	1,2-1,6	58-62	28-45
Примечание. Цементация при 920-940°С, подстуживание до 850°С, закалка в масле температурой 70°С и отпуск при 180°С. Нитроцементация при 860°С, закалка в масле температурой 180°С и отпуск при 180°С. Стали с высоким содержанием никеля проходят закалку с повторного нагрева.					

Стали и методы упрочнения зубчатых колес, применяемые в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, можно классифицировать по степени нагруженности этих деталей.

1. Мало- и средненагруженные зубчатые колеса (шестерни ведущие и ведомые коробки передач, шестерни главной передачи ведомые и др.) изготавливают из безникелевых (18ХГТ, 25ХГТ) и малоникелевых (20ХГНР, 20ХНР) сталей с упрочнением цементацией на толщину 1,2-1,8мм или нитроцементацией на толщину 0,8-1,2мм. Твердость на поверхности 56-65 HRC. Твердость сердцевины зубьев 25-40 HRC.

2. Тяжело нагруженные зубчатые колеса изготавливают из малоникелевых цементуемых (нитроцементуемых) сталей 20ХГНР, 20ХНР и хромоникелевой 20ХНЗА. При этом толщина упрочненного слоя и нормы его твердости остаются такими же, как и для малонагруженных зубчатых колес. Однако твердость сердцевины несколько выше - 30-45 HRC.

Цементацию применяют для подшипников массовых типов с наружным диаметром 40-150 мм и крупногабаритных подшипников диаметром до 2 м, испытывающих в процессе эксплуатации значительные ударные и контактные нагрузки. Наружные кольца с диаметром менее 60мм из стали 18ХГТ после холодной штамповки подвергают цементации при 960°С на толщину слоя 1,1-1,7 мм, а диаметром более 60мм на толщину 1,4-2 мм. После цементации следует закалка от 820°С в масле температурой 30-60°С и отпуск при 150-110°С 4-5 часов. Твердость цементованного слоя 60 HRC. Крупногабаритные подшипники изготавливают из стали 20Х2Н4А и цементируют при 580-600°С, нагреваются до 790-800°С с последующим охлаждением в масле и отпускаются при 160°С 7-12ч. Толщина слоя до 10мм и твердость 58-60HRC.

Для деталей, склонных к короблению (деформациям), работающих на износ и испытывающих небольшие контактные нагрузки, рекомендуется азотирование. Азотированию могут подвергаться практически все легированные стали.

Азотирование повышает износостойкость деталей машин в 5-10 раз, предел выносливости при изгибе на 30-60% и сопротивление коррозии. Твердость колеблется в широких пределах 650-1200 HV в зависимости от состава стали и режима обработки.

В станкостроении для повышения предела выносливости и износостойкости, а также сопротивления схватыванию наиболее нагруженные детали станков (например, шпиндели обрабатывающих центров) после улучшения подвергаются азотированию. Азотирование используют для поверхностного упрочнения гильз (30X3МФ и 38X2МЮА), массивных накладных направляющих (30X3МФ) валов, планок, ходовых винтов (16X3НВФМВ, 40ХН2МА), шпинделей для опор скольжения (38X2МЮА) и др.

Азотирование применяют и для мало- и средненагруженных колес сложной конфигурации, например, с внутренними зубьями, шлифование которых трудно осуществить. В этом случае зубчатые колеса изготавливают из стали 40Х (конические) или 40ХФА (цилиндрические). После азотирования на глубину 0,1-0,13 м (но не более 0,6 мм), в результате которого обеспечивается минимальная деформация, проводится только притирка или хонингование зубьев. Азотированные колеса при большом числе циклов нагружений не уступают по контактной прочности (сопротивлению выкрашиванию) цементованному (нитроцементованному), но вследствие малой толщины слоя для них должна быть меньше контактная нагрузка.

Широко применяется азотирование деталей топливной аппаратуры и клапанов дизельных двигателей, деталей турбин из высокохромистых сталей (20Х13, 30Х13, 40Х13), а также штоков клапанов паровых турбин, гильз цилиндров, игл форсунок, тарелок букс, распылителей, пальцев, плунжеров, шестерен из стали 38Х2МЮА.

Азотирование используют для упрочнения как крупных высоконагруженных коленчатых валов, например тепловозных двигателей (диаметром шейки 150-300 мм) из стали 18Х2Н4МА, 38ХНЗВА и 38ХНЗМА и других, так и небольших коленчатых валов из стали 45ХФ. После азотирования коленчатые валы обладают высокой износостойкостью и сопротивлением усталости при их незначительной деформации. Крупные коленчатые валы перед азотированием проходят сложную термическую обработку (предварительную нормализацию поковок с последующим высоким отпускком после механической обработки, улучшение и термическую стабилизацию). Крупные валы азотируют на толщину слоя 0,7-0,8 мм, валы меньшего размера азотируют после улучшения на толщину 0,35-0,4 мм. Твердость после азотирования 700-750 HV.

Азотированию на толщину слоя 0,7 мм подвергают и коленчатые валы тепловозов, отлитые из высокопрочного магниевого чугуна, для повышения

сопротивления износу и предела выносливости. Твердость на поверхности 40 HRC. После азотирования шейки валов шлифуют, а галтели полируют.

Лекция 5.

1.3 Металловедческие обоснования выбора сталей, сплавов и технологий упрочняющей обработки

Выбор сталей и сплавов, а также технологии упрочняющей обработки деталей основываются на предъявляемых к ним требованиях, которые формируются применительно к условиям эксплуатации изделия при одновременном учете показателей его надежности. При этом нельзя рассчитывать на однозначное и простое решение, так как наряду с требованиями технического плана необходимо учитывать особенности изготовления детали, экономию металла, условия эксплуатации изделия.

Выбор сталей и сплавов на основе металловедческих соображений является первым шагом в решении этой проблемной задачи. В связи с тем, что в металловедении еще не разработаны единые принципы выбора металлов, рекомендуется проведение этой работы по этапам.

Первый этап. Необходимо совместно с конструктором, прежде всего оптимизировать форму детали с позиций ее технологичности при термообработке; надо минимизировать деформации и остаточные напряжения, исключить образование трещин, сколов при термической обработке (не допускать резких переходов, углов, прорезей и пр.). Одновременно следует уточнить требования к детали и сформировать их по возможности в виде стандартных характеристик.

Второй этап. С учетом назначения изделий, условий работы детали и предъявляемых к ней требований следует определить класс металлических материалов. Так, если это силовая конструкция, детали машин, подвергающихся различным механическим воздействиям, то выбирается класс 1. Если же определяющим параметром предполагаемой детали является какое-либо из физических свойств - выбирается класс 2. Наконец, если металл предназначен для изготовления инструмента - класс 3.¹

Третий этап. С учетом условий работы, предъявляемых требований, данных расчета определяют характер нагружения, действующие напряжения и реализуемую деформацию (о модулях упругости сталей и сплавов) и на этой основе определяют подкласс материала.

Применительно к классу 1 это могут быть стали и сплавы различной прочности (подкласс 11 и 12), стали и сплавы с повышенной технологичностью (подкласс 13) или же стали и сплавы со специфическими свойствами - триботехнического назначения, с высокими упругими свойствами и, наконец, устойчивые к воздействию температуры рабочей и внешней среды (подклассы 14, 15 и 16 соответственно). Так, если детали машин, элементы конструкций подвергаются статическим или динамическим (циклическим) нагружениям, то для изготовления должны применяться какие-то из металлов подклассов 11 и 12. Если же та-

¹ (требуется воспользоваться блок-схемами приложения)

кие воздействия сопровождаются еще и нагревом или агрессивностью среды, то выбор должен производиться из металлов подкласса 16. В случае же, когда под влиянием механических воздействий допустимы лишь упругие деформации или же они носят поверхностный характер, металл выбирается из подклассов 15 и 14 соответственно. И наконец, когда механические воздействия на элементы конструкции и детали машин сравнительно невелики, а их размеры подчас определяются из конструктивных соображений, металл для их изготовления должен выбираться из подкласса 13.

Аналогичным образом поступают и при выборе подклассов применительно к классам 2 и 3. В этом случае само название подкласса однозначно определяет целесообразность ориентации на него при выборе нужного материала.

Четвертый этап. В рамках выбранного подкласса, а иногда и подклассов (например, 11 и 12) с учетом тех же исходных данных по нагрузкам и условиям работы требуемого комплекса физико-механических свойств выбирают группы и подгруппы. Их выбор должен увязываться с видом упрочняющей обработки. Выбор не будет, да и не должен быть однозначным.

Так, применительно к подклассам 11 и 12 при необходимости обеспечения минимальной массы детали могут быть выбраны группы 113 и 121, 123 и даже 122. Все эти металлы в принципе пригодны для решения поставленной задачи. Вместе с тем иногда учет специфики работы позволяет уменьшить количество выбранных групп. В данном случае, например, если помимо высокой прочности необходимо обеспечение коррозионной стойкости, то может оказаться целесообразным ограничиться группами 121 и 123.

Аналогичным образом и, как правило, с большей определенностью выбираются соответствующие группы металлов для изготовления деталей с особыми физическими свойствами и для изготовления инструментов.

Пятый этап. В рамках выбранных групп (подгрупп, если они есть) с учетом количественных требований по физико-механическим свойствам материала определяется перечень марок сталей и сплавов, удовлетворяющих указанным требованиям. При разработке такого перечня надо определиться и с видом упрочняющей обработки.

Ввиду специфики составления указанного перечня марок остановимся на этом подробнее применительно к каждому классу.

Формирование перечня марок конструкционных сталей и сплавов (класс 1)

Специфика формирования перечня марок стали этого класса обуславливается обширностью их ассортимента. Исходным является положение о необходимости обеспечения прочности детали (сопротивление пластической деформации), жесткости (сопротивление упругой деформации) и ее надежности в условиях эксплуатации с учетом заданного срока службы (сопротивление хрупкому разрушению, усталости, износу, коррозии и другим воздействиям).

Требующиеся для выбора марок перечня сведения об их свойствах можно брать из соответствующих ГОСТов. При этом надо иметь в виду, что металлургическая промышленность гарантирует поставку стали по механическим свойствам, химическому составу. На свойства же, указанные в ГОСТах, можно ори-

ентироваться, если при производстве детали на машиностроительном заводе металл не подвергается обработке, приводящей к изменению его структуры (пластическая и термическая обработка). В противном же случае надо находить дополнительную информацию, отражающую влияние указанных видов обработки; приводимые в ГОСТах механические свойства в этих случаях гарантируют лишь определенный уровень качества металла.

При выборе марок из числа конструкционных сталей наиболее характерны два следующих случая:

1) Использование сталей строительного назначения. Стали для строительных конструкций подразделяются по категориям прочности; при каждом уровне гарантируется предел прочности (числитель) и предел текучести (знаменатель); при уровне

С 380/230 - стали нормальной прочности, при С 460/330 и С 520/400 - стали повышенной прочности и при С 600/450, С 700/600, С 850/750 - стали высокой прочности. От значений указанных характеристик зависит сечение элементов конструкций, а следовательно, их масса.

При достаточности нормальной прочности применяются в основном углеродистые стали обыкновенного качества (см. подгруппу 1111) без термической обработки. Вместе с тем категорию прочности этих сталей можно повысить увеличением содержания углерода, при этом снижается пластичность. В последнее время для повышения категории прочности таких сталей рекомендуется их термоупрочнение, сущность которого состоит в получении низкотемпературных продуктов распада аустенита (более дисперсный перлит, иногда частично бейнит).

Повышение категории прочности строительных сталей без термообработки достигается чаще всего легированием марганцем и кремнием (твердорастворное упрочнение ферритной составляющей); к таким сталям относятся: например, О9Г2, О9Г2С, 17ГС и др. Вместе с тем они могут подвергаться ВТМО, что обеспечит повышение вязкости и снижение порога хладноломкости. Для уменьшения склонности к росту зерна в состав таких сталей вводятся карбидообразующие элементы, например, ниобий (10Г2Б).

Если же необходима еще более высокая категория прочности, надо переходить к применению стали с карбонитридным упрочнением (например, марка 16Г2АФ), а иногда прибегать к контролируемой прокатке (О9Г2ФБ). При необходимости значительного понижения порога хладноломкости наряду с термообработкой в состав таких сталей вводится никель.

2) Использование сталей для деталей машин, подвергающихся механическим воздействиям (подгруппа 1112 и группа 113). Применение углеродистых сталей в этом случае нередко ограничивается их малой прокаливаемостью.

Легирование машиностроительных сталей производится помимо повышения прокаливаемости, также для увеличения теплостойкости, жаростойкости, жаропрочности. Наиболее доступными легирующими элементами, повышающими прокаливаемость и частично теплостойкость, являются марганец, кремний, хром и ванадий; особенно эффективно в этом отношении комплексное легиро-

вание двумя-тремя и более элементами, включая и дефицитные элементы - никель, молибден, вольфрам. Так, критический диаметр прокаливаемости при закалике в воде у стали 40 равен 10, у стали 40X - 30, у стали 40ХН - 50, у стали 40ХНМ - 100 мм.

В случае опасности перегрева и роста зерна (при повышенном содержании марганца) в стали необходимо присутствие какого-либо сильного карбидообразующего элемента, чаще всего это титан (40ХГТ, 18ХГТ). При необходимости обеспечения высокой прокаливаемости и низкого порога хладноломкости используются стали с добавками никеля, причем для устранения отпускной хрупкости в них должен присутствовать и молибден (18Х2Н4МА, 40ХН2МА, 38ХНЗМФА).

Низкоуглеродистые стали выбираются применительно к поверхностному упрочнению деталей цементацией или нитроцементацией; комплекс требуемых механических свойств в сердцевине в этом случае обеспечивается закалкой с низким отпуском. Среднеуглеродистые стали выбираются в предположении проведения улучшающей термообработки (в азотируемых сталях такая обработка предусматривается в качестве предварительной). Повышением температуры отпуска от 200 °С до 650 °С предел текучести таких сталей при содержании углерода 0,2 % снижается с 1200 до 600 МПа; это означает, что варьированием температуры отпуска характеристики машиностроительных сталей можно повысить примерно в два раза.

Выбирая конструкционную сталь, следует позаботиться об обеспечении соответствующего запаса вязкости (ДТ), гарантирующего от случайного хрупкого разрушения. Обычно запас вязкости по порогу хладноломкости для ответственных деталей, испытывающих динамические нагрузки, принимается 60°С, для неответственных деталей, не испытывающих динамические нагружения, он берется 20°С, а для промежуточных случаев - 40°С.

К сталям повышенной прочности прибегают тогда, когда важным является уменьшение массы изделия при сохранении высокой прочности отдельных деталей. Следует, однако, при этом иметь в виду два обстоятельства.

- Во-первых, в случае ориентации на сталь повышенной прочности надо учитывать степень допустимой деформации (упругой или пластической); в этом смысле допустимый уровень напряжений будет ограничен, что может предопределить ненужность дальнейшего повышения прочностных характеристик.
- Во-вторых, при значительном повышении прочности стали (1400, 1600 и 2000 МПа) снижается сопротивление внезапному ее разрушению (часто при напряжениях значительно ниже расчетных и меньших, чем предел текучести), что инициируется присутствующими в сталях дефектами; в этом случае разрушение сталей в районе температур полухрупкости T_{50} смешанное (хрупко-вязкое) и допустимое напряжение будет определяться размером дефекта (трещиностойкостью, косвенно характеризуемой значением коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic}).

