

11 коп.

Индекс 70067

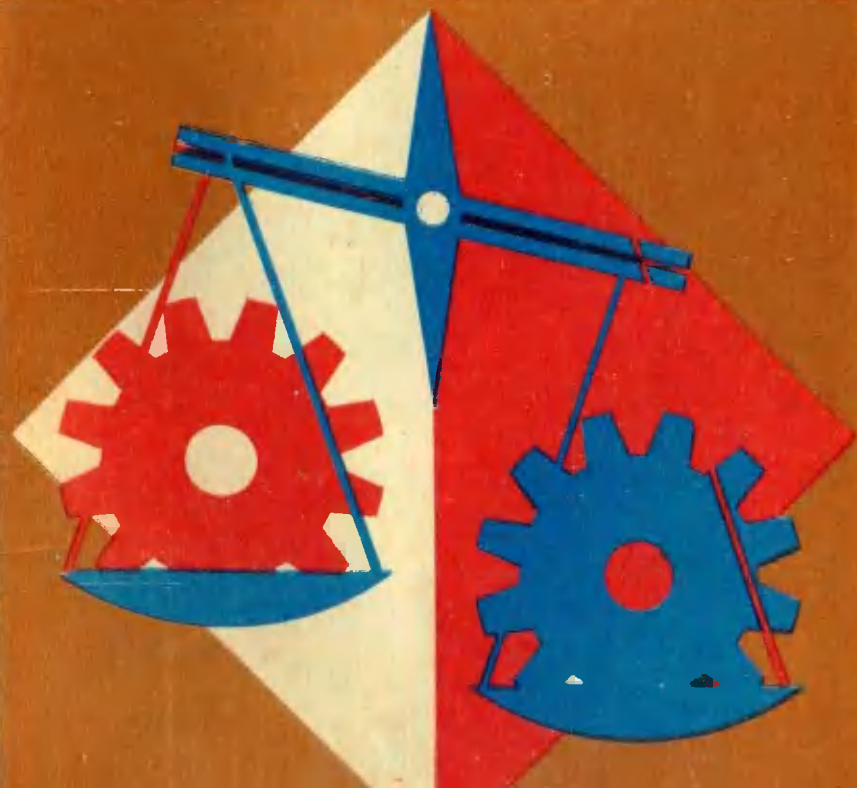
НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

1/1975

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

М. Н. Шрайбер
СОЗДАНИЕ
НОВОЙ ТЕХНИКИ
И
МЕТАЛЛОЕМКОСТЬ



Шрайбер М. Н.

Ш85 Создание новой техники и металлоемкость. М., «Знание», 1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 1. Издается ежемесячно с 1961 г.)

Один из наиболее реальных и важных путей снижения металлоемкости при создании новой техники — повышение качества проектных разработок. Автор рассматривает современную методологию проектирования, прослеживает тенденции внедрения вычислительной техники и экономико-математических методов в опытно-конструкторские разработки, описывает различные способы оптимизационного моделирования. Кроме того, читатель узнает о роли новых материалов, прогрессивной технологии, последних представлений о структуре металла в борьбе за снижение металлоемкости изделий.

Брошюра рассчитана на ученых, инженеров, техников — создателей новой техники, а также на всех, кто следит за развитием научно-технического прогресса.

31100

СПЗ

Введение

Металлы — основной на сегодня конструкционный материал. С тех пор как человечество познакомилось с ними, прошли тысячелетия. Металлы обеспечили многие достижения современной цивилизации, многое обещают в будущем и заслужили того, чтобы мы позаботились об их рациональном расходовании. Снижение расхода металла на производство намеченного ассортимента изделий даст возможность выделять дополнительные материальные ресурсы на решение новых задач. Вообще, с точки зрения интересов народного хозяйства нашей страны добиваться экономии сырья за счет совершенствования производства в обрабатывающей промышленности гораздо выгоднее, чем эти же количества сырья дополнительно производить. Снижение материалоемкости выпускаемой в стране продукции только на один процент равнозначно дополнительному росту национального дохода на 3—4 млрд. руб.

В эпоху научно-технической революции развитие новой техники, с одной стороны, позволяет создавать технические устройства с высокими технико-экономическими характеристиками, с другой — предъявляет серьезные требования к количеству и качеству используемой металлопродукции. Экономия металлов в новых условиях — задача далеко не простая, ее невозможно решить без привлечения новых методов и новых средств.

Металлы по удельному весу в стоимостном выражении стоят на первом месте среди других материалов. Это отражает особую их роль, связанную с универсальностью применения. Стоимость машин, приборов и инструментов, изготовленных главным образом из черных металлов, — около 40% промышленно-производственных основ-

ных фондов. Доля затрат на металл в общем объеме материально-производственных ресурсов по анализу отчетных данных межотраслевых балансов, проведенному несколько лет назад, равна примерно 27%.

Удельный расход проката на 1 млн. руб. товарной продукции в машиностроении — 500 т, а в капитальном строительстве — 400 т. В отдельных отраслях машиностроения удельный расход проката еще выше, например, в тяжелом машиностроении — порядка 700 т, в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении — около 900 т, в автомобилестроении — 500—600 т.

В связи с большой ролью проката черных металлов в народном хозяйстве пятилетним планом предусмотрено сокращение его расхода на 18—20% в машиностроении и металлообработке и на 9—11% в строительстве.

Задачи снижения металлоемкости и развития новой техники находятся во взаимной связи. С одной стороны, экономия металла обусловливается широким применением новых методов и средств, разрабатываемых современной промышленностью. С другой — создание необходимых народному хозяйству изделий требует больших ресурсов металла, которые рационально получить за счет его экономии.

Наиболее тесная связь между научно-техническим прогрессом и металлоемкостью в машиностроении и металлообработке, строительстве, железнодорожном транспорте и сооружении магистральных трубопроводов, поглощающих около 85% металлопродукции. Новые конструктивные и технологические решения, тяжелые условия работы значительно влияют на характер использования металлов (увеличение скоростей, давлений, температур, размеров конструкций, применение сварки, штамповки, точного литья и т. п.).

В пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. предусмотрено снизить материалоемкость производства благодаря совершенствованию отраслевой структуры промышленности, улучшению конструкций машин, аппаратов, приборов и других изделий, применению прогрессивной технологии, повышению качественных характеристик сырья и материалов, более полному и комплексному их использованию.

Удельный вес отдельных путей уменьшения затрат материалов в девятой пятилетке может быть ориентировочно оценен следующим образом:

совершенствование конструирования — 15—20%;

улучшение технологии обработки и повышение коэффициента использования — 20—25%;

повышение качества материалов, применение экономичного проката — до 50%;

эффективная замена — примерно 10%.

Снижение металлоемкости должно проводиться на всех стадиях создания изделий и конструкций. Следует особо подчеркнуть значение в этом деле стадии проектирования, во многом предопределяющей показатели продукции, в том числе ее металлоемкость. Анализ показывает, что в отдельных отраслях до 85% затрат формируется на стадии проектирования. Важно также учитывать то, что недодуманное в проекте в дальнейшем весьма трудно исправить из-за необходимости переделок материальной части, больших убытков и недостатка времени.

Принятие эффективных решений в проекте становится доступнее при имеющемся уже сейчас ресурсе вычислительной техники, в то время как нужные новые материалы, прокат и технологическое оборудование пока остаются дефицитными.

Оптимизация и конструкторские решения

Все пути экономии конструкционных материалов тесно связаны с усовершенствованием способов принятия инженерных решений, внедрением количественных методов, новейшей вычислительной техники. Крайне необходимо все более широкое применение математических методов.