Так, при длине дефекта 3 мм разрушение произойдет при напряжении 600 МПа, если коэффициент интенсивности напряжений равен $31,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, и при 800 МПа, если указанный коэффициент будет $57 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, хотя предел текучести в обоих случаях может быть одинаковым и более 1200 МПа.

Итак, для сталей с вязким разрушением выбор марки можно основывать на сопоставлении расчетных напряжений и предела текучести (прочности) при условии обеспечения необходимого запаса вязкости; для сталей же со смешанным или даже хрупким разрушением (высокопрочные стали) выбор марки определяется сопоставлением расчетных напряжений с разрушающими напряжениями, обусловливаемыми коэффициентом интенсивности напряжений и предельным размером возможных дефектов. В связи с повышенной чувствительностью высокопрочных сталей к концентраторам напряжений как внутренним (дефекты, в том числе неметаллические включения), так и внешним (выточки, острые переходы) необходимо предусматривать применение специальных методов выплавки, обеспечивающих высокую степень чистоты стали по неметаллическим включениям, вредным примесям и газам.

Из высокопрочных машиностроительных сталей наименьшей склонностью к хрупкому разрушению характеризуются мартенситно-стареющие стали и ПНП-стали, однако они значительно дороже из-за высокой степени легирования.

Важным требованием, предъявляемым к деталям, изготавливаемым из конструкционных сталей повышенной и высокой прочности, является обеспечение долговечности изготавливаемых из них деталей; последняя достигается не столько материалом детали, сколько способом поверхностного упрочнения. Для большинства деталей машин нарушение работоспособности связано с двумя видами повреждений поверхности - износом и усталостью.

Все способы повышения поверхностной твердости (поверхностная закалка, химико-термическая обработка, а также поверхностный наклеп) способствуют повышению износостойкости и усталостной прочности.

При выборе методов поверхностного упрочнения надо учитывать, что нитроцементация (при толщине слоя насыщения до 0,8-0,9 мм) требует заметно меньшего времени, чем цементация, и проводится к тому же при более низких температурах. Еще быстрее выполняется поверхностная закалка, но она применима к деталям сравнительно простой формы и требует, как правило, больших капитальных затрат. Получаемая при этом стойкость слоя, а следовательно, долговечность детали будет разной и это определяется не только свойствами слоя, но и условиями (спецификой) эксплуатации изделия. К тому же разными будут энерго- и трудозатраты, безопасность и вредность работы.

Обеспечение такой разновидности долговечности, как коррозионная стойкость, жаропрочность и т. п., в основном определяется правильным выбором марки стали и последующей термической обработкой.

В качестве конструкционных применяются и стали, работающие в специфических условиях; название этих сталей уже предопределяет их область применения. Например, стали с высокими упругими свойствами (см. группы 151 и 152). Наиболее общие из предъявляемых к ним требований высокое сопротив-

ление малым пластическим деформациям и релаксационная стойкость - обеспечиваются термообработкой либо на углеродистых сталях (70, 65), либо сталях, легированных кремнием и марганцем (55ГС, 60С2), отличающихся большей прокаливаемостью. Более легированные стали (с хромом, молибденом и вольфрамом) целесообразно применять только в случае работы упругих элементов при повышенных температурах.

К числу конструкционных относятся так же стали и сплавы, устойчивые к воздействию температуры рабочей и внешней среды (подкласс 16).

Стали и сплавы, работающие при повышенной температуре, выбираются по основному признаку - температуре эксплуатации.

Для деталей, не подвергшихся значительным нагрузжениям, выбираются жаростойкие стали и сплавы с учетом температуры начала интенсивного их окисления в окислительной (в том числе с сероводородом) или науглероживающей средах (от 600-650 °С до 1100-1150 °С). Повышение жаростойкости достигается в первую очередь повышением содержания хрома (до 20-30%), а также добавками кремния и молибдена; для повышения стойкости в науглероживающих средах необходимо дополнительное легирование никелем (7-14%).

Для деталей, подвергшихся значительным механическим нагрузкам, вызывающим ползучесть материала, основной является необходимость обеспечения прочностных свойств при сохранении достаточно высокой жаростойкости. В случае длительного нагрева до 400-550 °С надо применять перлитоферритные стали, до 500-600 °С - высокохромистые ферритокарбидные, до 600-850 °С - аустенитные стали с карбидным или интерметал-лидным упрочнением; для работы при еще более высоких температурах должны использоваться сплавы на никелевой и никель-кобальтовой основе, а также тугоплавкие сплавы на основе вольфрама, молибдена и ниобия.

Для деталей, работающих при низких (криогенных) температурах должны применяться стали и сплавы, пластичность которых с понижением температуры либо не изменяется, либо уменьшается незначительно и без резкого падения. При работе до температур -196 °С можно применять ферритные (мартенситные), но высоконикелевые стали; в случае же еще более низких рабочих температур (вплоть до водородных и гелиевых температур -253 и -269 °С) надо применять аустенитные хромоникелевые и хромомарганцево-никелевые стали, сохраняющие γ -решетку при столь низком охлаждении. При необходимости иметь большую прочность для этих целей можно использовать и мартенситно-стареющие стали. С этой же целью могут использоваться бронзы, в частности, алюминиевые и бериллиевые бронзы с низкими коэффициентами трения, а также алюминиевые деформируемые сплавы.

При выборе сталей и сплавов, устойчивых к воздействию рабочей и внешней сред, принимается во внимание, прежде всего, стойкость против общей, межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания. При этом надо иметь в виду, что стали, в том числе высоколегированные, имеют достаточную стойкость против коррозии в ограниченном числе сред; многие из них стойки

против действия окисляющих кислот и не имеют необходимой стойкости в соляной кислоте и других реагентах.

При выборе марок перечня в каждом конкретном случае надо стремиться к применению стали с минимальным легированием с условием обязательного обеспечения требуемого уровня несущей способности; удорожание стали в результате легирования должно перекрываться достигаемым при этом положительным эффектом. Поэтому выбор марок перечня надо начинать с углеродистых сталей и в случае их непригодности переходить к легированным при одновременном учете дефицитности соответствующих элементов. В связи с этим заметим, что к недефицитным легирующим элементам относятся: марганец, кремний, хром, алюминий, титан, ванадий, бор, а к дефицитным - ниобий, молибден, медь, свинец, никель, вольфрам, тантал, кобальт, из которых особо дефицитными являются: вольфрам, никель, кобальт.

В качестве конструкционных могут выбираться также металлы и сплавы нежелезной группы, если они лучше отражают специфику условий работы соответствующих деталей.

Так, медные сплавы отличаются от железных низким коэффициентом трения, что обуславливает полезность применения их в парах скольжения; это тем более целесообразно, что многие из них характеризуются высокой пластичностью, хорошей стойкостью против коррозии в ряде агрессивных сред и высокой теплопроводностью. При этом надо иметь в виду, что прочностные характеристики выше у двухфазных сплавов, а пластичность - у однофазных; упрочнению последних способствует повышение их легированности (твердорастворное упрочнение). Однофазные и, двухфазные бронзы превосходят латуни по прочности и сопротивлению коррозии (особенно в морской воде); высокая износостойкость характерна для двухфазных бронз. Важное преимущество двухфазных бронз - хорошие литейные свойства (у оловянных - малая усадка, у алюминиевых - хорошая жидкотекучесть). Наиболее прочными из медных сплавов являются бериллиевые бронзы; их высокая прочность (после обработки на старение) сочетается с повышенной коррозионной стойкостью и электропроводностью. При выборе медных сплавов надо иметь в виду, что наиболее дефицитными и наиболее дорогими из них являются оловянные и бериллиевые бронзы.

Главное преимущество алюминиевых сплавов состоит в том, что они имеют малую плотность ($2,7-3,0 \text{ т/м}^3$) при достаточно высокой прочности (сплавы, упрочненные старением); их недостатки - низкий модуль упругости ($7-10^4 \text{ МПа}$ против $20-10^4 \text{ МПа}$ у сталей и чугунов), невозможность упрочнения поверхностного слоя химико-термической обработкой и, вследствие этого, низкая износостойкость. Дюралюминий к тому же недостаточно устойчив против коррозии. Жаропрочность алюминиевых сплавов ниже, чем у сталей и титановых сплавов. Литейные алюминиевые сплавы имеют низкую температуру литья, хорошую жидкотекучесть, но характеризуются пониженными механическими свойствами. Порошковые алюминиевые сплавы типа САП обладают большей

жаропрочностью и работают при температуре на 30-50°C выше, чем деформируемые и литейные сплавы.

Еще более легкими сплавами конструкционного назначения являются магниевые сплавы (1,7-1,8 т/м³), однако их модуль упругости ниже, чем у алюминиевых, и они пригодны лишь для малонагруженных деталей.

Титановые сплавы своими главными преимуществами имеют: небольшую плотность (4,5 т/м³), высокую коррозионную стойкость; высокие прочностные характеристики при отсутствии хладноломкости, в том числе при очень низких температурах; кроме того, они обладают сравнительно хорошей жаропрочностью, хотя и ниже, чем у сталей. По стойкости против коррозии в ряде сред они превосходят коррозионно-стойкие стали, медные и никелевые сплавы. Двухфазные, упрочняемые старением титановые сплавы, обладая меньшей пластичностью, по прочности не уступают улучшаемым легированным конструкционным сталям. Вместе с тем сплавы титана уступают сталям, особенно высокоуглеродистым, в твердости и износостойкости, что затрудняет их использование для деталей, работающих на трение.

Завершая рассмотрение вопроса о подготовке перечня марок по конструкционным сталям и сплавам, необходимо отметить, что, помимо окончательной (упрочняющей) обработки, надо определиться и с предварительной термической обработкой соответствующих заготовок. Ее необходимость и цели проведения определяются конкретными условиями. Чаще всего она используется для обеспечения технологичности процесса изготовления детали (придания формы) -повышения штампуемости, улучшения обрабатываемости резанием. Например, для улучшения штампуемости стали решающее значение имеет сфероидизация цементита, в связи с чем целесообразным представляется применение сфероидизирующего отжига; для подготовки структуры к обработке резанием стали обычно подвергаются нормализации или отжигу.² В целях предупреждения образования флокенов при охлаждении послековки некоторых специальных сталей должна предусматриваться изотермическая выдержка заготовок в районе субкритических температур с последующим замедленным охлаждением.

Нередко предварительная термическая обработка имеет своей целью подготовку структуры к последующей термической обработке и повышение ее эффективности. Число и характер операций такой обработки обуславливается составом сталей и сплавов, видом формообразования и размерами обрабатываемых заготовок.

Необходимые для выбора сталей и сплавов количественные характеристики их свойств надо брать по соответствующим справочникам, ГОСТам и другой научно-технической документации.

² Отжиг и нормализация могут быть и окончательной термической обработкой, если при этом получают требуемые свойства материала в детали (снятие напряжений, перекристаллизация).

Лекция 7.

1.4. Формирование перечня марок сталей и сплавов с особыми физическими свойствами (класс 2).

Перечень марок стали этого класса должен формироваться по определяющему показателю, который по физической сущности, как правило, предопределен названием соответствующих подклассов и особенно групп. Стали и сплавы этого класса должны иметь повышенными одно или два физических свойства; роль механических свойств в этом случае подчиненная.

Так, при выборе материалов для постоянных магнитов прежде всего принимается во внимание, насколько высока коэрцитивная сила и остаточная индукция (группа 212), а при выборе материалов для магнитопроводов трансформаторов и т.п. учитывают, насколько высока магнитная проницаемость и низка коэрцитивная сила (группа 211); обращают также внимание на потери при перемагничивании в т.ч. на вихревые токи. При выборе же сплавов для реостатов, нагревательных элементов печей (группа 234) в первую очередь обращают внимание, насколько высоким является удельное электросопротивление и насколько оно постоянно при нагреве; отдавая приоритет определяющим свойствам, одновременно учитывают и другие свойства, например, жаростойкость (сплавы группы 234). Подобно этому, при выборе материалов для деталей приборов, пружин специального назначения (подкласс 22) смотрят сначала, насколько низкими являются коэффициенты теплового расширения, температурный коэффициент модуля упругости.

1.5. Формирование перечня марок инструментальных сталей и сплавов (класс 3)

Специфика подбора марок перечня в этом случае обусловлена назначением и видом инструментов.

Прежде всего должен быть рассмотрен вопрос о возможности использования сталей для изготовления инструментов.

Режущие инструменты должны иметь и сохранять во время работы износостойкость, что обеспечивается высокой твердостью режущей кромки. Высокая твердость сталей достигается закалкой с последующим получением мартенсита отпуска; твердость будет тем больше, чем выше содержание углерода в стали. Если работа инструмента не сопровождается ударами, предпочтение отдается высокоуглеродистым сталям (1,1-1,2 % C); в противном случае должны применяться стали с меньшим содержанием углерода (0,7-0,8% C).

Эффективность использования стали для режущего инструмента определяется ее теплостойкостью, поскольку нагрев кромки обуславливает в каждом конкретном случае допустимую скорость резания. При резании мягких металлов с небольшой скоростью надо ориентироваться на нетеплостойкие стали, сохраняющие стойкость при нагреве до 190-225°C. В случае необходимости резания с повышенными скоростями (50-70 м/сек), в том числе деталей из жаропрочных, коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов, для изготовления ин-

струментов следует применять теплостойкие стали высокой твердости (быстрорежущие), сохраняющие стойкость при нагреве 500-600 °С.

При выборе сталей для режущих инструментов, помимо режимов резания должны учитываться форма, размеры, а также способы изготовления инструментов (штамповка, прессование, горячая навивка и др.). Для инструментов, используемых в пищевой промышленности, а также для медицинских инструментов предпочтение надо отдавать сталям, устойчивым против коррозии при одновременном обеспечении высокой твердости.

Измерительные инструменты, помимо высокой износостойкости должны обеспечивать сохранение постоянства размеров и формы, а иногда и высокую чистоту поверхности при их обработке, что должно учитываться при выборе стали и режима термической обработки.

Штампы, как и другие виды инструментов, в процессе работы подвергаются в основном износу, степень которого сильно зависит от характера деформирования обрабатываемых заготовок. При холодном деформировании для изготовления штампов применяют стали повышенной и высокой износостойкости, которая обеспечивается высоким содержанием углерода (более 1%) и легированием, в основном, карбидообразующими элементами (хром, молибден, ванадий, а также вольфрам); с повышением степени легирования повышается их теплостойкость. Для ударного инструмента используются менее углеродистые стали (0,40-0,70 %) при несколько большем содержании вольфрама.

При горячем деформировании, помимо износостойкости должна обеспечиваться высокая теплостойкость, необходимая для сопротивления пластической деформации, и вязкость, гарантирующая отсутствие хрупкого разрушения. Соответственно этому для изготовления штампов горячего деформирования применяют умеренно- и повышенно-теплостойкие стали повышенной и высокой вязкости; все они характеризуются средним содержанием углерода (0,30-0,60 %) и легируются хромом, молибденом, ванадием, а также никелем и вольфрамом.

Для изготовления режущего и штампованного инструментов можно применять также твердые сплавы. Они значительно превосходят стали по твердости (73-75 вместо 64-68 HRC), износостойкости и теплостойкости (900-1000 вместо 620-650°С), но уступают им по прочности на изгиб. Из твердых сплавов целесообразно делать инструменты, предназначенные для резания материалов повышенной твердости и с повышенными скоростями. Твердые сплавы могут работать и в качестве штамповых при отсутствии значительных динамических нагрузок. Из твердых сплавов можно изготовить инструменты простой формы, например, короткие сверла. В основном же они изготавливаются в виде пластинок, которые припаиваются или механически закрепляются в режущих инструментах или штампах. Надо иметь в виду, что с повышением содержания кобальта (связующее) снижается твердость и износостойкость, но возрастает прочность. Сплавы с карбидами вольфрама и титана целесообразно применять для резания сталей, а сплавы с карбидом вольфрама - для резания чугуна; последние могут использоваться также в штампах.

Необходимые для выбора инструментальных сталей количественные характеристики их свойств следует брать из соответствующих справочников.

После выбора сталей и сплавов и формирования перечня марок, удовлетворяющих поставленным требованиям, в аналогичном (по конечной цели) плане должен быть проведен анализ неметаллических материалов, имея в виду подготовку соответствующего перечня с охватом всех машиностроительных материалов.

Лекция 8

1.6. Материаловедческие обоснования выбора неметаллических материалов

К неметаллическим относятся все применяемые в машиностроении конструкционные материалы, кроме металлов и сплавов. Эти материалы не только выступают заменителями металлов, но применяются в качестве самостоятельных, иногда даже единственных, определяющих возможности реализации новых технических решений. Применение же их как заменителей сталей и сплавов обуславливается более высокой технологичностью, что в ряде случаев обеспечивает и большую экономическую эффективность [6]. Неметаллические машиностроительные материалы по природе и своему строению существенно отличаются от металлических. В связи с этим выбор их имеет свою специфику. Первые два этапа остаются теми же, что и при выборе металлических материалов, различия начинаются с выбора марок. Выбор материалов при этом основывается также на классификации по применению. Ниже приведем порядок и алгоритм выбора пластмасс

Пластмассы выбирают исходя из требований к эксплуатационным свойствам и геометрическим параметрам изделия. Поэтому сначала выбирают вид пластмассы на основе требований к ее эксплуатационным свойствам, а затем базовую марку и марку с улучшенными технологическими свойствами, которую можно эффективно переработать выбранным способом.

Существует два метода выбора вида материалов:

- 1 - метод аналогий - **качественный**;
- 2 - **количественный** метод.

Метод аналогий применяют при невозможности точного задания параметров эксплуатационных свойств пластмассы; в этом случае используют для выбора характерные параметры эксплуатационных свойств, назначение, достоинства, ограничения, рекомендации по применению и способам переработки; в этом случае для выбора также могут быть использованы рекомендации по применению пластмасс в других типах изделий, работающих в аналогичных условиях.

Порядок выбора пластмасс количественным методом по комплексу заданных значений эксплуатационных свойств сводится к следующему:

- выявление условий эксплуатации изделия и соответствующих им значений параметров эксплуатационных свойств пластмасс при основных условиях работы изделия;
- подбор пластмассы с требуемыми параметрами эксплуатационных свойств;

- проверка выбранной пластмассы по другим параметрам, не вошедшим в основные.

Наиболее удобной является эвристическая стратегия поиска и выбора пластмасс. В этом случае, отбрасывая заведомо бессмысленные варианты, используют не все множество вариантов, а лишь его наиболее нужную часть. Все множество пластмасс для этого разбивают на подмножества по определенным эксплуатационным свойствам. В таблице 10 приведены некоторые подмножества полимерных материалов.

Таблица 10

Характеристики подмножества полимерных материалов

Подмножество полимерных материалов	Число элементов K_i	Энтропия ряда ($\log_2 K_i$ бит)	Число поисковых параметров ряда, η	Сокращение поля поиска, $K_{обц}/K_i$ раз	Цена параметра, или снижение энтропии ($\log_2 K_{обц}/K_i$, бит)
Все множество ($K_{обц}$)	2710	11.4	11-12	-	-
Конструкционные	949	9.89	10	2.86	1.51
Электро- и радио- технические	864	9.76	10	3.14	1.65
Листовые	501	8.97	9	5.41	2.44
Тропикостойкие	188	7.56	8	14.41	3.85
Прозрачные	156	7.23	7-8	18.07	4.18
Медицинские	123	6.94	7	22.03	4.46
Радиационностойкие	56	5.81	6	48.39	5.60
Герметики	53	5.81	6	48.39	5.60
Компаунды	52	5.73	6	51.13	5.68
Фрикционные	13	3.70	4	208.46	7.70

Поиск в конструкционном ряду сокращает поисковое поле почти в 3 раза, в ряду прозрачных материалов - в 18 раз, фрикционных материалов - в 208 раз (табл.10).

Выбор пластмасс по эксплуатационным параметрам это задача противоречивая:

- 1 - необходимость учесть наибольшее число параметров с целью повышения точности выбора;
- 2 - необходимость уменьшить их число с целью сокращения затрат труда и времени на оценку.

Выбор оптимального или минимального числа параметров из всего возможного их числа (30-40 параметров) при выборе и оценке выбранного материала основан на учете всех наиболее ценных эксплуатационных параметров материала путем использования для этой цели нужного (по эксплуатационным параметрам) подмножества пластмасс (электро- и радиотехнические, прозрачные, тропикостойкие - табл.10 и др.), остальные материалы от-

брасывают. Минимальное количество учитываемых параметров определяют по выражению:

$$n \geq \text{INT}(\text{Log}_2 K) + 1;$$

где K - число элементов в данном подмножестве.

Обычно число поисковых параметров, необходимое для выбора пластмассы с помощью рядов пластмасс не превышает 10. Это наиболее ценные параметры с наибольшей информационной емкостью. За критерий ценности поисковой информации принимают выигрыш, показывающий степень сужения поискового поля; это выражает формула:

$$\text{Log}_2 K_{\text{общ}}/K_i = \text{Log}_2 K_{\text{общ}} - \text{Log}_2 K_i ;$$

где $K_{\text{общ}}$ - число элементов всего множества, K_i - число элементов в подмножестве. Иначе эту величину называют цена параметра (в битах).

Определение перечня параметров является наиболее важным этапом при выборе пластмасс. Для этого удобно представить процесс в виде графа-дерева с его свойствами, расположенными на различных уровнях (см. рис.1).

Поиск выполняют по соответствующей таблице с главным определяющим признаком (прозрачности, диэлектрической постоянной, электрической прочности и др.).

С учетом этих соображений порядок выбора пластмассы следующий:

I. Составление поискового образа пластмассы:

- составление графа дерева свойств изделия,
- составление параметрического ряда и определение значения параметров,
- определение веса параметров с использованием метода расстановки приоритетов,
- установление порога совпадения поисковых параметров;

II. Порядок выбора:

- выбор материала по поисковым параметрам, начиная с наиболее ценного, методом последовательного приближения,
- при наличии нескольких равноценных марок материала сопоставление и выбор лучшей с помощью обобщенного показателя или по результатам опробования.

Выбор базовой марки полимера. Базовую марку полимера выбирают по вязкости (текучести) в зависимости от предполагаемого способа переработки. Далее подбирают базовую марку по вязкости (текучести) в зависимости от конфигурации и размеров детали. В справочниках (на пластмассы) обычно приведены конкретные рекомендации по применению различных марок пластмасс. Выбор литьевых марок пластмасс для литья под давлением наиболее сложен, поэтому приведем его.

Выбор базовых марок для литья под давлением. Основными параметрами при этом являются толщина детали S и отношение длины детали к толщине L/S .

Типоразмер каждой литьевой машины характеризует: V - объем впрыскиваемого материала, P - давление литья, Q - скорость впрыска и другие параметры и интервал толщины S получаемых изделий (рис.10). Малые толщины получают на машинах с небольшим V , большие - на машинах с

большим V . Для каждого типоразмера машин выделяют характерный ассортимент деталей по отношению длины к толщине L/S .

Каждую марку подразделяют на четыре группы для получения изделий с различной S , а каждую группу по толщине разделяют на три группы по относительной длине L/S . Порядок выбора литевой марки полимера в зависимости от размеров изделия и типоразмера литевой машины:

1. Определяют по чертежу толщину S . При разнотолщинном изделии определяют эквивалентную равномерную толщину изделия по формуле:

$$S_{\text{э}} = (\sum S_i L_i) / (\sum L_i)$$

где S_i и L_i - толщина и длина отдельных участков изделия.

В зависимости от V изделия определяют типоразмер машины по V и номер группы изделия (марки) по S ($S_{\text{э}}$).

2. Определяют отношение L/S ($L/S_{\text{э}}$), определяют номер группы изделия и пластмассы по относительной длине.

3. По номерам групп толщины и относительной длины изделия определяют литевую марку полимера и его ПТР (η). Значения ПТР (η) приведены в таблицах справочников.

Выбор марки с улучшенными технологическими свойствами

Марки с улучшенными технологическими свойствами выбирают на основе базовых с использованием справочной информации о выпускаемых типах марок с улучшенными технологическими свойствами, их назначения, экономическом эффекте, рекомендациях по применению для различных изделий.

Алгоритм выбора пластмасс по указанной выше схеме.

Лекция 9.

2. Сравнительная оценка предварительно выбранных материалов

Сравнительная оценка выбранных на основании материаловедческого анализа марок перечня является очередным шестым этапом решения задачи выбора материала, а также технологии обработки (в том числе в деталях). Она производится прежде всего по определяющим показателям свойств и по стоимости, с учетом фактора надежности предполагаемого изделия (ГОСТ 27.002-89).

В ряде случаев представляется целесообразным также дополнительная оценка конкурирующих материалов путем сравнения их по технологичности, дефицитности и возможным экологическим последствиям их применения.

2.1. Сравнительная оценка материалов по свойствам

Сравнительная оценка материалов должна быть ориентирована на классификацию материалов по их назначению. К числу оценочных показателей следует отнести весовые данные и стоимость материалов во взаимосвязи с их физико-механическими свойствами. Из числа последних выбираются определяющие показатели, т. е. показатели, влияющие на работоспособность изделия (ГОСТ 15467-79). Для конструкционных материалов это чаще всего характеристики прочности или жесткости, а также допустимой деформации.

Ориентируясь на это, проведем для примера сравнительную оценку по прочностным характеристикам.

Сравнительная оценка обычно основывается на сопоставлении количественного уровня соответствующих показателей взятых из справочников, ГОСТов и других нормативно-технических документов. Но такое сравнение не может в полной мере определить целесообразность использования того или иного материала, так как указанные показатели никак не связаны с массой, а именно она определяет материалоемкость деталей.

Так, термообработанная сталь 30ХГС по значению предела прочности $\sigma_b = 1100$ МПа превосходит состаренный сплав Д16 $\sigma_b = 480$ МПа, но плотность стали $7,8 \text{ г/м}^3$, а у сплава $2,8 \text{ г/м}^3$. Для учета этой разницы часто пользуются относительной (удельной) величиной $\sigma_b / \rho g$ (ρ - плотность); в этом случае для указанных материалов соответственно получаем 14,4 и 17,5 км (разрушающая длина стержня под действием собственного веса). С учетом плотности, следовательно, сплав оказался лучше стали.

Необходимость учитывать плотность материала особенно заметна при сопоставлении материалов с различной плотностью. Так, титановый сплав ВТ22 по удельной прочности более предпочтителен, чем сталь повышенной прочности 30ХГСН2А, а полимерные композиционные материалы-волокнути превосходят по удельной прочности даже высокопрочную мартенситно-стареющую сталь.

Таким образом, сравнительную оценку материалов с различной плотностью надо производить по удельным показателям (в данном случае - по удельной прочности).

Вместе с тем и такая оценка не является исчерпывающей, потому что при ней не учитывается однородность материала (разброс свойств); она обуславливается технологией производства и, как правило, неодинакова у различных материалов. В целях учета различий в однородности материалов их сравнительная оценка должна производиться по критерию, связанному с надежностью предполагаемой детали (изделия). Характер этого критерия зависит от распределения рассматриваемого показателя свойств.

Для случая нормального распределения в применении к какому-либо показателю качества X он имеет вид, а для предела прочности предполагаемых изделий. При сравнении же между собой материалов с одинаковым разбросом свойств можно ориентироваться на показатели удельной прочности без учета надежности

Лекция 10.

2.2. Сравнительная оценка материалов по стоимости

Стоимость материала в условиях плановой экономики определялась прейскурантом оптовых цен; в условиях рыночных отношений она будет отличаться от указанных цен. Вместе с тем можно предположить, что соотношение цен в основном останется прежним, и поэтому при анализе этого вопроса будем опираться на оптовые цены, считая их условными. Это тем

более целесообразно, что методология сравнительной оценки материалов с учетом их стоимости не зависит от их уровня и соотношения.

Стоимость материалов в сильной степени зависит от технологии их получения, вида и профиля полуфабрикатов. Несмотря на большой разброс

можно констатировать, что наиболее дешевыми изделия машиностроения получаются из серых чугунов; при изготовлении их из ковких чугунов стоимость возрастает на 10-15 %, а из высокопрочных - на 20-30 %. Из машиностроительных материалов, поставляемых в виде полуфабрикатов, самыми дешевыми являются углеродистые стали обыкновенного качества. Вместе с тем их стоимость зависит от способа выплавки: при кислородно-конверторном производстве они получаются на 10-20 % дешевле, чем при производстве мартеновским способом; кипящая сталь всегда дешевле на 30-40 %, чем спокойная. Более дорогими являются качественные и высококачественные углеродистые конструкционные и инструментальные стали. Еще более дорогими будут среднелегированные высококачественные стали. Затем идут цветные металлы и их сплавы. Самыми дорогими являются высоколегированные, высокопрочные и с особыми физическими и химическими свойствами стали и сплавы. Стоимость последних также заметно различается в зависимости от способа производства. Стали всегда будут дороже при рафинировании шлаками, переплавке в вакууме и во всех других случаях, когда проводятся какие-либо мероприятия по дополнительной очистке их от вредных примесей и газов.

Что касается неметаллических материалов, то из них более дорогими являются пластмассы; они по стоимости находятся примерно на уровне цветных металлов (термопласты) и высоколегированных сталей с особыми свойствами (реактопласты). Вместе с тем изготовление изделий из них, в ряде случаев, экономически выгоднее вследствие большей технологичности.

Однако сопоставление материалов по стоимости, которая увязывается с единицей массы, не позволяет дать полной оценки, поскольку материалы различаются по уровню свойств. Более полной и объективной будет оценка по стоимости, отнесенной к определяющему показателю свойств (удельная стоимость). Для конструкционной стали это будет удельная стоимость по прочности $C/\sigma_{вс}/\sigma_{01}$ (стоимость единицы прочности).

Из приведенных данных вытекает ряд положений. Прежде всего наглядно подтверждается экономическая целесообразность термической обработки: стоимость единицы прочности стали 40 в улучшенном состоянии значительно ниже, чем в горячекатаном. Более выгодным может оказаться даже применение легированной стали, чем углеродистой (марки 30ХГСА и Ст. 5). Высокопрочные же стали характеризуются большей удельной стоимостью, особенно мартенситно-старяющая сталь; однако они имеют большую удельную прочность. С позиций удельной стоимости из алюминиевых сплавов предпочтительным представляется применение сплава В95 по сравнению с Д16.

При оценке по удельной стоимости представляется менее целесообразным применение полимерных композитов по сравнению с металлами и сплавами за исключением мартенситно-старяющей стали. Вместе с тем не следует забывать об их большой удельной прочности и значительно лучшей технологичности, что в данном случае не учитывается.