Минимизация расхода ресурсов издавна присутствовала в задачах технического конструирования, но до недавнего времени в неявном виде. Сегодня можно утверждать, что конструктору необходимо иметь в своем арсенале методы, разработанные в экономике для анализа соотношения затрат и эффективности. Создается теория конструирования, имеющая теоретический фундамент в виде системотехники, теории статистических решений, вычислительных методов для выбора оптимальных или удовлетворительных альтернатив, эвристических методов для решения задач, не поддающихся полной формализации. Имеется фонд математического обеспечения — алгоритмов и машинных программ. Практика показывает, что проектирование с применением машин позволяет сэкономить материалов на 20—30% больше по сравнению с обычными методами.

Для выработки и принятия оптимальных решений требуется переработка такого количества информации, что необходимо использование электронно-вычислительной техники. В настоящее время, в рамках вычислительных машин третьего поколения, в СССР и в странах социалистического содружества разрабатывают и создают ЭВМ с производительностью более миллиона операций в секунду и периферийное оборудование, облегчающее диа-

лог человека и машины. Многого можно добиться от ЭВМ и при автоматизации проектных работ и технологической подготовки производства. Здесь можно улучшить до 15% технико-экономические показатели, получить значительную экономию материалов в связи с повышением точности расчетов и улучшением качества проектирования. Одновременно резко сокращаются сроки проектирования, что позволяет внедрить в практику достижения науки и техники до того, как они морально устареют.

В создании оптимальных конструкций наряду с инженерными решениями, опирающимися на опыт и интуицию, получает все большее применение теория оптимальных систем, основанная на вычислительных алгоритмах. Это быстро развивающаяся дисциплина. **Идея оптимизации — центральная идея в науке и технике последних десятилетий.**

В принципе оптимизация — это выявление способов делать все наилучшим образом. Такие способы могут найти применение на всех этапах создания продукции, поэтому мы вкратце охарактеризуем их.

Простейший (и наглядный) пример оптимизации — фокусировка бинокля, когда положение линз определяется наибольшей резкостью изображения. Цель здесь — наибольшая резкость изображения, регулируемая (или управляемая) изменением положения винта, устанавливающего взаимное расстояние линз.

На практике задача свободного нахождения экстремума без учета ограничений встречается только в виде исключения. Обычно решению задач сопутствуют известные ограничения, например в виде законов природы (их можно выразить алгебраическими дифференцированными уравнениями механики или физики), а также ограничения в виде наличных ресурсов, требований к экономичности, безопасности и т. п. (выражаются, как правило, неравенствами). Найти экстремум важно не вообще, а лишь тогда, когда при этом выполняются не зависящие от исполнителя ограничения, которые составляют существенную часть рассматриваемой задачи.

Математическая постановка задачи оптимизации сводится к следующему. Пусть существуют некоторые переменные и некоторая их функция, экстремальное значение которой соответствует достижению поставленной цели. Кроме того, имеется ряд условий (ограничений), которые записываются в виде некоторого числа равенств или не-

равенств, куда входят эти переменные. Сами переменные должны удовлетворять требованию неотрицательности, т. е. не должны быть меньше нуля. Количество ограничений (в виде равенства) не должно превышать количества переменных. Если они равны, то задача оптимизации становится тривиальной, так как возможен только один вариант, удовлетворяющий всем ограничениям, и он и есть оптимальный.

Задача оптимизации складывается из двух частей — определение области допустимых решений и нахождение оптимального решения, лежащего в этой области. Область допустимых решений — совокупность неотрицательных решений, удовлетворяющих ограничениям. Совокупность значений переменных называют программой. Множество программ, удовлетворяющее ограничениям — это допустимые программы, а допустимая программа, обеспечивающая наилучшее решение задачи, — оптимальная программа.

На протяжении почти двух столетий единственными математическими методами для решения задачи оптимизации оставались дифференциальное и вариационное исчисление, известные из курса высшей математики.

Отыскание оптимальной программы — задача новой науки, программирования, или математического программирования (иногда называется оптимальным программированием). Последнее название многие считают не вполне удачным, так как можно спутать это направление с составлением программ работ вычислительных машин. Поскольку термин «решение» может быть заменен термином «план», то предлагалось заменить название программирование планированием, что неудобно по тем же причинам. Термин «оптимальное управление» для указанных задач также иногда применяется, хотя и он не вполне удачен. Член-корреспондент АН СССР Н. Н. Моисеев использует новый термин «программатика» — для обозначения вопросов, связанных с построением оптимальных решений.

Математическое программирование — область математики, в которой разрабатываются теория и численные методы решения многомерных задач с ограничениями, т. е. задач на экстремум функции многих переменных с ограничениями на область их изменения.

Общая задача программирования для оптимизации решения допускает геометрическую интерпретацию. Сово-

купность переменных (программу) можно рассматривать как множество точек в той части многомерного пространства, которая соответствует неотрицательным координатам. В этой области точки, характеризующие допустимые программы, образуют тело, имеющее размерность, равную числу степеней свободы, т. е. числу переменных за вычетом числа ограничений в виде равенств.

Для дальнейшего решения — выделения из допустимых программ оптимальной — нужно представить в том же пространстве целевую функцию в виде семейства поверхностей, соответствующих ряду ее значений. Решением является нахождение точки тела допустимых программ, которая соответствует экстремальному значению целевой функции.

В случае когда есть две степени свободы, задача может быть сведена к графику на плоскости. При двух переменных можно процесс оптимизации изобразить на плоскости в квадранте положительных значений декартовых координат, отнесенных к рассматриваемым переменным. Область допустимых решений определяется линиями, соответствующими ограничениям. Если их пересечение имеет место вне данного квадранта, то эта область определяется также участками осей координат. Образуется фигура, на границах которой ищутся оптимальные решения.

Геометрическая интерпретация задачи программирования облегчает решение задач с малой размерностью. Однако практически таких задач немного, в связи с чем предложен и разрабатывается ряд методов, позволяющих с помощью ЭВМ решать задачи большой сложности.

Методы математического программирования могут быть разделены на одношаговые и многошаговые, линейные и нелинейные, а также аналитические и численные. Не существует пока однозначных рецептов для выбора методов программирования, поэтому ниже приводится характеристика некоторых наиболее применяемых.

Большая потребность практики в экономико-математических методах обусловила значительное развитие в последнее время тех методов оптимизации, которые не создают больших вычислительных трудностей. На первом месте, без сомнения, стоит линейное программирование, в котором целевая функция и ограничения выражаются линейными соотношениями переменных. Для таких задач, даже при достаточно большом числе степеней сво-

боды, разработаны эффективные методы, например, симплекс-метод и метод корректировки оценок. Разработаны алгоритмы решения ряда типовых задач — транспортной, распределения оборудования, назначения, потоков и сетей, заключения контрактов, анализа использования ресурсов, диеты, потерь, поставок, хранения, деятельности коммивояжера, стратегии игр двух партнеров и т. д.

Выбор из всех возможных проектов такого, который позволил бы реализовать заданную функцию при минимальных затратах материала и труда, — основная задача недавно разработанной математической дисциплины — геометрического программирования, прекрасного инструмента предварительного инженерного анализа. Известно, что действенность решений тем больше, чем ранее они принимаются, так как их реализация на ранней стадии не связана с другими решениями и с невозможностью использовать ранее произведенные затраты. В методе геометрического программирования задача, благодаря пренебрежению несущественными усложнениями, сводится к так называемой нулевой степени трудности, а в дальнейшем доводится до необходимого уровня точности.

Сведение задач программирования к линейной постановке крайне желательно, ибо это самый реальный и быстрый путь практического использования их решений.

Чаще, однако, мы имеем дело с задачами нелинейного программирования. Если функции цели и ограничения нелинейны, а размерность задачи, т. е. количество степеней свободы, не допускает геометрической интерпретации, то для таких задач пока не существует общих методов решения (за исключением случая квадратичного программирования — линейное ограничение и квадратичная целевая функция). Существуют, правда, итеративные методы приближения к экстремуму, линейная аппроксимация выпуклой поверхности, ограничивающей область допустимых решений, позволяющие решать задачу в частных случаях.

Задаче выпуклого программирования можно поставить в соответствие взаимную задачу программирования с более сложной целевой функцией, но с простыми ограничениями, решение которой эквивалентно решению исходной задачи, что иногда более удобно.

В тех случаях когда целевая функция сложна и целесообразно ее значения в процессе решения задачи определять численно, измерениями в отдельных точках или в

некоторые моменты времени, прибегают к методу поиска — последовательного анализа результатов попыток оптимизации, осуществляемых начиная из некоторой исходной точки во времени и пространстве. Такой подход применяется и в задачах нелинейного программирования, и при экспериментальных исследованиях.

Оптимизацию, проводимую методом поиска, можно образно сравнить с исследованием пещер. Исследователь, проникший в группы связанных между собой пещер, естественно, хочет достигнуть наибольшей глубины; однако он может осветить и обследовать рельеф местности лишь в непосредственной близости. Такая обстановка соответствует условиям поиска экстремума в задачах оптимизации. В нашем сравнении имеют место и различные ограничения в виде неравенств — например, стена, преграждающая путь, и в виде равенств — узкие проходы, предопределяющие направление.

На этом примере можно проиллюстрировать один из возможных методов поиска. Стремясь достичь наибольшей глубины, исследователь, по-видимому, в каждой точке пути будет выбирать наибольший уклон спуска. В случае если это приведет его в такую точку, где любое направление будет связано с подъемом, он убедится, что достиг местного (локального) минимума. Такое может случиться и на свободном от ограничений месте, и при движении, обусловленном ограничениями. Во втором случае обнаружение нижней точки упрощается, так как поиск направления отпадает. В теории оптимизации такой метод носит название градиентного, он имеет ограниченное значение, так как не дает уверенности, что нет более низкого уровня экстремума, подобно тому, как в пещере после ложбины может достаточно близко находиться яма.

Воспользуемся нашей аналогией и рассмотрим случай овражности, т. е. сильно вытянутой вдоль какой-либо линии впадины. Тут градиентный метод неэффективен, так как из любой точки он ведет к ближайшему месту дна оврага, а дальше движение, в зависимости от принятого направления, сильно замедляется; а если поменять направление, можно проскочить на противоположный склон либо возвратиться на исходную поверхность (особенно при искривленной оси оврага). «Овражные» неприятности в литературе характеризуются как склонность процедуры поиска «тыкаться» в стенки оврага, подобно слепому.

му щенку, вместо того, чтобы плавно съезжать по дну, отслеживая его возможные извилины.

Один из методов улучшения процедуры поиска в сложной ситуации состоит в том, что при остановке или значительном замедлении движения делается большой случайный шаг, и процедура поиска повторяется. Если она приведет нас в другую точку, то в первом поиске экстремум еще не был обнаружен. Тогда поиск продолжается по направлению, соединяющему конечные точки обеих попыток, и обычно достаточно быстро приводит к желанному результату: это один из примеров применения элементов случайного поиска.

В настоящее время существует много способов случайного поиска, конкурирующих между собой. Возможный вариант — полная произвольность выбираемого направления и величины шага. При этом приходится решать такие сложные вопросы теории вероятностей, как генерация рядов случайных или псевдослучайных чисел, анализ результатов большого числа измерений и т. д. Рациональным может оказаться последовательный случайный поиск, который особенно удобен, когда критерии содержат много переменных или вообще не имеют аналитического выражения.

Основной результат разработки методов поиска — возможность автоматизации нахождения оптимума благодаря использованию соответствующих алгоритмов и современной вычислительной техники. Операции по поиску лучшего варианта решения могут быть заданы формально и отданы на откуп ЭВМ, за человеком остается руководящая роль при назначении структуры и логики процесса.

Динамическое программирование — эффективный вычислительный многошаговый метод оптимизации. Если трудно оптимизировать весь процесс, то можно разделить его на множество шагов и находить решение для каждого шага. Очевидно, однако, что, найдя оптимальное решение для каждого шага, можно не прийти к оптимизации всего процесса, и наоборот, невыгодное решение на отдельном шаге позволит наименее выгодным образом описать процесс в целом. Пример — жертва фигуры в шахматах, явно невыгодная с точки зрения отдельного хода, но обеспечивающая выигрыш всей партии. В динамическом программировании оптимизируются все следующие за данным шагом операции. Оптимальная стратегия имеет

то свойство, что каждое последующее решение должно определять оптимальную стратегию относительно состояния, полученного в результате предыдущего решения.

Преимущества метода динамического программирования также в том, что при его применении нет опасности попасть в ловушку частного (локального) экстремума; при решении всегда находится общий (глобальный) экстремум. Ограничения рассматриваемых воздействий не только не препятствие для решения, но, наоборот, облегчают вычисления. Вместе с тем трудоемкость вычислений растет достаточно быстро при увеличении количества рассматриваемых параметров, что дает повод говорить о так называемом «проклятии размерности». При решении задач методом динамического программирования необходим большой объем памяти, так как запоминаются решения всех промежуточных шагов. Метод значительно сокращает вычисления по сравнению с полным перебором вариантов, а расчеты можно упростить, применив последовательные, так называемые рекуррентные формулы.

В современной практике приходится сталкиваться с задачами, в которых параметры не точно определены, а случайны. Особенно часто такие задачи возникают при создании новых конструкций, например, случайными величинами описываются механические характеристики материалов, технология производства и обработки которых не вполне стабильны. Тогда говорят о задаче **стохастического программирования**, которое пока находится в начальной стадии развития.

Методы программирования не единственные новые математические методы, нужные для улучшения инженерных решений, но пока они наиболее практически применимы. В то же время их возможности ограничены, и в дальнейшем арсенал математических средств при решении вопроса о снижении металлоемкости должен быть расширен. Об этом будет сказано при рассмотрении конкретных задач, возникающих на отдельных этапах создания изделий (см. раздел «Оптимизационные модели проектирования конструкций»).

О традиционном проектировании

Работа по улучшению конструкций машин, агрегатов и других металлоемких изделий промышленности слож-

на и многогранна, она тесно связана с практической реализацией достижений научно-технического прогресса. Необходимо создавать и внедрять принципиально новые орудия труда, превосходящие по своим технико-экономическим показателям лучшие отечественные и мировые достижения. Большой вес изделия, как известно, вовсе не свидетельствует о его высоких технических качествах. Наоборот, как правило, технически передовым является более легкое изделие. Но уменьшить вес машины, сохраняя или даже улучшая ее технические данные, нельзя без качественно новых конструкторских решений.

Один из важнейших технико-экономических показателей машин и конструкций — отношение их веса к единице мощности, например, на 1 л. с. для двигателей и генераторов, на 1 т грузоподъемности транспортных средств и т. д. Конструктивная металлоемкость — это «чистый» вес машин, узлов и деталей без отходов производства; при этом учитывается расход металла в результате реализации тех или иных конструктивных решений.