Заметим, что удельными характеристиками стоимости можно пользоваться и при сравнительной оценке материалов по другим показателям свойств, в том числе физическим, например, по электропроводности соответствующих сплавов меди и алюминия.

Таким образом, наиболее универсальной оценкой материалов при сравнении их по стоимости является удельная стоимость по определяющему показателю свойств. При этом, как и при оценке по удельной прочности, должны учитываться возможные изменения свойств материалов в процессе эксплуатации предполагаемых изделий.

По аналогии с оценкой по удельной прочности при оценке материалов по удельным характеристикам стоимости также можно было бы учесть еще и разброс свойств (неоднородность) материалов; при этом величину стоимости надо было бы заменить на величину $C(l-UV_c)$. Однако практического значения это не имеет, так как разброс по стоимости значительно больше разброса по свойствам материалов.

При сравнительной оценке марок материала, представленных в перечне, по стоимости необходимо учитывать также дефицитность материалов (составляющих его компонентов), которая не всегда совпадает с оценкой по стоимости.

2.3 Сравнительная оценка материалов по технологичности

После сравнительной оценки марок перечня, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, по свойствам и стоимости следует провести аналогичную оценку материалов по технологичности, поскольку она в значительной степени влияет на трудоемкость (производительность) и в этом смысле будет дополнять оценку по стоимости.

Применительно к сталям и сплавам технологичность характеризуют возможные методы их обработки. В связи с этим она оценивается по обрабатываемости резанием и давлением, свариваемости и литейности. Прежде всего надо иметь в виду, что наименьшая трудоемкость достигается при изготовлении деталей машиностроения литьем. Поэтому в случае возможности обеспечения требуемых эксплуатационных свойств металла этот способ изготовления является предпочтительным; при этом должны использоваться литейные стали и сплавы (см. группу 134 по классификации).

Достаточно экономичным по соображениям трудоемкости и предпочтительным может оказаться метод изготовления сваркой: в этом случае надо ориентироваться на свариваемые стали и сплавы (см. группу 133 по классификации).

В машиностроении, однако, чаще всего используются более трудоемкие методы обработки давлением и резанием; выбор более технологичного материала, а также его предварительной обработки при этом имеет большое значение (см. группу 132). Особенно важной представляется оценка обрабатываемости сталей и сплавов резанием, поскольку без этого трудно обойтись даже при изготовлении деталей другими способами.

Обрабатываемость сталей и сплавов резанием определяется в условиях точения резцами, оснащенными твердыми сплавами Т5К10, ВК8 (для аустенитных сталей и сплавов) и резцами из быстрорежущей стали Р18, Р12, Р6М5 (для углеродистых и легированных сталей) при постоянных значениях глубины резания 1,5 мм, подачи 0,2 мм/об и главного угла в плане резца 60°. Оценка производится по коэффициентам обрабатываемости для условий точения твердосплавными резцами $K_{o. m.c} = V_{60}/145$, а резцами из быстрорежущей стали $K_{o. б.ст} = V_{60}/70$ где V_{60} , - скорость резания, соответствующая 60-минутной стойкости при точении оцениваемой стали; 145 и 70 — скорости резания, соответствующие 60-минутной стойкости твердосплавленных резцов и резцов из быстрорежущей стали при точении эталонной стали 45 с пределом прочности 650 МПа и твердостью 179 НВ.

Коэффициенты обрабатываемости сталей и сплавов можно найти в справочной литературе.

При оценке технологичности сталей и сплавов следует при необходимости принимать во внимание склонность их к деформации и короблению при термической обработке, к отпускной хрупкости, а также флокеночувствительность. Что касается прокаливаемости сталей, то она учитывается при формировании перечня марок, удовлетворяющих заданным требованиям.

Применительно к неметаллическим материалам при оценке технологичности важно учитывать, что они часто выбираются как материал для данной детали с присущим ей распределением нагрузок в процессе эксплуатации. Поэтому решающее значение приобретает выбор способа изготовления детали. В связи с этим нередко возникает необходимость проведения предварительных исследований сущности процессов формования, результаты которых используются при выборе технологических параметров и оборудования. Особое внимание уделяется технологическим свойствам исходных материалов (вязкостные свойства связующего, деформационные и фильтрационные характеристики наполнителя). Оценка технологичности должна проводиться применительно к детали (изделию).

В целом же следует иметь в виду, что многие из неметаллических материалов более технологичны, чем стали и сплавы. Это относится прежде всего к полимерным материалам, которые в процессе переработки превращаются в детали (изделия) с заранее заданными эксплуатационными свойствами, вследствие чего энергетические затраты на производство сокращаются. Трудоемкость изготовления деталей при этом понижается в 1,5-3,0, а иногда в 10-20 раз; производительность же увеличивается до 15 раз. Вот почему изготовление деталей из таких материалов, несмотря на их сравнительно высокую стоимость, как правило, представляется экономически более оправданным.

С использованием данных, полученных на этапе сравнительной оценки, уже представляется возможность принять решение о выборе материала для многих деталей без дополнительного анализа их работы в условиях эксплуатации путем математического моделирования, о чем речь пойдет позже.

Проиллюстрируем это на примерах.

Пример 1. Выбрать материал и упрочняющую обработку для силовых болтов шатунного механизма газового компрессора, если известно, что напряжение в нем не превышает 700 МПа, а разогрев при работе может достигать 300°C.

Прежде всего надо уяснить задачу (если потребуется, с привлечением конструктора). Из характера взаимодействия деталей вытекает, что пластическая деформация болтов недопустима, поэтому в качестве оценочной характеристики будем использовать предел текучести. Поскольку болты работают на растяжение, необходимо обеспечить равнопрочность материала по всему сечению не менее 35 мм. Динамичность нагружения не должна приводить к хрупкому разрушению и потере работоспособности такого сложного изделия, как компрессор. По опыту эксплуатации деталей-аналогов известно, что это достигается при ударной вязкости не менее 50 Дж/см².

Рассмотрим два возможных варианта.

1) Стационарно работающий компрессор

Основой для решения любой задачи выбора материалов, как указывалось ранее, является их классификация по назначению. В данном случае по очевидным причинам речь должна идти о сталях и сплавах (см. подразд. 4.2.1).

Рассматриваемая деталь является составной частью установки, испытывающей механические воздействия, поэтому надо рассматривать класс 1, подклассы 11 и 12. Применительно к сталям, вследствие динамичности нагружения и необходимости получения структуры сорбита отпуска, будем ориентироваться на Из приведенной таблицы видно, что по удельной прочности выбранные стали уступают титановому сплаву, но для рассматриваемого компрессора ограничения по массе не выдвигались. Следовательно, при этом оценку надо проводить по другим критериям. По стоимостным показателям применение сталей значительно выгоднее. К тому же они не уступают титановому сплаву по технологичности (горячая штамповка и обработка резанием). Сопоставление же сталей между собой по удельной стоимости и коэффициентам обрабатываемости позволяет сделать окончательное заключение о целесообразности изготовления силовых болтов стационарного компрессора из стали 30ХГСА с улучшающей термической обработкой.

2) Компрессор для летательного аппарата Проведенный выше анализ относится и к этому случаю. Однако определяющим является требование об обеспечении работоспособности при минимальной массе. Сопоставление сталей и титанового сплава по удельной прочности показывает, что в этом случае предпочтительным является изготовление болтов из титанового сплава ВТ20 (с двойным отжигом) несмотря на значительно более высокую удельную стоимость при несколько меньшей технологичности.

После рассмотрения примера, заметим, что в зависимости от специфики и сложности поставленной задачи и приобретенных навыков отдельные этапы решения могут проводиться мысленно или даже опускаться.

Пример 2. Выбрать материал и упрочняющую обработку для силовой тяги летательного аппарата, обеспечивающий надежность (безотказность)

работы 0,999 при минимальной массе; температурный интервал эксплуатации летательного аппарата от -60 до 80°C.

Уясняем задачу. Требование минимума массы означает, что сечение тяги не ограничивается, и расчетная масса может быть отнесена к единице длины. Но при любой конкретно взятой нагрузке тяга, будучи наиболее легкой, должна обеспечивать требуемую безотказность. Пластическая деформация нарушает структуру конструкции и поэтому недопустима, из чего следует, что при решении задачи в качестве оценочной характеристики прочности надо принимать предел текучести. Из этого же вытекает, что конструкционные полимерные материалы из рассмотрения исключаются.

С учетом предъявляемых требований и указанных уточнений ориентируемся на класс 1, мысленно проходим подклассы 11, 12, группы 113, 121, 123 и по условиям задачи сосредотачиваемся на подгруппах 1132, 1212 и 1232, т.е. на высокопрочных сталях и сплавах.

В рамках выбранных подгрупп с помощью справочных источников [7,14] формируем перечень и систематизируем свойства конкурирующих марок сталей и сплавов.

В этом же перечне приведены расчетные значения характеристик удельной прочности с учетом надежности; параметр нормированной функции в соответствии с требуемой безотказностью 0,999 был принят равным 3 (см. П 3.1). Сопоставление данных указанного перечня показывает, что минимальная масса тяги будет обеспечиваться при изготовлении ее из высоколегированной высокопрочной стали Н13К16М10, которая, однако, пока не получила распространения в промышленности. В связи с этим более приемлемым может оказаться применение высокопрочного титанового сплава ВТ22.

Обратим внимание, что по условиям задачи влияние фактора стоимости, в отличие от предыдущего примера, здесь не рассматривалось, и поэтому оставлен без внимания вариант изготовления тяги из среднеуглеродистой высокопрочной стали 30ХГСН2А с применением НТМО. В этой связи заметим, что одновременный учет ограничения по массе и влияния стоимости материала потребует принятия компромиссного решения, допустимость которого определяется конструктором.

Марка	Р.т/	Термическая обработка	МПа	$\gamma_{\text{ц}}$	KCU,	K _p , км
30ХГС	7,8	Закалка, отпуск 200 °С	1500	0,05	120	16,7
		Закалка 900 °С, НТМО: 550 °С, дефор-	2130	0,05	20	23,7
Н18К9 М5	8	Закалка, старение 500 °С	1900	0,05	50	20,6
Н13К16	8	Закалка, старение 500 °С	2740	0,05	20	29,7
В95	2,85	Прессование, закалка, ступенчатое ста-	550	0,04	(30)■	17,3
В96	2,85	Прессование, закалка, ступенчатое ста-	630	0,04	(25)	19,8
ВТ22	4,5	Деформация, закалка и старение 575 °С	1270	0,04	30	25,3

Примечание.	коэффициент интенсивности напряжений (МПа /м ³).
-------------	--

Ниже проведем решение задачи выбора материала в предположении, что оптимальным видом упрочняющей обработки является нитроцементация.

Основываясь на сформулированных выше требованиях, ориентируемся на класс 1, подкласс 11 и выбираем группы 111 и 113; перечень же конкурирующих марок формируем в рамках подгрупп 1112 и 1131. Основные свойства сталей конкурирующих марок представлены в табл. 12.

Таблица 12
Свойства сталей конкурирующих марок

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	KCU Дж/см	HRC(поверхность)	Сечение заготовки мм
20	ХТО, закалка (в), отпуск 180-200 °С	290-340	18	54	55-63	50
20Х	ХТО, закалка (м), отпуск 190 °С	390	13	49	55-63	60
15ХФ	ХТО, закалка (м), отпуск 200 °С	350-380	16-20	59-98	59-63	-
20ХН	ХТО, закалка,(м), отпуск 190 °С	600	10	90	59-62	40
18ХГТ	ХТО, закалка (м) отпуск 180-200 °С	800	9	78	57-63	50

Примечание. Охлаждающие среды: (в) — вода, (м) — масло.

Таким образом, оптимальным, применительно к условиям данного примера, будет изготовление шестерни из стали 18ХГТ.

Сопоставление приведенных данных с требованиями показывает, что стали только двух последних марок можно считать пригодными для изготовления шестерни. Для окончательного выбора проведем их сравнительную оценку. Без каких-либо расчетов ясно, что по стоимости и дефицитности легирующих элементов преимущество за сталью 18ХГТ. Особенно важной является оценка по обрабатываемости резанием, поскольку основные расходы по изготовлению шестерни падают на механическую обработку. Сталь 18ХГТ в нормализованном состоянии характеризуется такой же обрабатываемостью инструментом из быстрорежущей стали, как и эталонная сталь 45, а твердосплавным инструментом даже несколько лучшей. По стали 20ХН такая информация отсутствует, но, судя по данным, относящимся к близкой по составу стали 40ХН, обрабатываемость у нее несколько ниже, чем у стали 18ХГТ. К этому надо добавить, что сталь 18ХГТ выгодно отличается от стали 20ХН

по чувствительности к отпускной хрупкости и не содержит дефицитного никеля.

Лекция 11. Моделирование исследуемого объекта.

Основы моделирования объектов исследования.

При моделировании технологических систем решаются поэтапно следующие задачи:

1. изучение объекта;
2. описательное моделирование, т.е. установление основных связей между отдельными характеристиками;
3. моделирование, т.е. перевод описательной модели на формальный математический язык;
4. выбор метода решения задачи;
5. составление блок-схемы, алгоритма и программы расчета на компьютере (если требуется);
6. решение задачи с использованием технических средств;
7. анализ результатов.

Постановка задачи. Процесс любого исследования начинается с постановки задачи. Ее решение должно быть получено наиболее коротким путем. Любой объект исследования, в принципе, неисчерпаем в своих свойствах и отношениях. Исследователь должен выделять те свойства и те отношения, которые должны привести к решению поставленной задачи.

Выбор моделей исследуемого объекта. Модель – заменитель оригинала, поэтому поиск заменителя основан на интуиции исследователя и на его логических основах. Аналогия объекта исследования является особенно ценной, когда условия ее сформулированы достаточно четко и определенно.

Типы моделей. Все модели объектов можно разделить на два класса:



И реальные и материальные модели создаются человеком и выбраны им из материальной действительности, в любом случае это продукт деятельности человека. Различие между реальными и идеальными моделями заключается в природе их функционирования. Характерной особенностью реальных моделей является то, что они функционируют по естественным законам, независимо от деятельности человека. Идеальные модели, напротив, существуют лишь в деятельности человека, но функционируют по законам логики. Эти модели объективны только по своему содержанию, но субъективны по форме и не могут существовать вне этой субъективной формы.

Материальные модели можно разделить на геометрические, физические, математические.

Геометрические модели не играют существенной роли в развитии научного познания, в основном они используются в демонстрационных целях, конструкторской практике и архитектуре.

Физические модели имеют математическое описание закономерностей объекта, т.е. математическое описание действующей физической модели соответствует математическому описанию закономерностей исследования (физические формулы).

Пример: создание новых лекарственных препаратов требует исследование влияния их на организм человека. Как правило эти исследования проводят на животных (растениях), которые и являются моделью человеческого организма.

Т.О. физическое моделирование может осуществляться в двух формах:

- при наличии математического описания оригинала и модели;
- при качественной оценке аналогии между моделью и объектом.

Физическое моделирование выполняет свои функции познавательные в том случае, если количественные характеристики модели могут быть использованы для количественного исследования оригинала.

Физическая модель объекта исследования представлена системой дифференциальных уравнений с достаточно большим количеством независимых переменных. Связь между этими переменными установить аналитическим путем очень трудно или вообще не возможно (т.е. нет возможности совместного решения уравнений).

Математическая модель, как и физическая представляют собой материальное устройство, продукт деятельности человека, функционирующее по своим законам. Математическое моделирование имеет значительные преимущества – теоретико- познавательные, что делает его незаменимым средством научного познания. Если объект исследования трудно доступен или вообще не доступен для исследования, это совсем не означает принципиальную невозможность его исследования. Последнее относится к таким сложным объектам, какими являются процессы обработки деталей, упрочняющие технологии, технологии получения изделий в машиностроении и другие. В отличие от физических моделей, математические позволяют исследовать только те факторы, которые входят в систему уравнений. Математические модели используются для исследования количественных характеристик и количественной взаимосвязи различных параметров объекта.

Лекция 12.

Математическое моделирование исследуемого технологического процесса.

В случаях, когда истинное математическое уравнение, описывающее технологический процесс, составить затруднительно, его представляют в виде степенного ряда

$$y=f(x_1,x_2,\dots,x_n),$$

где y - целевая функция, подлежащая оптимизации;

$x_1 - x_n$ - независимые переменные (факторы, влияющие на целевую функцию).

Любой объект исследования может быть представлен «черным ящиком»:

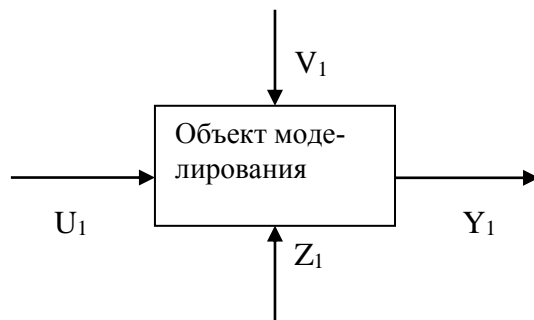


Рисунок 2. Кибернетическая схема «черного ящика»:

U_1 – вектор контролируемого входа;
 V_1 – вектор контролируемого возмущения;
 Z_1 – вектор неконтролируемого возмущения;
 Y_1 – вектор выхода (целевая функция);
 t – временной фактор

В общем виде математическая модель этого объекта может быть представлена функцией:

$$y=f(U_1,V_1,Z_1,t)$$

На целевую функцию и на вектор входа существуют определенные ограничения:

$$\alpha < y < \beta;$$

$$\delta < u < \gamma.$$

Представленная функция еще не является математической моделью. Чтобы построить математическую модель надо определиться что от нее требуется. Вид функции определяется исследователем на основании интуиции или априорной информации. Очевидно, главным требованием будет то, чтобы данная модель описывала исследуемый объект с достаточной точностью, т.е. чтобы значение целевой функции y , рассчитанной по математической модели были равны значениям целевой функции в реальных условиях или отличались от них на допустимую величину. Если это требование выполняется, то построенная модель считается адекватной.

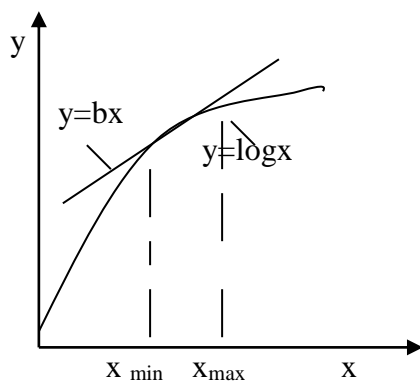


Рисунок 3. Графики линейной и логарифмической функций

Однако возникают случаи, когда объект исследования может быть описан математическими моделями разного вида. Тогда возникает вопрос, какая математическая модель лучше - которая проще. Например, в линейной функции $y=bx$ неизвестной является величина коэффициента b . Она может быть определена экспериментально или теоретически, т.е. может быть построена математическая модель. С логарифмической функцией сложнее.

При прочих равных условиях предпочтительнее являются математические модели представленные степенными рядами или алгебраическими полиномами. Но полиномы могут быть разных степеней (квадратичные, кубические), поэтому однозначного ответа нет. Задача построения математиче-

ской модели сводится к выбору вида моделей (линейная, квадратичная, кубическая) и определению величин коэффициентов. Выбор вида моделей лежит полностью на интуиции исследователя.

Все математические модели можно разделить на два вида (рис.): статические и динамические. Статической называется такая модель, в которой не учитывается фактор времени. Динамическая модель временной фактор учитывает.

В свою очередь все математические модели разделяются на три группы: детерминированные, стохастические, комбинированные.

Математическая модель называется детерминированной, если она описывает исследуемый объект на основе законов химии, физики, термодинамики и прочих естественных наук.

Стохастической называется модель, составленная на основе статистических данных исследуемого объекта без использования законов естественных наук.

Комбинированные модели имеют признаки детерминированных и стохастических моделей.

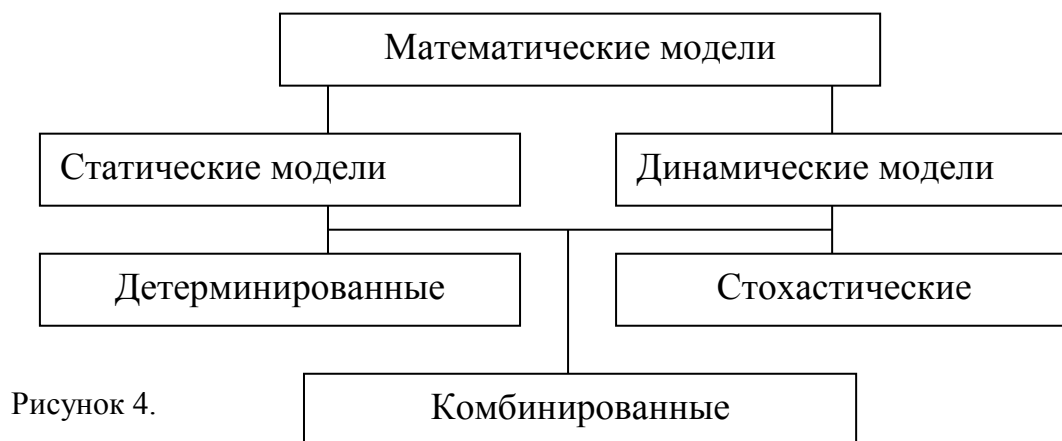


Рисунок 4.

Детерминированные модели (статические и динамические) представляют собой совокупность алгебраических уравнений или неравенств, характеризующих причинно-следственные связи между отдельными входами и выходами. Это могут быть уравнения энергии, термодинамики, теплообмена и пр.

Для сложных технологических процессов построение детерминированных моделей не представляется возможным ввиду неполноты знаний. В таких случаях прибегают к построению стохастических моделей.

Стохастические модели формально отражают вероятностный характер связи между отдельными входами и выходами исследуемого объекта. Такие модели строятся на основании специальной обработки статистических данных. Накопленных за определенный интервал времени без привлечения за-

конов естественных наук. Это позволяет по новому оценить исследуемый объект и установить влияние каждого фактора на целевую функцию.

Комбинированные модели сочетают в себе признаки, характерные как для детерминированных, так и для стохастических моделей. В них для описания исследуемого объекта принимается подходящий вид уравнения, а коэффициенты этого уравнения определяются методами параметрической идентификации объекта.

Математическая модель постоянно уточняется, что имеет большое значение в процессе познания объекта. Знание математической модели объекта позволяет решать конкретные задачи повышения эффективности производства, оптимизировать процессы получения, обработки, создания и выбора материалов с помощью методов математического программирования. Использование компьютерной техники позволяет решать эти задачи за короткий промежуток времени.

Моделирование технологического процесса производства.

Анализ ТП, формирующего свойства материала в детали (изделии) показывает, что основными объектами моделирования являются процессы выбора марки сплава, показатель предела текучести, вязкости, твердости, глубина термоупрочненного слоя, геометрические размеры детали, надежность, долговечность, себестоимость, износостойкость.

Первым этапом решения этих задач является построение математической модели исследуемого или проектируемого ТП. Этот этап разбивается на 5 отдельных пунктов:

- 1) составление схемы ТП (выделение входных и выходных параметров, контролируемых и неконтролируемых возмущений);
- 2) формирование задачи управления, выбор цели и ее решения;
- 3) выбор критерия оптимизации из числа выходных характеристик;
- 4) определение системы ограничений, при которых должен протекать исследуемый процесс;

5) разработка алгоритма и программа решения на ЭВМ.

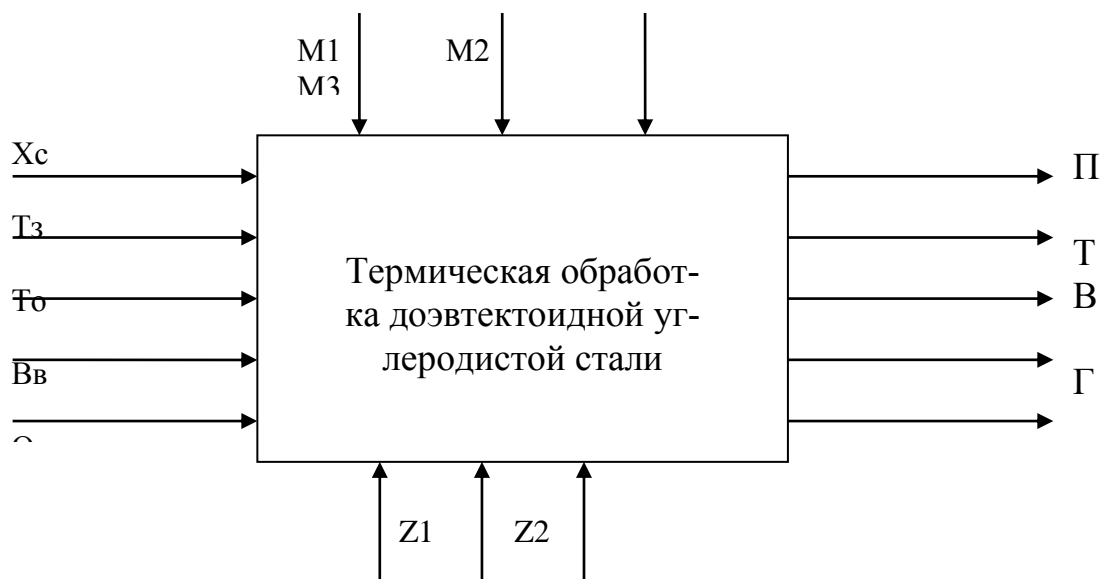


Рисунок 5.

Рассмотрим пример исследования процесса термической обработки доэвтектоидной углеродистой стали, он состоит из (рисунок 5.).

Входные параметры процесса : Xс- химический состав стали;

Тз – температурный интервал закалки;

То – температурный интервал отпуска;

Вв – время выдержки;

Ос – охлаждающая среда.

Выходные параметры процесса , или целевые функции:

П – прочность;

Т – твердость;

В – вязкость;

Г – глубина термообработанного слоя;

У – относительное удлинение.

Контролируемые возмущения – процессы рециркуляции (отжиг M1, повторная закалка M2, повторный отпуск M3).

Неконтролируемые возмущения (Z1,Z2,Z3,...) , например, влажность воздуха, атмосферное давление и температура воздуха.

Математическая модель этого процесса может быть представлена в виде уравнения математического баланса (детерминированная модель):

$$\sum_{j=1}^n C_i T_j = C_j \sum_{j=1}^n T_j,$$

где $i=1,2,\dots,m$; $j=1,2,\dots,n$; T_j – температурный интервал j -го материала, C_j – концентрация i -компонента в j -м материале, C_i – концентрация i -компонента в сплаве.

Это статическая детерминированная модель, использование ее не позволяет решить задачу оптимизации. Лучше использовать стохастические модели. Для получения более адекватных математических моделей необходимо, чтобы модель не только хорошо воспроизводила результаты экспериментов, но и учитывала природу процесса, т.е. необходимо повысить информативность модели. Сделать это возможно, вводя в матрицу признаки функций, построенных на физико-химических характеристиках компонентов, отражающих их природу. В общем виде эта задача может быть представлена следующим алгоритмом или блок-схемой. (рисунок 6.)

Лекция 13.

Разработка плана оптимизационного исследования.

Оптимизация состава материалов и технологических процессов.

Следует отметить, что истинного оптимума не существует, а оптимальным считается наилучший (ожидаемый) результат, отвечающий требованиям исследователя. Оптимальный результат находится не сразу, а в результате так называемых методов оптимизации.

Параметры оптимизации. Независимые переменные.

Параметр оптимизации или целевая функция, должен отвечать следующим требованиям:

- однозначности;
- единственности;
- выражаться числом.

Однозначность и единственность – наиболее трудновыполнимые требования, поскольку реальные задачи связаны с изучением достаточно большого числа параметров оптимизации. Например, при оптимизации сплавов необходимо иметь не только достаточную прочность, но и достаточную пластичность, и высокие технологические показатели.

Желательно, чтобы выбранный параметр оптимизации действительно определял экстремум и характеризовался числом. В тех случаях, когда численное представление целевой функции затруднительно, можно использовать ранговый подход. В этом случае каждому параметру оптимизации присваивается оценка-ранг по заранее выбранной шкале. Ранг – это уже количественная оценка параметра оптимизации, хотя и носит субъективный характер.

Независимые переменные(НП). При исследовании технологических процессов желательно включить в рассмотрение все независимые переменные, влияющие на целевые функции. Вместе с тем возникает необходимость уменьшения их количества, так как последнее требует большого количества опытов, времени и материальных затрат. К независимым переменным предъявляются следующие требования:

1. управляемость – возможность управлять факторами на требуемом уровне,

2. возможность замера в любой момент времени с достаточной точностью,
3. однозначность, т.е. каждый фактор должен быть независимым и не должен быть функционально связан с другими факторами,
4. совместимость, т.е. всевозможные комбинации факторов должны быть осуществимы и безопасны,
5. независимость, т.е. возможность установления фактора на любом уровне независимо от других.



Рисунок 6. Блок-схема исследования объекта.

Каждый фактор НП имеет область своего определения, границы этой области могут задаваться либо принципиальными ограничениями, которые не могут быть нарушены ни при каких обстоятельствах, либо технико-экономическими обстоятельствами (стоимость материала, продолжительность процесса и т.п.), либо отсутствием аппаратуры, способной контролировать и т.п.

После выбора области определения (линия со штриховкой) необходимо найти локальную область для проведения экспериментов. Этот выбор плохо формализованная задача и обычно ее решают в каждом конкретном случае, исходя из содержательного смысла задачи. Эта процедура включает выбор уровней варьирования факторов. Уровней факторов может быть любое число, одинаковое ли между ними расстояние, число уровней определяется конкретной постановкой задачи, видом фактора, предполагаемой сложностью изучаемого объекта. Так например, для построения линейной модели достаточно двух уровней; полная квадратичная модель требует варьирования на трех уровнях; полная модель третьей степени – на четырех и т.д.