Металлоемкость машин, например, можно снизить, повысив единичную мощность. Это относится к турбинам, паровым котлам, экскаваторам, турбогенераторам, тепловозам, грузовым автомобилям, гусеничным тракторам. Так, если мощность турбины увеличить с 2500 до 100 тыс. кВт, удельная металлоемкость сокращается в 6,5 раза. Вообще, увеличение мощности машин облегчает создание экономичных конструкций.

Как примеры новых схем, в числе прочих достоинств имеющие пониженную металлоемкость, можно указать на новые кинематические схемы приводов и передач — безредукторный групповой привод, стартер для увеличения мощности привода прокатного стана с подшипниками жидкостного трения, глобоидные редукторы, зубчатые передачи Новикова, клиноременные передачи.

Новые принципы, например, применение навесных сельскохозяйственных орудий, газовых турбин вместо обычных, непрерывность действия машин и пр., также способствуют снижению удельной металлоемкости агрегатов.

Уменьшить вес конструкций можно, используя те возможности, которые выявляются в процессе развития нашей промышленности — расширение границ возможного выбора материалов и видов проката.

Для новой техники характерны применение высоких

уровней энергии, большие скорости, вплоть до космических, резко изменяющиеся процессы, часто почти мгновенные, но огромной максимальной интенсивности.

Благодаря современным методам управления машины могут работать в высоком темпе, осуществлять и испытывать интенсивные силовые, температурные и другие воздействия. Вместе с тем форма их частей иногда очень сложна. Многое в интересующем нас плане зависит не только от улучшения условий для создания конструкций и от изобретения новых принципов, но и от усовершенствования методов создания изделий, повышения уровня принимаемых конструкторских решений на всех этапах.

Итак, конструкторские решения. Традиционно широкое применение графического изображения, вычерчивание задуманной конструкции в виде проекций на координатные плоскости. Отсюда, возможно, этот этап работы получил название проектирования. Воплощенное в чертежах с той или иной степенью детализации, будущее техническое устройство уже представляет собой один из видов модели, которая позволяет проверить геометрические, габаритные или кинематические требования к разрабатываемой конструкции, назначить первоначальные размеры элементов. Далее, обычно, дело переходит к расчетам, где на основании математического описания процессов — изменения напряженно-деформированного состояния или температурного поля — выявляются опасные точки или зоны, возникающие под влиянием внешних воздействий. Сравнение с нормативными и опытными данными полученных расчетом результатов даст возможность оценить задуманную конструкцию, и если требования выполняются, перейти к ее осуществлению в металле. Графическое представление и формулы расчета — все это виды моделей, благодаря которым частично можно заранее анализировать свойства объекта.

При таком подходе мы различаем последовательность двух этапов — возникновение замысла конструкций в одном или в нескольких вариантах и их проверка по геометрическим или аналитическим представлениям. Здесь речь идет о генерации вариантов и об инженерном анализе. В первом процессе основную роль играет человек или коллектив — авторы проектируемой конструкции. Поэтому принятые до настоящего времени методы проектирования характеризуются в значительной мере

эмпирикой, ремесленностью, интуитивностью. Как на этапе определения общего образа и схемы объекта и основных параметров, так и при подробной конструктивной разработке, решения принимаются во многом на базе аналогии, интуиции и воображения.

Выбор и обоснование схемы, особенно новой, связаны с серьезными трудностями. Множество возможных вариантов структуры и других параметров, как правило, достаточно велико, поэтому в большинстве случаев выбор осуществляется с использованием приемов интуитивного характера (с последующей проверкой удовлетворения поставленным требованиям). Это путь «проб и ошибок». Даже при его неоднократном применении и последовательном улучшении результата он позволяет отыскать лишь допустимое решение, а не оптимальное, вероятность близости к которому крайне мала.

В принципе все трудности могут быть разрешены полным перебором возможных вариантов и их сравнением: выделяется бесспорно лучший и достойный осуществления. Однако перебор по мере увеличения количества вводимых параметров приводит к очень быстро растущему числу комбинаций, и даже в сравнительно простых задачах перебор становится неосуществимым и при использовании современных вычислительных машин.

Например, если состояние системы характеризуется более чем восемью входными параметрами, каждый из которых может иметь только два значения, то количество вариантов состояний превысит число электронов и протонов во всей Вселенной. Рост сложности с увеличением числа элементов, связей, взаимодействий может происходить весьма бурно, и усовершенствование вычислительной техники, имеющей пределы быстрого действия и продолжительности работы, не спасает нас от неприятностей.

Обычные методы разработки конструкции приводят зачастую к ее утяжелению. В самом деле, задуманные варианты могут в принципе содержать произвольные запасы прочности. Расчетная проверка позволяет выявить те из них, которые не удовлетворяют некоторым неравенствам, например ограничениям сверху наибольших напряжений, деформаций, температур, частот и амплитуд колебаний. Конечно, конструктор в ряде случаев заинтересован в ограничении веса по требованиям задания или

для обеспечения функционирования, но в самом процессе проектирования с помощью традиционных графических и расчетных моделей тенденций к ограничению и тем более оптимизации веса не заложено. Поэтому, необходимо привлечь к разработке конструкций такие виды проектирования, которые способствовали бы всемерному улучшению конструкторских решений, в частности по критерию снижения веса.

Только ли опыт? Только ли теория?

При конструировании новых машин принято использовать достоинства моделирования физического, аналогового, математического. Особенно широкие возможности при требовании достаточно полно отображать действительность открывают математические модели. Любое знание о предмете — это модель предмета, сложившаяся в сознании. Углубление знаний сопровождается уточнением модели, которое приводит к усложнению операций с ней. Преодолеть эти сложности позволяют современные быстродействующие вычислительные машины.

Применение ЭВМ для решения задач математического моделирования сложных объектов привело к смещению центра тяжести исследований в сторону разработки эффективных вычислительных алгоритмов. Для современного подхода характерно изменение отношения к значимости аналитических и численных методов. Раньше задача считалась решенной только при нахождении аналитического решения, а численное считалось суррогатом, частным решением конкретного случая, не позволяющим анализировать результат. В настоящее время в связи с успехами теории алгоритмов роль численных методов становится иной. Основа современного научного метода создания технических устройств — выбор критерия, построение модели и отыскание решения. В этом — суть.

Моделирование это определение цели, выявление основных процессов, составление модели, отражающей основные процессы, абстрагируясь от несущественных обстоятельств. Такая трактовка предопределяет упрощение, схематизацию модели по сравнению с натурой. При-

нимать решения с помощью моделей значительно проще, скорее и дешевле, чем эксплуатационно доводить образец.

Моделировать только процессы, протекающие в природе, а следовательно, и внутри создаваемых объектов, в настоящее время недостаточно; мы получаем возможность проверки допустимости принятого решения, но не гарантированы в том, что отыскиали лучший подход. Возникла необходимость в создании более сложных моделей, в которые бы входил процесс проектирования. С их помощью можно определять оптимальные характеристики технических устройств заданного типа, т. е. решать задачи оптимального проектирования в НИИ и КБ.

Подведем итоги. Следовательно, модели могут быть двух видов — функционирования и проектирования. В первом случае возможен только анализ принятых решений сравнением вариантов функционирования при различных принятых конструктивных решениях, второй позволяет проводить синтез путем автоматизации процесса принятия решений о параметрах конструкций с помощью ЭВМ.

Традиционный порядок проектной работы, как уже говорилось, — формулировка технического задания, разработка и утверждение эскизного проекта, составление технического проекта, создание документации, необходимой для производства. Всякий, имеющий к этому отношение, знает, что в процессе производства происходят многочисленные изменения. Они воспринимаются как неизбежное зло. Так было до сих пор.

Современную систему создания образцов отличает сложный подход — одновременная, параллельная разработка и конструирование, изготовление опытного образца и подготовка серийного производства. При таком подходе гарантируется эффективное использование ресурсов, преодолеваются трудности введения технологических изменений в процессе производства. Это, кстати, во многом зависит от правильного решения организационных вопросов, чему способствует постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о некоторых мероприятиях по дальнейшему совершенствованию управления промышленностью. Предусматриваемое постановлением соединение производственных, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций способствует четкой ответственности за научно-технический прогресс,

за улучшение технико-экономических показателей. Появляется необходимость рассматривать не только отдельные технические устройства, но также системы устройств с точки зрения взаимодействия последних и учитывать влияние внешней среды.

Вот, например, разработка и производство каких-либо изделий, состоящих, в свою очередь, из ряда агрегативных элементов и находящихся в связи между собой. Большое число элементов, даже простых, затрудняет, как известно, процесс создания изделий. Для совокупности из n изолированных элементов достаточно n исследований, но если рассмотреть множество состояний системы, учитывая только две возможности — существование и отсутствие каждой из связей, то при десяти элементах число состояний больше 10^{27} , т. е. поистине астрономическое число.

Особенность создания новых и сложных изделий — в многоступенчатой схеме разработки: вслед за проектированием и изготовлением проводится их экспериментальная отработка, в них вносятся соответствующие изменения, затем собирается, испытывается и дорабатывается опытный образец в целом. После этого с учетом необходимых изменений изготавливают узлы головного образца. Их также испытывают и дорабатывают в отдельности. Затем собирают и эксплуатируют в опытном порядке головной образец и на этом этапе также усовершенствуют его. И только тогда приступают к выпуску серийной продукции. И на всем этом длинном пути необходимо уделять внимание улучшению конструктивных решений и возможному максимальному облегчению конструкций.

Модель проектирования отражает не только чисто теоретические этапы разработки, но и использование данных последующих экспериментальных работ, а также указанную выше агрегатную структуру сложных изделий и соответствующую последовательность отработки.

Для отдельной части изделия остальные части можно рассматривать как внешнюю среду, и их влияние можно изучать на модели всего изделия или узла совместно. Рассматривать изделие необходимо в сочетании с внешними воздействиями — окружающей средой. Таким образом, модели проектирования для разработки устройств из отдельных частей или узлов должны строиться, как говорится, с точки зрения макро- и микроподхода в

большом и в малом, причем в обоих случаях рассматривается внешняя задача и внутренняя. Внешняя охватывает взаимодействие среды с объектом, а внутренняя — уточнение его свойств и характеристик с учетом влияния полученных в процессе решения внешней задачи параметров внешних воздействий.

Математические модели проектирования или модели принятых решений при проектировании, согласно современным взглядам, могут быть трех видов — оптимизационные, игровые и имитационные. Первые используют описанные выше теорию оптимизации, методы математического программирования, широко внедряемые в практику вычислительные машины второго поколения и математическое их обеспечение — алгоритмические языки. Применение оптимизационных моделей — большой шаг вперед в деле улучшения и облегчения конструкций, но они не всегда соответствуют быстро растущим требованиям.

Игровые модели также базируются на современной вычислительной технике и на теоретических разработках по игровым методам и теории принятия решений, но они пока в стадии развития. Уже, однако, ясно, что существует необходимость, а одновременно и возможность в связи с появлением вычислительных машин третьего поколения перейти в дальнейшем и к имитационным моделям, в которых человек ведет диалог с машиной.

Возникновение нового направления моделирования вызвано тем, что радужные надежды на полную автоматизацию операций разработки изделий не оправдались. Вместо лозунга 60-х годов — передавать как можно больше операций ЭВМ — культивируется новая мысль — правильно сочетать работу человека и ЭВМ, руководствуясь критерием максимальной эффективности, доверяя профессионально натренированным лицам принимать решения на основании формализованных проработок, что дает существенные результаты в работе по улучшению и облегчению конструкций металлоемких изделий и сооружений.

Информация, необходимая для проведения тех или иных операций, может быть представлена в различной форме. Возможны определенные предписания или рекомендации, которыми руководствовалась бы оперирующая сторона, таковы в большинстве случаев существующие стандарты, нормы и правила, действующие в про-

мышленности. Зачастую они включены в техническую литературу, в том числе и учебную, и фактически отражают представления специалистов, результат их практической деятельности.

Другая форма исходной информации — сообщение сведений о методах, с помощью которых может быть принято то или иное решение, но не содержащих непосредственно указаний по данному вопросу. Нельзя, по-видимому, полностью отвергать ни ту ни другую постановку вопроса — первую ввиду ее простоты, вторую — в связи с большой общностью.

Вместе с тем по мере усложнения предмета, возникновения все более глубоких проблем роль методологической информации растет, а для бурно развивающихся отраслей техники такое ее представление становится почти единственно возможным. Не преклоняясь более перед абсолютным авторитетом опыта и экспериментальных исследований, следует помнить, что говорил великий Гексли: «Математика, подобно жернову, перемалывает то, что под него засыпают, и надо за засыпкой бдительно наблюдать».

Следует иметь в виду, что вопрос о критериях оценки методов очень не прост и пока недостаточно разрешен. Можно утверждать, например, что вес конструкции при прочих равных условиях снизится при увеличении соответствующей механической характеристики, например, предела прочности, которым обладают новые марки высококачественных сталей. Но как быть с возможной неустойчивостью, динамичностью, сложностями при обработке и т. п.?

Оптимизационные модели проектирования конструкций

Приложение математических методов и вычислительных средств требует количественного определения задачи, для чего нужно условиться о форме математического описания веса изделия. Выражение для веса конструкции достаточно просто — объем конструкции умножается на удельный вес материала. Для улучшения или оптимизации необходимо найти наименьшее значение выражения, которое представляет собой сумму весов отдельных

элементов или некоторый интеграл — при плавных очертаниях конструкции.

Вопрос кажется элементарным, но необходимо иметь в виду, что размеры конструкции и выбор материалов для нее определяют ее работоспособность, что связано со многими ограничениями. Поэтому задачу уменьшения веса следует рассматривать как минимизацию некоторой функции при наличии ряда ограничений. К сожалению, даже при простом виде функции, определяющей цель, весьма сложны выражения ограничений. Задача состоит в определении минимума некоторого математического выражения или минимизации его. Минимизация — один из видов экстремальных задач, охватывающих, кстати, и максимизацию.

Вес конструкции выражается рядом переменных или функций от переменных, отражающих факторы, размеры или форму изделия и удельные веса материалов. Факторы могут быть разделены на две группы: заданные, на которые мы влиять не можем, и зависящие от нас, которые в некоторых пределах мы можем выбирать. Задачи по оптимизации веса обычно связаны с нелинейным программированием. Целевая функция может быть линейной, если вес отдельных элементов зависит только от одного, определенного конструктором размера. Например, вес гладкой обечайки данных радиуса и длины из определенного материала зависит только от толщины оболочки. В других случаях в целевую функцию могут входить произведения двух, а возможно, и трех размеров элемента конструкции — целевая функция нелинейна. Ее называют мультипликативной, и она может быть сведена к линейной заменой переменных, например, введением логарифмических координат. Вес в данном варианте — показатель эффективности принимаемого конструкторского решения, и мы должны найти такие зависящие от нас факторы, которые делают его минимальным.