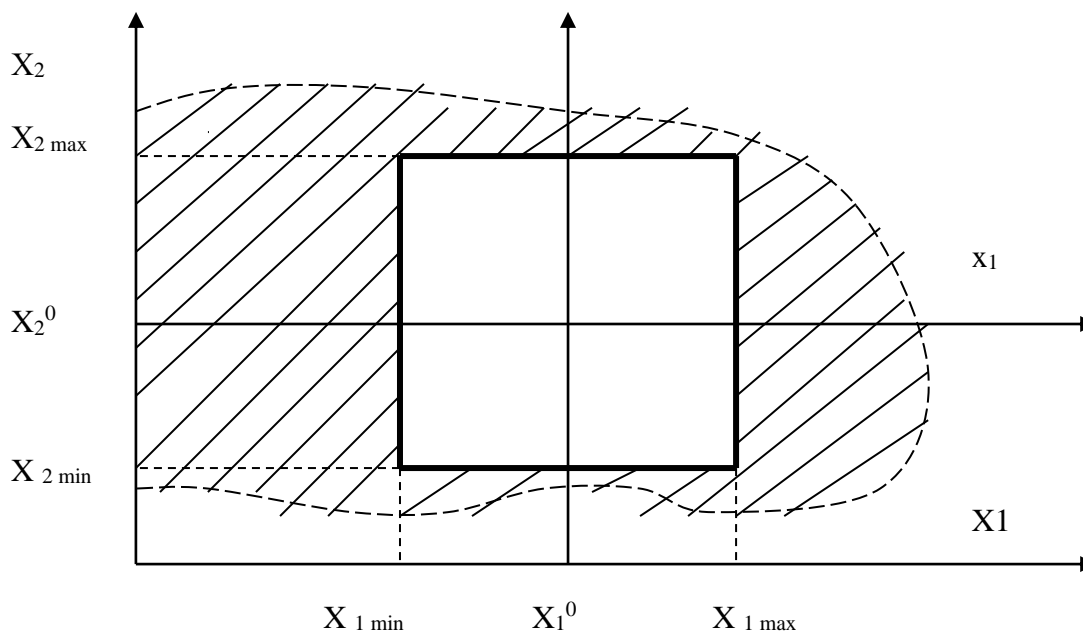


Рисунок 7. Область определения факторов в задаче с двумя факторами.

В общем случае факторы – размерные величины, причем размерности могут быть самые разные, а значения – разного порядка (температура $^{\circ}\text{C}$, химический состав - %элемента). Поэтому с факторами в исходном масштабе обычно не работают, а проводят их кодирование – линейное преобразование факторного пространства. Рассмотрим некоторые методы, позволяющие уменьшить количество независимых переменных. Цель – отсеять те независимые переменные, которые не оказывают существенного влияния на целевые функции.

Постановка задачи оптимизации

Оптимизация в широком смысле слова находит применение в науке, технике и в любой другой области человеческой деятельности.

Оптимизация - целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов при соответствующих условиях.

Поиски оптимальных решений привели к созданию специальных математических методов и уже в 18 веке были заложены математические основы оптимизации (вариационное исчисление, численные методы и др). Однако до второй половины 20 века методы оптимизации во многих областях науки и техники применялись очень редко, поскольку практическое использование математических методов оптимизации требовало огромной вычислительной работы, которую без ЭВМ реализовать было крайне трудно, а в ряде случаев - невозможно. Особенно большие трудности возникали при решении задач оптимизации процессов в химической технологии из-за большого числа параметров и их сложной взаимосвязи между собой. При наличии ЭВМ задача заметно упрощается.

Постановка задачи оптимизации предполагает существование конкурирующих свойств процесса, например:

- количество продукции - расход сырья"
- количество продукции - качество продукции"

Выбор компромиссного варианта для указанных свойств и представляет собой процедуру решения оптимизационной задачи.

При постановке задачи оптимизации необходимо:

1. Наличие объекта оптимизации и цели оптимизации. При этом формулировка каждой задачи оптимизации должна требовать экстремального значения лишь одной величины, т.е. одновременно системе не должно приписываться два и более критериев оптимизации, т.к. практически всегда экстремум одного критерия не соответствует экстремуму другого.

Типичный пример неправильной постановки задачи оптимизации:

"Получить максимальную производительность при минимальной себестоимости".

Ошибка заключается в том, что ставится задача поиска оптимума 2-х величин, противоречащих друг другу по своей сути.

Правильная постановка задачи могла быть следующая:

- а) получить максимальную производительность при заданной себестоимости;
 - б) получить минимальную себестоимость при заданной производительности;
- В первом случае критерий оптимизации - **производительность** а во втором - **себестоимость**.

2. Наличие ресурсов оптимизации, под которыми понимают возможность выбора значений некоторых параметров оптимизируемого объекта. Объект должен обладать определенными степенями свободы - **управляющими воздействиями**.

3. Возможность количественной оценки оптимизируемой величины, поскольку только в этом случае можно сравнивать эффекты от выбора тех или иных управляющих воздействий.

4. Учет ограничений.

Обычно оптимизируемая величина связана с экономичностью работы рассматриваемого объекта (аппарат, цех, завод). Оптимизируемый вариант работы объекта должен оцениваться какой-то количественной мерой-**критерием оптимальности.**

Критерием оптимальности называется количественная оценка оптимизируемого качества объекта.

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на ее значение. Вид критерия оптимальности или целевой функции определяется конкретной задачей оптимизации.

Таким образом, задача оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции.

Наиболее общей постановкой оптимальной задачи является выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки (производительность, себестоимость продукции, прибыль, рентабельность). Однако в частных задачах оптимизации, когда объект является частью технологического процесса, не всегда удается или не всегда целесообразно выделять прямой экономический показатель, который бы полностью характеризовал эффективность работы рассматриваемого объекта. В таких случаях критерием оптимальности может служить технологическая характеристика, косвенно оценивающая экономичность работы агрегата (время контакта, выход продукта, степень превращения, температура). Например устанавливается оптимальный температурный профиль, длительность цикла - "реакция - регенерация". Но в любом случае любой критерий оптимальности имеет экономическую природу.

Критерий оптимальности должен иметь ясный физический смысл, отражать наиболее существенные стороны процесса, должен иметь количественную оценку.

В том случае, когда случайные возмущения невелики и их воздействие на объект можно не учитывать, критерий оптимальности может быть представлен как функция входных, выходных и управляющих параметров:

$$R=R(X_1, X_2,...,X_N, Y_1,Y_2,...,Y_N, U_1,U_2,..., U_N)$$

Так как $Y=f(U)$, то при фиксированных X можно записать: $R=R(U_1,U_2,..., U_N)$

При этом всякое изменение значений управляющих параметров двояко сказывается на величине R :

- **прямо**, так как управляющие параметры непосредственно входят в выражение критерия оптимизации;
- **косвенно** - через изменение выходных параметров процесса, которые зависят от управляющих.

Как правило, для конкретных задач оптимизации химических производств критерий оптимальности не может быть записан в виде аналитического выражения.

В принципе, для оптимизации вместо математической модели можно использовать и сам объект, однако оптимизация опытным путем имеет ряд существенных недостатков:

- а) необходим реальный объект;
- б) необходимо изменять технологический режим в значительных пределах, что не всегда возможно;
- в) длительность испытаний и сложность обработки данных. Наличие математической модели (при условии, что она достаточно надежно описывает процесс) позволяет значительно проще решить задачу оптимизации аналитическим либо численным методами.

Итак, для решения задачи оптимизации необходимо:

- а) составить математическую модель объекта оптимизации,
- б) выбрать критерий оптимальности и составить целевую функцию,
- в) установить возможные ограничения, которые должны накладываться на переменные,
- г) выбрать метод оптимизации, который позволит найти экстремальные значения искомых величин.

Лекция 14

Классификация задач оптимизации.

Принято различать задачи **статической оптимизации** для процессов, протекающих в установившихся режимах, и задачи **динамической оптимизации**.

В первом случае решаются вопросы создания и реализации оптимальной модели процесса, во втором - задачи создания и реализации системы оптимального управления процессом при неустановившихся режимах эксплуатации.

Если требуется определить экстремум целевой функции без задания условий на какие-либо другие величины, то такая оптимизация называется *безусловной*. Такие критерии обычно используются при решении частных задач оптимизации (например, определение максимальной концентрации целевого продукта, оптимального времени пребывания реакционной смеси в аппарате и т.п.).

Если необходимо установить экстремум целевой функции при некоторых условиях, которые накладываются на ряд других величин (например, определение максимальной производительности при заданной себестоимости, определение оптимальной температуры при ограничениях по термостойкости катализатора и др.), то такая оптимизация называется *условной*.

Процедура решения задачи оптимизации обязательно включает, помимо выбора управляющих параметров, еще и установление ограничений на эти параметры (термостойкость, взрывобезопасность, мощность перекачивающих устройств).

Ограничения могут накладываться как по технологическим, так и по экономическим соображениям.

В зависимости от управляющих параметров различают следующие задачи :

- оптимизация при одной управляющей переменной- одномерная оптимизация,
- оптимизация при нескольких управляющих переменных – многомерная оптимизация,
- оптимизация при неопределённости данных,
- оптимизация с непрерывными, дискретными и смешанным типом значений управляющих воздействий.

В зависимости от критерия оптимизации различают:

- с одним критерием оптимизации- критерий оптимальности единственный.
- со многими критериями. Для решения задач со многими критериями используются специальные методы оптимизации.

Некоторые методы уменьшения количества параметров оптимизации.

Для проведения оптимизации желательно уменьшить количество целевых функций. Существует несколько способов уменьшения числа параметров оптимизации:

- 1) метод неопределенных множителей Лагранжа;
 - 2) метод построения функции качества;
 - 3) метод построения функции желательности;
 - 4) метод корреляционного анализа
- и другие.

Применение указанных методов требует сложного математического аппарата.

Метод априорного ранжирования.

На основе априорной информации строится ранжировочная диаграмма (гистограмма) влияния каждого *НП* на целевую функцию y (рисунок 8). По диаграмме (количество факторов зависит от целевой функции) устанавливается, какой из факторов может быть отброшен при проведении эксперимента. Метод прост, но малоэффективен, так как носит субъективный характер.

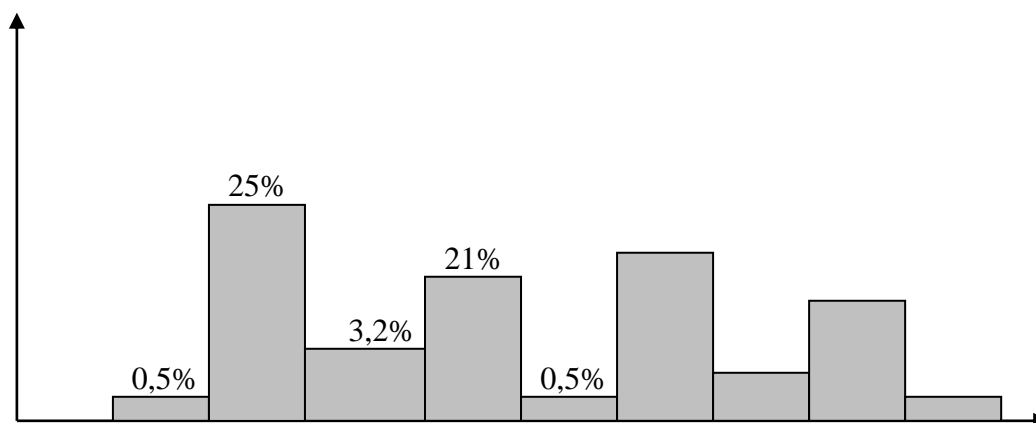


Рисунок 8. Ранжировочная гистограмма.

Лекции 15

Оценка важности параметров в баллах

При оценке важности параметров в баллах каждый эксперт оценивает параметры по десятибалльной системе. При этом оценка, назначаемая каждым экспертом каждому параметру не связана с оценками, которые он же назначает другим параметрам. Например, всем параметрам можно назначать одинаковую оценку. Определение экспертных оценок в баллах производится по следующему алгоритму.

1. Сформировать таблицу по форме, в которую вносятся оценки всех параметров в баллах, сделанные каждым экспертом.

Перейти от оценок параметров в баллах к значениям коэффициентов веса, сумма которых для всех параметров равна единице у каждого эксперта.

Эксперт	Оценка в баллах				Сумма			Параметры			
	Параметры						Эксперт				
	А	Б	В	Г				А	Б	В	Г
1	6	7	5	7	25		1	0.24	0.28	0.20	0.28
2	10	8	4	9	31		2	0.32	0.26	0.13	0.29
3	5	7	6	8	26		3	0.19	0.27	0.23	0.31
4	7	9	5	7	28		4	0.25	0.32	0.18	0.25
5	8	6	4	6	24		5	0.33	0.25	0.17	0.25
							коэф.веса	0.27	0.28	0.18	0.28

Метод парных сравнений.

Если при $k > 3$ одновременная оценка всех параметров вызывает затруднения, их можно оценивать еще одним методом, который называется методом парных сравнений. Этот метод реализуется с помощью следующего алгоритма.

1. Определить число оцениваемых параметров k и число экспертов n .

Пусть $k = 5$; $n = 4$.

2. Для каждого эксперта составить отдельную таблицу .

В этой таблице эксперт должен ввести оценку парных сравнений, которая заключается в следующем.

Если k -ый параметр важнее j -го, то в ячейке, принадлежащей k -ой строке и j -му столбцу, указывается 1, иначе - 0.

Пример заполнения такой таблицы первым экспертом приведен ниже, из которой видно, что по оценке этого эксперта параметр А менее важен, чем

параметр Б и Д, но более важен, чем В и Г.

Параметры	Параметры					Сумма
	А	Б	В	Г	Д	
А	•	0	1	1	0	2
Б	1	•	0	1	0	2
В	0	1	•	0	0	1
Г	0	0	1	•	1	2
Д	1	1	1	0	•	3
						10

Пример заполнения таблицы для 1-го эксперта по этим данным приведен в следующей таблице.

Эксперт	Параметры					Сумма
	А	Б	В	Г	Д	
1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	1
2	0.25	0.15	0.15	0.25	0.2	1
3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.15	1
4	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	1
Коэфф.веса						

Схемы компромиссов.

1. Принцип равномерности.

В общем случае он состоит в стремлении к равномерному повышению качества оптимизируемого объекта по всем частным нормированным критериям.

Этот принцип имеет несколько разновидностей:

а. Принцип равенства нормированных критериев. По этому принципу наилучшим компромиссным решением x^* является такое, при котором достигается равенство всех нормированных частных критериев, т. е. $f_1(x^*) = f_2(x^*) = \dots = f_n(x^*)$

Иногда этот принцип является чрезмерно «жестким». Он может приводить к ситуациям, когда решение задачи получается вне зоны компромисса или отсутствует.

б. Принцип квазиравенства.

По этому принципу идея равенств частных критериев реализуется приближенно с точностью до некоторой величины ϵ . Решение считается наилучшим, если значения отдельных нормированных частных критериев отличаются друг от друга не более, чем на ϵ .

в. Принцип «справедливой уступки».

По этому принципу различают абсолютную и относительную уступки. Принцип гласит: справедливым считается такой компромисс, при котором

суммарный абсолютный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного абсолютного уровня повышения других критериев. Аналогично формулируется принцип относительно «справедливой уступки».

2. Принцип последовательной «уступки».

Предположим, что частные критерии оптимальности ранжированы в порядке убывания их важности. Для определенности будем считать, что каждый из них нужно максимизировать. Процедура построения компромиссного решения сводится к следующему. Сначала ищется решение, обращающее в максимум главный частный критерий оптимальности f_1 . Затем назначается, исходя из практических соображений и точности, с которой известны исходные данные, некоторая «уступка» Δf_1 , которую можно допустить для того, чтобы обратиться в максимум второй критерий f_2 .

Далее налагаем на критерий f_1 ограничение, чтобы он был не меньше, чем $(f_1(x^*) - \Delta f_1)$. При этом ограничении ищем решение, обращающее в максимум критерий f_2 .

Затем назначается уступка для критерия f_2 , и т.д. При таком способе нахождения компромиссного решения сразу видно, ценой какой «уступки» в одном частном критерии приобретается выигрыш в другом.