Наиболее реально, как кажется, проверить все возможные варианты, но это возможно лишь в простых случаях.

Рассматривать задачу оптимизации веса конструкций без учета ограничений нельзя. При разработке необходимо иметь математическое описание функционирования изделия, согласное с данными о законах природы. В механических системах должны учитываться условия равновесия, неразрывности деформации. Одновременно

важно соблюдать требования предельных состояний — отсутствие различных видов разрушения, хрупкого или пластического, общей или местной потери устойчивости, ограничение чрезмерных деформаций — упругих или пластических, ползучести, распространения усталостных трещин и т. д.

Ограничения обычно довольно сложны. Например, условия прочности при изгибе включают квадрат высоты сечения, а жесткость связана с ее кубом. Условия устойчивости к тому же и нелинейны.

Простейшие элементы — отдельные стержни при статической нагрузке. Расчет таких конструкций, вернее, проверка работоспособности какого-либо заданного варианта элементарна и выполняется по формулам сопротивления материалов, но задача оптимизации далеко не тривиальна. Некоторые частные случаи были решены Ю. Д. Копейкиным, А. А. Калинин, Я. Ю. Шацем и другими путем поиска оптимального, по металлоемкости, решения. В качестве параметров конструкций рассматривались прочность, жесткость, устойчивость, а также габариты.

Пусть для двухопорной балки с прямоугольным сечением, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, заданы пролет, сила, материал и его механические характеристики, запас прочности, запас устойчивости, допустимый прогиб. Ищутся ширина и высота сечения, обеспечивающие ее минимальный вес. Имея в виду, что число варьируемых параметров два, задачу можно решить геометрическим построением на плоскости. Область допустимых значений параметров определяют по условиям прочности, жесткости и устойчивости. Прочность ограничена наибольшим допустимым напряжением, жесткость — предельным прогибом в середине балки, а устойчивость — величиной критической силы, при которой возможно изменение плоской формы изгиба и возникновение изгибо-крутильных деформаций.

Для решения задачи строится квадрант положительных значений ширины и высоты сечений, наносятся критические ограничения: по прочности — предельные значения момента сопротивления, по жесткости — предельные значения момента инерции сечения. Точка их пересечения образует вершину выпуклой фигуры, открытой сверху и справа, она одновременно удовлетворяет условиям прочности и жесткости. Условие устойчивости сложно зависит

от длины балки, наименьшей жесткости изгиба и жесткости кручения. В работе Ю. Д. Копейкина и Я. Ю. Шаца предложено графическое построение для ограничения по устойчивости, что позволяет, анализируя полученный график, найти оптимальное решение при всех трех ограничениях. Приведенный авторами числовой пример показал, что применение метода проб, даже при подробном обследовании, дает примерно 16% перерасхода металла.

Другой пример дифференцирования — выбор оптимальной формы консольной балки. Минимизируется относительный вес балки на единицу жесткости. Нагрузка распределена в виде треугольника. Ищется функция высоты сечения в зависимости от его положения по длине. Приблизительно профиль рассматривается как степенная функция расстояния сечения от конца балки, показатель которой находится с помощью дифференцирования. Экономия веса профиля описываемой показательной функции со степенью, равной одной трети, около 25% по сравнению с клинообразной балкой той же жесткости.

Еще один пример: необходимо изготовить из специального материала растянутый стержень с заданной длиной и постоянной нагрузкой. Требуется так подобрать размеры, чтобы свести к минимуму расход материала и издержки производства, которые в этом случае пропорциональны квадратному корню из площади поперечного сечения. Заданы верхний и нижний пределы размеров сечения, условия жесткости, не допускаются напряжения, превышающие предел текучести материала. Все это позволяет сформулировать критерий оптимальности и ряд ограничений, часть которых задается в виде неравенств, а часть в виде равенств. Целевая функция имеет два члена, второй из них нелинейный.

Решается задача следующим образом. Выражения для ограничений логарифмируются и в них вводятся новые переменные. В этом случае оптимальный вариант определяется линейным программированием, и причем довольно легко.

В качестве примера выбора оптимальных размеров стержневого элемента можно привести сжатый полый цилиндр, для которого также действительны ограничения по прочности, жесткости и устойчивости: устойчивость может быть общая (критический момент — продольный изгиб стержня) и местная (потеря устойчивости

формы поверхности стенки). Возможны также ограничения по габаритам или по боковой поверхности, что связано, например, с трением о грунт бурильных труб. При применении стандартных труб анализ оптимальности позволяет оценить перерасход металла и выбрать наиболее подходящий профиль. Если же анализ оптимальности не проводить, то перерасход достигает 20%.

Разрабатываются также методы оптимизации веса конструкций из нескольких элементов, например, сосудов, стержневых систем и т. п. Рассмотрим простой пример. При конструировании закрытого цилиндрического резервуара данной емкости из листового материала, толщина которого задана, нужно найти диаметр и высоту, обеспечивающие минимальный расход материала. Заранее можно сказать, что достигнуть этого можно, если боковая поверхность днищ и обечайки будет минимальной. Математически целевая функция выражается через радиус и высоту, ограничение в данном случае — заданный объем резервуара.

Воспользуемся тем, что боковую поверхность, а следовательно, и целевую функцию можно выразить через заданный объем резервуара и тем самым избавиться от ограничений. Решается полученное уравнение дифференцированием, в результате мы находим, что высота должна быть равна диаметру. Такое соотношение приводит к наименьшему расходу металла. Пример наш из-за простоты задачи и возможности искусственного исключения ограничений — элементарен. Но большинство изделий состоит из простых элементов, и конструктору необходимо приучить себя к мысли, что в любой, даже самой на первый взгляд примитивной, задаче использование теоретических методов поиска оптимума приводит к экономии металла. В общем же объеме производства количество сэкономленного металла выглядит, как мы уже говорили, фантастично.

Следующие два примера относятся к простым стержневым системам. Треугольный кронштейн из двух стержней, удовлетворяющий требованиям прочности и устойчивости, состоит из подкоса и горизонтального элемента. Определяются угол наклона подкоса и сечение стержней по условию наименьшей металлоемкости. Здесь задача решается в два этапа — сперва находят оптимальный угол наклона подкоса. Затем подбирается отношение

внутреннего и внешнего диаметра сжатого стержня, обеспечивающее его устойчивость.

Пространственная стержневая система — тренога для укрепления тали. Конструкция должна удовлетворять не только условиям прочности, жесткости и устойчивости, но также ряду геометрических требований, связанных с габаритами подъемного устройства и грузов. Задача также решается в два этапа — определение минимальной длины стоек по габаритным требованиям, а затем с учетом этого ограничения — оптимизация их сечения благодаря анализу построения областей допустимых решений на плоскости и использованию ЭВМ на основе соответствующего алгоритма принятия решений.

Итак, мы привели ряд примеров применения для проектирования элементов машин оптимизационных моделей, которые позволяют существенно облегчить конструкции. Задачи минимизации веса относятся, как правило, к нелинейным, поэтому в более сложных случаях может оказаться необходимым применение поиска.

Совсем недавно при строительстве сооружений стали применять методы оптимального проектирования. Нечего говорить, что при этом достигается большой экономический эффект, уменьшается расход материалов, в частности проката для металлических конструкций и арматуры железобетона. За немногие годы решено значительное число задач оптимального проектирования стержневых и пространственных конструкций. В частности, рассматривались стержневые фермы, вантовые конструкции (системы с односторонними связями), многопролетные балки, мосты, каркасные конструкции из колонн, балок и плит, рамы с жесткими узлами, мачты высоковольтных линий, оболочки перекрытий и арочных плотин и т. п. Применяются как отдельные методы программирования, так и их сочетания, например, нелинейное программирование и случайного поиска. Другой также часто встречающийся класс задач — задачи последовательной оптимизации схемы в целом, определения характеристик отдельных стержней и формы их сечений.

Другая область, где находит применение метод оптимизационных моделей, — летательные аппараты. Здесь вес хотя и не единственный, но один из наиболее емких критериев совершенства и принимается зачастую за критерий общей эффективности, определяющий вид целевой функции. При постановке задачи сразу вводится целевая

функция, в частности, вес аппарата в целом или одной из его ступеней. Конструктивные размеры определяют по условиям нагружения и по требованиям к прочности, жесткости и устойчивости. Условия работы (механические нагрузки, температурные условия, динамичность) связывают с условиями эксплуатации, как наземной, так и в полете.

Модель процесса эксплуатации аппарата включает условия взаимодействия между параметрами движения, обтекания поверхности внешней средой, функционирования систем управления, дальностью, рассеиванием конечных точек траектории и т. п. Такая математическая модель весьма сложна. Весовые характеристики аппарата выражаются через множество конструктивных параметров (габарит, форма, распределение масс, силовые характеристики, свойства тепловых потоков), действующих нагрузок, фактических и допустимых напряжений и деформаций и других величин. Для оптимизации каждого элемента требуется рассмотреть иногда свыше 10 конструктивных параметров, 15 и более параметров, характеризующих нагрузки, столько же ограничений по напряжениям и т. д. Ясно, что задача оптимизации какой-либо весовой характеристики охватывает очень много параметров и ее нельзя решить методом простого перебора.

Оптимизация конструкций летательных аппаратов требует привлечения целого ряда методов математической теории оптимизации и мощных вычислительных машин. Кроме методов типа линейного и нелинейного программирования здесь находят широкое применение динамическое программирование, вариационное исчисление и метод академика Л. С. Понтрягина, использующий принцип максимума. Последний метод удачно учитывает то обстоятельство, что полет развивается во времени и нагружение аппарата связано с текущими параметрами траектории, а также с рядом ограничений — пределов отклонений управляющих органов, устойчивости движения, устойчивости формы конструкции и ее прочности, температур, определяющих фазовое состояние материала, и т. п. Применяются также методы случайного поиска — для тех случаев, когда достаточно найти приближенные решения и преодолеть трудности, связанные с нелинейностью. Разработка аналитических и вычислительных проблем в этой области может служить примером применения новых методов повышения эффективно-

сти конструкций (в плане снижения металлоемкости) для других отраслей промышленности.

Методы математической оптимизации позволяют определять экстремум при реализации только одного критерия, что не всегда достаточно. Так, в частности, снижение металлоемкости (критерий минимума веса) имеет огромное значение, но ее нельзя рассматривать как единственную цель инженерного решения; следует предостеречь разработчиков против одностороннего подхода, не учитывающего других требований.

Проектирование обычно исходит из возможности достижения ряда эффективных характеристик системы — простоты, гибкости, надежности, экономичности, удобства эксплуатации и т. д. В рамках нашей задачи наибольший интерес представляет уменьшение затрат металла, но, конечно, не следует забывать о рациональном выборе других характеристик. Если рассматривать проектирование конструкций с минимальной металлоемкостью как подсистему, то она должна иметь свое место в системе управления эффективностью продукции: уровень материалоемкости, и, в частности, металлоемкости продукции одно из качеств ее; ну а улучшение качества — важнейшая экономическая задача на современном этапе развития общественного производства.

В соответствии с современными представлениями качество — комплекс полезных свойств, характеризующих потребительскую стоимость и суммарные затраты на производство и эксплуатацию. Комплекс свойств может быть количественно оценен комплексом соответствующих показателей, в число которых входит показатель металлоемкости. Его значимость как одного из элементов качества в настоящий период намного больше и может в отдельных случаях и на некоторых этапах создания продукции (например, при проектировании элементов конструкции или в технологических задачах) становиться главным, доминирующим свойством продукции. В других случаях металлоемкость — лишь один из элементов интегрального качества, характеризующего комплекс свойств, но и тогда роль его оценивается достаточно серьезно.

Для непосредственного применения оптимизационных моделей проектирования необходимо сформировать единственный комплексный критерий, что далеко не просто. Правда, в настоящее время мы уже можем указать на

ряд подходов к решению этой проблемы. Порой удается выбрать такой показатель, который характеризует в достаточной мере общие цели, поставленные при разработке изделия. Он принимается за критерий оптимизации. Так, применение единого критерия наименьшего веса в приведенных выше примерах для некоторых задач конструирования оправдано. В других, более сложных задачах, например при выборе общих схем конструкций, он может оказаться односторонним. Но даже и в простых случаях необходимо не упускать из виду технологические, эксплуатационные и экономические соображения.

Иногда могут быть отброшены решения явно нерациональные, неконкурентоспособные. Если известно, что экстремум по какому-либо показателю заведомо не удовлетворяет предписанным в задании ограничениям, то его бесполезно искать. Таким путем, в отдельных случаях, также удастся избавиться от многокритериальности или по крайней мере уменьшить число критериев и облегчить дальнейшее рассмотрение.

Но более общий подход к возможности применения метода оптимизации состоит в «сворачивании» множества критериев, приведении их, как уже говорилось, к единому. Укажем на следующие способы свертывания — арифметический, геометрический или гармоническое усреднение критериев, замена их (кроме одного) ограничениями, последовательное рассмотрение нескольких задач оптимизационного типа, сведение к единственному критерию при наличии неопределенных факторов. Простейший способ — представление общего критерия в виде «взвешенной» суммы отдельных показателей эффективности. Взвешенным считается показатель, умноженный на коэффициент, соответствующий степени его важности. Правильность выбора весовых коэффициентов существенно влияет на точность решения, поэтому их не выбирают произвольно, а подбирают так, чтобы осредненный критерий наилучшим образом выполнял свою функцию.

Более сложный критерий — геометрическое среднее частных критериев. Осреднение их имеет тот недостаток, что позволяет компенсировать недостатки по одному критерию за счет изменения других, поэтому их применение требует обоснований и имеет ограниченную ценность.

Свертывание критерия введением дополнительных

ограничений взамен лишних критериев полностью решает математическую сторону задачи, сводя ее к применению методов программирования или неклассического вариационного исчисления. Однако одновременно возникают трудности при обосновании выбранных ограничений, так как результат оптимизации может зависеть от сделанных при этом предположений.

Поскольку невозможно использовать только строгие методы, разумно проводить расчеты методами приближенными. Так мы выделим области приемлемых решений, каждое из которых не является существенно худшим, чем остальные. Приближенный подход возможен, например, при наличии многих критериев. Предполагая, что показатели эффективности расположены в порядке убывающей важности, находим сперва оптимальные решения для первого из них. Затем накладываем ограничения на отклонение по первому показателю, которые можно допустить как уступку для достижения второго критерия, и решаем задачу оптимизации второго показателя. Процедура может быть проведена последовательно для всех критериев. Целесообразен такой подход потому, что в районе максимума величина каждого показателя меняется слабо и можно ценой малых уступок существенно улучшить реализацию других критериев.