На практике используются и некоторые другие схемы компромиссов.

Использование множителей Лагранжа

При решении задач векторной оптимизации обычно вначале ищется множество эффективных неуплучшаемых решений (множество Парето). Затем для принятия окончательного решения используется та или иная схема компромисса.

Сложность решения задачи во многом зависит от того, известна ли аналитическая зависимость обобщенного критерия оптимальности от частных критериев или она должна быть найдена с помощью численного эксперимента на ЭВМ.

Если функциональная зависимость обобщенного критерия от частных критериев установлена, то для решения задачи можно использовать метод неопределенных множителей Лагранжа

Рассмотрим следующую задачу векторной оптимизации:

$$f_{\text{lopt}} = \min f_i(x), i=1, k, x \in X$$

Метод е-ограничений предполагает видоизменение постановки этой задачи: $f_{\text{lopt}} = \min f_1(x)$, с учетом ограничений на остальные критерии оптимальности: $e_i \geq f_i(x)$,

где e_i - максимальные допустимые (пороговые) значения критериев оптимальности, кроме первого.

Для решения задачи составляется функция Лагранжа

$$L = f_1(x) + \sum_{i=2}^k \lambda_i * (f_i(x) - e_i)$$

где λ_i — неопределенные множители Лагранжа.

Рассмотрим два примера использования этого метода.

Пример 1.

В этой задаче используются два критерия оптимальности и две управляемые независимые переменные

$$\min \begin{cases} f_1(x_1, x_2) \equiv (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 4)^2 + 5 \\ f_2(x_1, x_2) \equiv (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 10)^2 + 6 \end{cases}$$

Решение.

Первая фаза решения состоит в преобразовании исходной постановки задачи:

$$\min f_1(x_1, x_2) \text{ с учетом ограничения } f_2(x_1, x_2) \leq e_2$$

Построим функцию Лагранжа: $L(x_1, x_2, \lambda_{12}) = f_1(x_1, x_2) + \lambda_{12} * (f_2(x_1, x_2) - e_2)$

Подставляя в нее выражения для f_1 и f_2 получим

$$L(x_1, x_2, \lambda_{12}) = (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 4)^2 + 5 + \lambda_{12} * [(x_1 - 6)^2 + (x_2 - 10)^2 + 6 - e_2]$$

здесь λ_{12} — неопределенный множитель Лагранжа.

Найдем частные производные от функции Лагранжа по всем аргументам и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 * (x_1 - 2) + 2 * \lambda_{12} * (x_1 - 6) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = 2 * (x_2 - 4) + 2 * \lambda_{12} * (x_2 - 10) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{12}} = [(x_1 - 6)^2 + (x_2 - 10)^2 + 6 - e_2] = 0$$

Решив систему, получим соотношение

$$\lambda_{12} = \frac{x_1 - 2}{6 - x_1} = \frac{x_2 - 4}{10 - x_2}$$

Из выражения для λ_{12} получим соотношение

$$x_2 = 1.5 * x_1 + 1$$

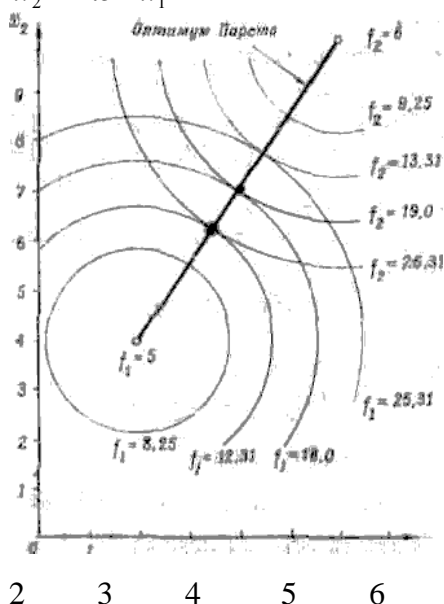


Рисунок 9. Неувлучшаемые (Парето-оптимальные) решения в пространстве

управляемых переменных

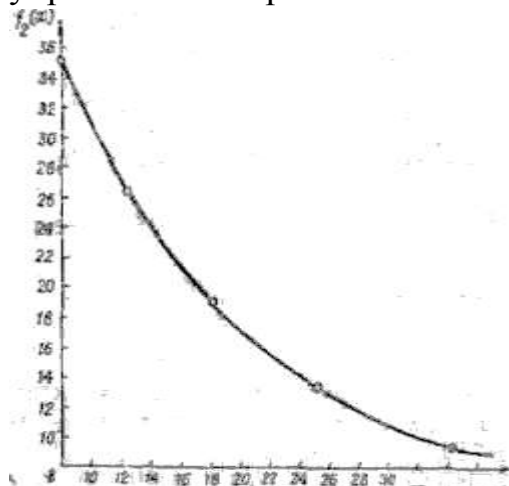


Рисунок 10. Эффективное множество компромиссов в целевом пространстве

На рис. 9 изображено множество компромиссов. Оно представляет собой отрезок прямой линии. Линии постоянного уровня каждого из критериев оптимальности являются окружностями. Отметим, что полученное решение не зависит от введенного ограничения ϵ .

На рис.10 показано множество компромиссов в целевом пространстве.

Численные результаты решения этой задачи представлены в табл. 13.

Таблица 13

x_1	x_2	f_1	f_2	λ_{12}
2,0	4,00	5,00	58,00	0,00
2,5	4,75	5,81	45,81	0,14
3,0	5,50	8,25	35,25	0,33
3,5	6,25	12,31	26,31	0,60
4,0	7,00	18,00	19,00	1,0
4,5	7,75	25,31	13,31	1,67
5,0	8,50	34,25	9,25	3,00
5,5	9,25	44,81	6,81	7,00
6,0	10,00	57,00	6,00	

Множитель Лагранжа λ_{12} является функцией f_1 и f_2 . Это, в частности, видно на рис. 11.

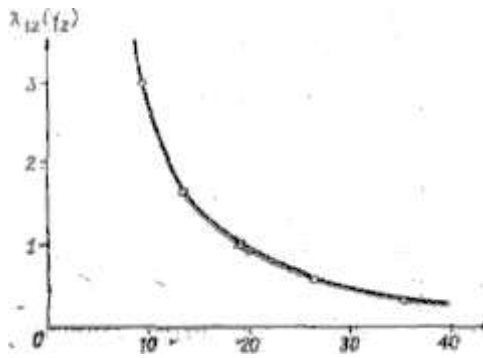


Рисунок 11. Множитель Лагранжа как функция критерия оптимальности f_2

В данном простом примере решение получено в замкнутой форме. В задачах большой размерности, когда получить замкнутую форму невозможно, решение ищут путем варьирования ϵ .

Перейдем теперь к более сложной задаче, в которой рассматриваются две управляемые переменные и три локальных критерия оптимальности.

Пример 2.

Математическая формулировка задачи имеет следующий вид:

$$\min_{x_1, x_2} \begin{cases} f_1(x_1, x_2) \equiv (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 4)^2 + 5 \\ f_2(x_1, x_2) \equiv (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 10)^2 + 6 \\ f_3(x_1, x_2) \equiv (x_1 - 10)^2 + (x_2 - 15)^2 + 10 \end{cases}$$

Решение.

Перепишем задачу в форме ϵ -ограничений: $\min_{x_1, x_2} f_1(x_1, x_2)$ с учетом $f_2(x_1, x_2) \leq \epsilon_2$, $f_3(x_1, x_2) \leq \epsilon_3$. Функция Лагранжа имеет следующий вид:

$$L(x_1, x_2, \lambda_2, \lambda_3) = f_1(x_1, x_2) + \lambda_2 * (f_2(x_1, x_2) - \epsilon_2) + \lambda_3 * (f_3(x_1, x_2) - \epsilon_3)$$

Подставляя сюда выражения для $f_1(x_1, x_2)$, $f_2(x_1, x_2)$, $f_3(x_1, x_2)$, и используя метод неопределенных множителей Лагранжа, получаем:

$\lambda_2 = \frac{11 * x_1 - 8 * x_2 + 10}{-5 * x_1 + 4 * x_2 - 10}$	$\lambda_3 = \frac{-6 * x_1 + 4 * x_2 - 4}{-5 * x_1 + 4 * x_2 - 10}$
---	--

Заметим, что функция $f_1(x_1, x_2)$ не обязательно должна быть «основной», а функции $f_2(x_1, x_2)$, $f_3(x_1, x_2)$ должны выполнять роль ограничений.

Рассматриваемая задача может быть записана в ином виде, например:

$$\min_{x_1, x_2} f_2(x_1, x_2) \text{ с учетом ограничений } f_1(x_1, x_2) \leq \epsilon_2, f_3(x_1, x_2) \leq \epsilon_3$$

Функция Лагранжа для задачи, записанной в этой форме, имеет следующий вид:

$$L(x_1, x_2, \lambda_2, \lambda_3) = f_2(x_1, x_2) + \lambda_2 * (f_1(x_1, x_2) - \epsilon_2) + \lambda_3 * (f_3(x_1, x_2) - \epsilon_3)$$

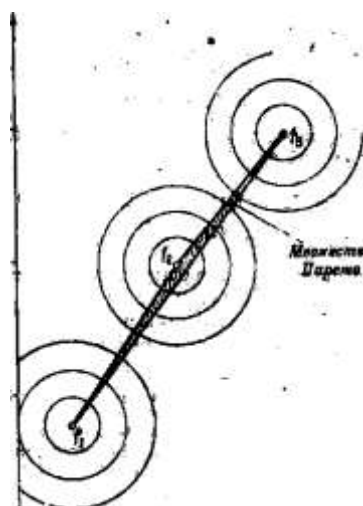
Решая эту задачу с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа, получим:

$\lambda_1 = \frac{-5 * x_1 + 4 * x_2 - 10}{11 * x_1 - 8 * x_2 + 10}$	$\lambda_3 = \frac{-6 * x_1 + 4 * x_2 - 4}{11 * x_1 - 8 * x_2 + 10}$
---	--

Результаты решения рассматриваемой задачи приведены в табл. 13.

Таблица 13
Неулучшаемые решения задачи

x_1	x_2	$f_1(x_1, x_2)$	$f_2(x_1, x_2)$	$f_3(x_1, x_2)$	λ_1	λ_3
4	6,88	17,29	19,73	111,93	0,42	0,19
5	8,25	32,06	10,06	80,56	0,50	0,50
6	9,63	52,70	6,14	54,84	0,70	1,00
7	11,00	79,00	8,00	35,00	1,00	2,00
8	12,38	111,22	15,66	20,86	2,17	5,17



На рисунке 12 представлено множество неулучшаемых решений (множество Парето) в пространстве управляемых переменных .

Лекция 15

Многомерная безградиентная оптимизация

В данном разделе рассматриваются численные методы оптимизации, у которых величина и направление шага к оптимуму формируются однозначно по определенным детерминированным функциям в зависимости от свойств критерия оптимальности в окрестности текущей точки без использования производных (т.е. градиента). Все алгоритмы имеют итерационный характер и для переменной i на $j + 1$ итерации выражаются формулой :

$$x_{i,j+1} = x_{i,j} + \Delta x_{i,j}$$

Для рассматриваемой группы методов $\Delta x_{i,j} = R(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j})$.

Среди этих методов выделим: метод Гаусса - Зайделя, метод Хука-Дживса, методы деформируемого многогранника (симплексный метод).

Основная особенность рассматриваемой группы методов - отсутствие вычисления градиента критерия оптимальности. Ряд методов прямого поиска базируется на последовательном применении одномерного поиска по переменным или по другим задаваемым направлениям, что облегчает их алгоритмизацию и применение.

Многомерная градиентная оптимизация

Величина шага $\Delta x_{i,j}$ в рекуррентном соотношении:

$x_{i,j+1} = x_{i,j} + \Delta x_{i,j}$ для переменной i на $j+1$ итерации вычисляется с использованием градиента целевой функции $R(x)$, т.е.

$$\Delta x_{i,j} = f(\text{grad } R(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j})).$$

При этом шаг может определяться с использованием градиента в одной (текущей) или в двух (текущей и предыдущей) точках. Направление градиента, как известно, показывает направления наискорейшего возрастания функции, а его модуль - скорость этого возрастания.

Поисковые методы оптимизации содержат субъективно задаваемые параметры, которые существенно влияют на эффективность поиска, вследствие чего один и тот же метод может дать совершенно различные траектории поиска.

Среди этих методов выделим метод сопряжённых градиентов и метод Ньютона. Эти два метода нашли отражение в программном продукте EXCEL.

Симплексный метод оптимизации.

Симплексом называется правильный многогранник, имеющий $n+1$ вершину, где n - число факторов, влияющих на процесс. Так, например, если факторов два, то симплексом является правильный треугольник.

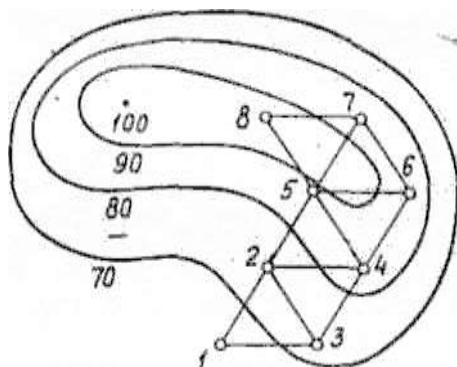


Рисунок 13. Оптимизация по симплексному методу

Сущность симплексного метода оптимизации иллюстрирует рисунок 13.

Начальная серия опытов соответствует вершинам исходного симплекса (точки 1, 2 и 3). Условия этих первых опытов берутся из области значений факторов, соответствующих наиболее благоприятным из известных режимов оптимизируемого процесса. Сравнивая между собой результаты опытов в точках 1, 2 и 3, находят среди них самый «плохой», с точки зрения выбранного критерия оптимальности. Пусть, например, самым «неудачным» оказался опыт в точке 1. Этот опыт исключают из рассмотрения, а вместо него в состав симплекса вводят опыт в точке 4, которая симметрична точке 1 относительно противоположной стороны треугольника, соединяющей точки 2 и 3.

Далее сравнивают между собой результаты опытов в вершинах нового симплекса, отбрасывают самый «неудачный» из них и переносят соответствующую вершину симплекса в точку 5. Затем рассмотренная процедура повторяется в течение всего процесса оптимизации.

Если экстремум критерия оптимальности достигнут, то дальнейшее движение симплекса прекращается. Это значит, что новый шаг возвращает исследователя в предыдущую точку факторного пространства.

Следует иметь в виду, что симплексный метод, так же как и другие методы оптимизации, является *локальным* методом поиска экстремума. Если существует несколько экстремумов критерия оптимальности, то этот метод позволяет найти тот из них, который расположен ближе к точкам исходного симплекса. Поэтому, если есть подозрение о существовании нескольких экстремумов критерия оптимальности, нужно осуществить их поиск, каждый раз начиная оптимизацию из новой области факторного пространства. Затем следует сравнить между собой найденные оптимальные условия и из всех вариантов выбрать наилучший.

При оптимизации необходимо принимать во внимание ограничения, наложенные на влияющие факторы и функции отклика.

Важно отметить, что при пользовании симплексным методом *не обязательно* дублировать опыты. Дело в том, что ошибка в отдельном опыте может только несколько замедлить оптимизацию. Если же последующие опыты выполняются безупречно, то движение к оптимуму продолжается.

Матрица опытов исходного симплекса в кодированных переменных приведена в табл. 11.

Величины, входящие в эту таблицу, рассчитываются по следующим формулам:

$$k_i = \sqrt{\frac{1}{2 * i * (i + 1)}} \quad R = i * k_i \quad (*)$$

Здесь i -номер фактора в матрице планирования. Символом 0 обозначены координаты центра плана, т. е. основной уровень.

Таблица 14
Матрица исходного симплекса

Номер опыта	X_1	X_2	...	X_{n-1}	X_n	Функция отклика
1	K_1	K_2	...	K_{n-1}	K_n	Y_1
2	$-R_1$	K_2	...	K_{n-1}	K_n	Y_2
3	0	$-R_2$...	K_{n-1}	K_n	Y_3
...
$n-1$	0	0	...	K_{n-1}	K_n	Y_{n-1}
n	0	0	...	$-R_{n-1}$	K_n	Y_n
$n+1$	0	0	...	0	$-R_n$	Y_{n+1}

Опыты, представленные в табл. 14, соответствуют вершинам симплекса, стороны которого равна единице, а центр совпадает с началом координат (в кодированных переменных).

Результаты расчетов, выполненных на основании табл. 14 и формул (*) приведены в табл. 15.

Таблица 15
Условия начальной серии опытов

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4
1	0,5	0,289	0,204	0,158
2	-0,5	0,289	0,204	0,158
3	0	-0,578	0,204	0,158
4	0	0	-0,612	0,158
5	0	0	0	-0,632

Аналогично можно рассчитать условия исходной серии опытов для большего количества факторов.

Очевидно, наибольшее количество опытов приходится ставить в начале эксперимента. Затем на каждом шаге оптимизации выполняется только один опыт.

Приступая к оптимизации, необходимо с помощью табл. 14 или 15 рассчитать матрицу исходной серии опытов в физических переменных, пользуясь формулой

$$x_i = x_{0i} + \Delta x_i * X_i$$

В дальнейшем все операции производятся только с физическими i -переменными.

Условия каждого нового опыта рассчитываются по формуле:

$$x_i = \frac{2}{n} * \left(\sum_{j=1}^{n+1} x_{ji} - x_i^* \right) - x_i^* \quad (**)$$

где n —число факторов в матрице планирования;

j — номер опыта;

i —номер фактора;

x_i^* —значение i -го фактора в самом «неудачном» опыте предыдущего симплекса.

Следует отметить, что на любом шаге оптимизации, осуществляемой симплексным методом, можно включить в программу исследований *новый фактор*, который до тех пор не принимался во внимание, но оставался на постоянном уровне.

При этом значения всех ранее рассматриваемых факторов рассчитываются по формуле:

$$x_i = \frac{1}{n+1} * \sum_{j=1}^{n+1} x_{ji}$$

где $i = 1, 2, \dots, n$, то есть являются средними арифметическими значениями соответствующих координат предыдущего симплекса.

Значение вновь вводимого фактора определяется по формуле:

$$x_{n+1} = x_{0(n+1)} + \Delta x_{n+1} * (R_{n+1} + k_{n+1})$$

где $x_{0(n+1)}$ —основной уровень этого фактора;

Δx_{n+1} —выбранный шаг варьирования для данного фактора;

R_{n+1}, k_{n+1} —величины, рассчитываемые по формулам (*).

Отметим, что добавление нового фактора в состав полного «факторного эксперимента» сопровождается увеличением количества опытов *вдвое*. В этом смысле симплексный метод имеет очевидное *преимущество*.

В практику научных исследований симплексный метод был введен Химсвортом в 1962г.

Пример 3. Пусть требуется с помощью симплексного метода оптимизировать выход целевого продукта y (%), который получается при взаимодействии

двух реагентов с концентрациями x_1 и x_2 ($\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3}$) при температуре x_3 (°C). Выберем основные уровни и шаги варьирования факторов и сведем их в табл. 16.

Таблица 16
Значения уровней факторов и шагов варьирования

Фактор	Основной уровень	Шаг варьирования
x_2 ($\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3}$)	1,0	0,1

$x_2 \left(\frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3} \right)$	1,5	0,2
$x_3 \text{ (}^\circ\text{C)}.$	60,0	5,0

Пользуясь формулой (3.5) и табл. 15, рассчитаем условия проведения первых четырех опытов и полученные результаты сведем в табл. 14. Так, например, для третьего опыта

$$x_{31}=1+0,1*0=1; \quad x_{32}=1,50+0,2(-0,578)=1,38; \quad x_{33}=60+5*0,204=61.$$

Таблица 14

Оптимизация симплексным методом

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	Функция отклика
1	1,05	1,56	61	72,3
2	0,95	1,56	61	70,1
3	1,00	1,38	61	65,4
4	1,00	1,50	57	68,2
5	1,00	1,70	58	73,9
6	1,00	1,72	63	76,5

Сравнивая между собой результаты первых четырех опытов, видим, что самый низкий выход целевого продукта получился в третьем опыте. Этот опыт следует исключить из дальнейшего рассмотрения.

Заменим его опытом 5, условия проведения которого рассчитаем по формуле (**):

$$x_{51} = \frac{2}{3} * (1.05 + 0.95 + 1) - 1 = 1$$

$$x_{52} = \frac{2}{3} * (1.56 + 1.56 + 1.5) - 1.38 = 1.7$$

$$x_{53} = \frac{2}{3} * (61 + 61 + 57) - 61 = 58$$

В новом симплексе, образованном опытами 1, 2, 4 и 5, самым «неудачным» является опыт 4. Его заменим опытом 6, условия которого найдем, пользуясь той же формулой (**).

Далее процедура оптимизации может быть продолжена аналогично.

Рассмотрим теперь вопрос о том, как включить в программу исследований еще один фактор, например скорость вращения мешалки. Пусть до этих пор она была постоянной и равной 500 об/мин. Теперь будем считать эту величину фактором x_4 и примем для нее шаг варьирования $\Delta x_4 = 100$ об/мин.

Предыдущий симплекс для трех факторов (см. табл. 15) состоит из опытов 1, 2, 5 и 6. Чтобы из него получить новый симплекс для четырех факторов, введем опыт 7 (табл. 16).

Таблица 16 Добавление нового фактора в программу оптимизации

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	Функция отклика
1	1,05	1,56	61	500	72,3
2	0,95	1,56	61	500	70,1
5	1,00	1,70	58	500	73,9
6	1,00	1,72	63	500	76,5
7	1,00	1,64	61	580	78,1

Условия проведения 7-го опыта найдем по формулам (3.7) и (3.8):

$$x_{71} = \frac{1}{4} * (1.05 + 0.95 + 1 + 1) = 1$$

$$x_{72} = \frac{1}{4} * (1.56 + 1.56 + 1.7 + 1.72) = 1.64$$

$$x_{73} = \frac{1}{4} * (61 + 61 + 58 + 63) = 61$$

$$x_{74} = 500 + 100 * (0.632 + 0.158) = 580$$

Далее оптимизацию можно продолжить с учетом всех четырех факторов, пользуясь рассмотренной выше процедурой.

Лекция 16

Поиск по деформируемому многограннику

Это типичный и распространенный метод локального поиска поэтому рассмотрим его поподробнее, тем более что для случая двух переменных возможна его наглядная геометрическая интерпретация. Метод предложен Нелдером и Мидом, поэтому его час называют также по фамилии авторов.

Начнем рассмотрение с близкого ему симплексного метода (не путать с симплексным методом в линейном программировании). Он более простой, однако находит широкое применение в решении задач планирования экстремальных экспериментов.

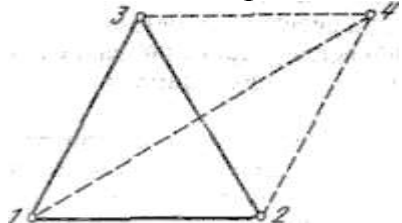


Рисунок 14. Иллюстрация идеи симплексного метода

Симплексами называют регулярные многогранники. Например, для случая двух переменных это будет равносторонний треугольник, для трех переменных - тетраэдр и т. д. Точки испытаний (рис. 14) совпадают с вершинами симплекса (точки 1, 2, 3). Из вершины, в которой целевая функция максимальна (точка 1), проводится проектирующая прямая через центр тяжести симплекса. Затем строится новый симплекс, называемый отраженным, из то-

чек 2, 3 и новой точки 4, расположенной на проектирующей прямой на надлежащем расстоянии от центра тяжести. Такая процедура в которой каждый раз вычеркивается вершина с максимальной целевой функцией, повторяется. Треугольник (в случае двух переменных) как бы переворачивается через сторону с наименьшими значениями целевой функции. Существуют правила постепенного уменьшения размера симплекса и предотвращения циклического движения в окрестности минимума.

Использование именно регулярных многогранников обуславливает ряд недостатков метода: неэффективный поиск в искривленных оврагах, замедление поиска в некоторых ситуациях. В метод деформируемого многогранника симплекс может изменять свою форму, поэтому лучше приспособиться к особенностям многомерно поверхности.

Обозначим координаты вершин многогранника на /с-м шаг через $X_{i,k}$ $i = 1, \dots, n + 1$; $k = 0, 1, \dots$

Выделим вершины, в которых целевая функция максимальная и минимальная, и обозначим их соответственно через $X_{\text{плохое}}$ ($X_{\text{макс}}$) и $X_{\text{хорошее}}$ ($X_{\text{мин}}$). (для упрощения формул индекс шага k в дальнейшем будем опускать) Через

$X_{\text{центр}}$ обозначим центр тяжести всех вершин, исключая $X_{\text{плохое}}$:

$$X_{n+2,j} = \frac{1}{n} * \left(\left(\sum_{i=1}^{n+1} x_{i,j} \right) - x_{\text{плохое},j} \right)$$

Работа метода состоит из следующих операций: отражения, растяжения, сжатия и редукции (рис. 15).

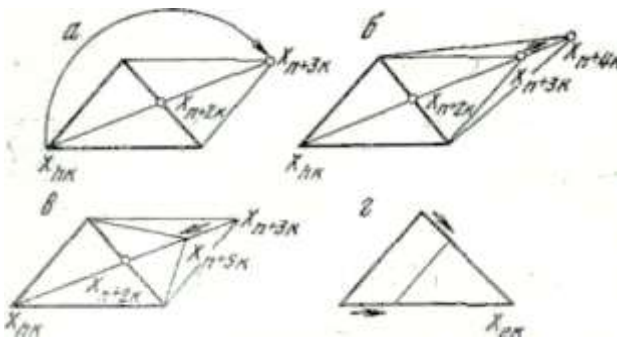


Рисунок 15. Операции метода деформируемого многогранника

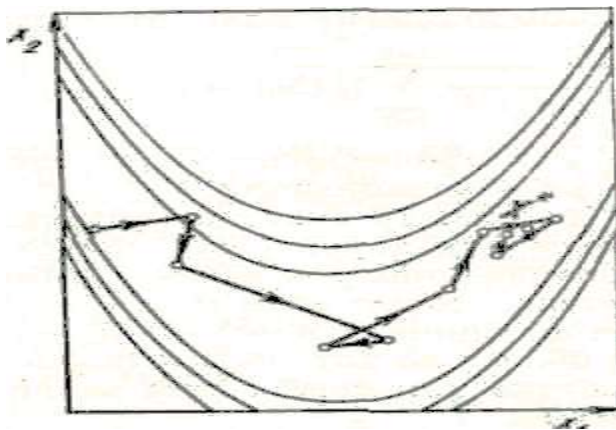


Рисунок 16. Траектория метода деформируемого многогранника

Отражение (рис. 15, а) - это проектирование точки $X_{\text{плохое}}$ через центр тяжести с получением новой точки:

$$X_{n+3} = X(n+2) + a * (X_{n+2} - X_{\text{плохое}})$$

где $a > 0$ — коэффициент отражения.

Растяжение. Если отражение прошло успешно, т. е.

$$/ (X_{n+3}, \nabla f) < / (X_{n+2}, \nabla f),$$

то продолжаем дальше растягивать симплекс (рис. 15, б) в соответствии с соотношением

$$X_{n+4} = X(n+2) + c (X_{n+3} - X_{n+2})$$

где c представляет собой коэффициент растяжения. Если растяжение успешно, т. е. если

$f(X_{n+4}) < f(X_{\text{хорошее}})$, то $X_{\text{плохое}}$ заменяется на X_{n+4} . В противном случае $X_{\text{плохое}}$ заменяется на X_{n+3}

Сжатие. Если отражение не успешно в том смысле, что $f(X_{n+3}) > f(X_i)$ для всех $i \neq \text{плохая}$, то симплекс сжимается (рис. 15, в) в сторону от центра тяжести X_{n+2}

$$X_{n+5} = X(n+2) + b * (X_{\text{плохая}} - X_{n+2}),$$

где $0 < b < 1$ — коэффициент сжатия. $X_{\text{плохая}}$ заменяется на X_{n+5} .

Редукция. Если сжатие не успешно в том смысле, что $f(X_{n+3}) > f(X_{\text{плохое}})$, то симплекс уменьшается. Уменьшение происходит в сторону вершины с наименьшей целевой функцией $X_{\text{хорошее}}$ (из рис. 15, г). Координаты вершин пересчитываются:

$$X_i = X_{\text{хорошее}} + d * (X_i - X_{\text{хорошее}}), \quad i = 1, \dots, n+1.$$

Здесь $d < 1$ — коэффициент редукции.

С приближением к минимуму уменьшается и многогранник. Авторы метода предлагают следующий критерий окончания поиска:

$$\left(\frac{1}{n+1} * \sum_{i=1}^{n+1} (f(X_i) - f(X_{n+2}))^2 \right)^{0.5} \leq \varepsilon$$

где ε - произвольно малое число, от которого зависит точности и время оптимизации.

Деформируемый многогранник адаптируется к топографии целевой функции, вытягиваясь вдоль длинных наклонных плоскостей, сжимаясь в окрестности минимума, Он ползет по дну оврага (возможно, не так точно, как в методах Ньютона или переменной метрики) и достигает окрестностей минимума.

Конечно, стратегия метода зависит от выбора коэффициентов a, b, c, d . В литературе можно найти следующие рекомендации по их выбору:

$a = 1; b = 0,5; c = 2; d = 0,5$.

Решение задач линейного программирования с помощью EXCEL

Решение задач линейного программирования с помощью ACCES

ЛИТЕРАТУРА

1. Зоткин В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении. М.; Высшая школа, 2004г.
2. Материаловедение и технология металлов./Под ред. Фетисова Г.П. - М: Высшая школа, 2007г. – 862с.
3. Марочник сталей и сплавов. Под ред. Зубченко А.С. М: Машиностроение/ 2003г.-784с.
4. Задачи по выбору материалов в зависимости от условий работы деталей и конструкций: Учеб. пособие/ Бровер Г.И., Пустовойт В.Н., Бровер А.В.– Ростов/Дону: Издательский центр ДГТУ, 1997г.
5. Геллер Ю. А. и др. Металловедение. Методы анализа, лаб. работы и задачи. 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990. 412 с
6. Гуляев А. П. Выбор марки стали для деталей машин// Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1983, № 1. С. 54-59.
47. Мальцев И. М. База данных и алгоритмы программного комплекса выбора марки машиностроительной стали / Вестник машиностроения. М.: Машиностроение, 1999. № 7, С. 14 - 17.
8. Крупин Ю. А., Кудря А. В., Мельниченко А. С. Компьютерные технологии в металловедении //Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1999. № 4. С. 35 - 39.