Другой способ — решение задачи в два этапа. На первом рассматриваются в отдельности задачи для всех критериев, которые намечено принимать во внимание. Затем отыскивается оптимальное компромиссное решение, при котором минимизируются отклонения единого многоцелевого решения от частных. Строго объективный способ выбора критерия пока отсутствует, и при принятии решений многое зависит от личных вкусов. Требуется выявить возможные способы поведения, неподконтрольные внешние условия, потери и выигрыши при сочетании линий поведения и внешних условий. Кроме того, нужны вероятностные характеристики соответствующих потерь или выигрышей, они могут быть критериями принятия решения о выборе той или иной линии поведения.

В сравнительно новой дисциплине — теории полезности сделана попытка оценить потери (или выигрыш) при применении того или иного решения, учитывая такие качественные факторы, как престиж предприятия, его репутация, доброжелательность отношений и т. п. При учете полезности с количественных позиций имеет значение

не только абсолютная, но и относительная величина фактора. Например, требуется оценить желательность большей экономии материала при меньшей надежности, или наоборот. Кроме сбора и обработки мнений компетентных лиц (экспертов), пока ничего не удастся использовать. Имеющиеся результаты указывают на существенную нелинейность так называемых кривых полезности, т. е. соотношения между величиной какого-либо показателя и вероятностью ее достижения. Эти кривые имеют довольно устойчивую форму, что в дальнейшем может оказаться полезным для уточнения целесообразных запасов при различных масштабах и стоимости изделий, а также разных уровнях ответственности принимаемых решений.

На этом закончим краткий рассказ о применении методов оптимизации. Представляет, естественно, интерес вопрос об их отдаче при проектировании. Опубликованные в литературе данные следует рассматривать пока как приближенные ввиду сравнительной новизны методов и, возможно, недостаточно полной информации об имеющихся достижениях. Называются обычно цифры порядка 15—20% экономии металла, для стальной арматуры, в железобетоне — около 15%. Применение новой вычислительной техники для сравнения вариантов дает 5—15%. Хотя эти цифры более скромны, чем те, которые приводятся для других путей снижения металлоемкости (как, например, улучшение технологии — до 25% или применение высококачественных материалов и профилей — до 50%), они более реальны и значимы, по крайней мере в ближайшем будущем, пока не устранены трудности в получении новых материалов и профилей, а также нового оборудования для современных технологических методов.

Для внедрения методов оптимизации, а в дальнейшем имитаций необходимы современный подход к управлению параметрами создаваемой продукции и наличие машинного времени. Однако если бы все возможности снижения металлоемкости можно было реализовать, то из приведенных нами цифр вытекало, что вес снизился бы почти в 2,5 раза, что, пожалуй, слишком хорошо, чтобы быть правдоподобным.

Моделирование в условиях неопределенности

Мы рассмотрели ряд методов, позволяющих с помощью современной вычислительной техники и на основании новых научных разработок облегчать конструкции и тем самым снижать металлоемкость продукции. Иногда это приводит к значительному усложнению математических выкладок и возможным ошибкам. Как указывает член-корреспондент АН СССР Н. Н. Моисеев, наступает известная переоценка ценностей — идеи оптимизации начинают казаться не столь всеобъемлющими, какими они представлялись вначале.

Целенаправленная деятельность человека связана с изменением природы, которая подчиняется своим законам. Когда человек детально изучил законы природы, он точно может описать ограничения, фигурирующие в задаче, и использовать их с максимальной выгодой, в частности, при определении минимальной металлоемкости. Но во многих случаях при решении новых и сложных проблем мы сталкиваемся с недостаточностью знаний. Расплатой может быть отказ от решения задачи, принятие ошибочных решений, чрезмерно осторожные, а потому невыгодные решения, излишние затраты на накопление опыта и проведение экспериментов и т. п. Такими тесно связанными с практикой проблемами занимается новое направление современной науки — теория статистических решений.

По мере усложнения проблематики все более типичными становятся обстоятельства, когда многие условия заранее не известны. Задача принятия решения формулируется следующим образом — при заданных условиях, с учетом неизвестных факторов найти такие элементы решения, которые по возможности обращали бы в экстремум показатель эффективности. Очевидно, что при такой неопределенности шансы на успех при реализации принятого решения будут меньшими, чем если бы мы располагали полной и точной информацией. Вместе с тем такому решению в большей мере свойственны черты разумности, чем произвольному волевому. Поэтому и в условиях неопределенности (за исключением простых и не ответственных случаев) для решения подобных задач необходимо привлекать научно обоснованные методы.

Когда избежать неопределенности и приближенно свести задачу к детерминированной или стохастической схеме нельзя, вместо произвольного, субъективного решения следует рассмотреть весь диапазон значений неопределенных факторов и представить себе эффективность множества операций в этом диапазоне: следует задаться множеством возможных значений неопределенных факторов, сведя задачу к ряду задач с определенными условиями. Решение каждой из них методом оптимизации называется локально оптимальным решением. Такая процедура хотя и имеет ограниченную ценность, но может служить подспорьем в принятии некоторых компромиссных решений.

Принятие решений в процессе разработки изделий и при наличии неопределенности в модели или исходных данных может быть приравнено к игре против природы. Отсюда возникает мысль об использовании получившей большое развитие теории игр. В данном случае это могут быть модели конфликтной ситуации при предположении о «враждебности» природы и другие, менее пессимистические подходы, например, критерий Лапласа (равновероятность возможных состояний природы) или критерий Гурвица, учитывающий заданную степень оптимизма того, кто принимает решение. Игровые модели в конструкторских решениях еще не нашли распространения, но они представляют значительный интерес для развития методов принятия экономических решений.

В свете начальной неопределенности и изменяющихся условий работы требуется рассмотреть процесс изменения параметров и структуры системы. Здесь мы уже имеем дело с адаптацией, т. е. ее приспособлением для выполнения критериев функционирования. Системы с единственным критерием, которые могут быть оптимизированы в процессе адаптации, носят название искусственного, или технического, интеллекта. Многокритериальные системы, соответствующие естественному интеллекту, более сложны, но и более эффективны, чем существующие сейчас технические системы. Хотя понятия оптимальности и адаптивности, по существу, различны, практически между ними имеется связь. В частности, у оптимальных систем наличествует свойство адаптивных систем — малая чувствительность к небольшим изменениям параметров. С другой стороны, при синтезе адаптивных систем жела-

тельно использовать условие экстремума некоторых показателей как объективный критерий выбора решения.

В последнее время в литературе высказывается точка зрения, что оптимизацию можно считать частным случаем адаптации, рассматриваемой в широком смысле слова. При таком подходе адаптация реализует задачи оптимизации, обучения и идентификации (описание свойств системы по данным о входе и выходе). Проблемы адаптации возникают в тех, весьма распространенных, случаях, когда имеется неопределенность относительно свойств объекта и воздействий на него.

Постановка задачи может быть различной в зависимости от характера неопределенности. При так называемой параметрической неопределенности неизвестны координаты и некоторые параметры, входящие в уравнения, описывающие процесс, а управление ведется по критерию экстремума среднего значения функции качества.

Для непараметрической неопределенности, при неизвестности самих уравнений процесса, задача оптимизации не может быть строго поставлена, можно говорить лишь о качественных методах, т. е. об отделении «хороших» решений от «плохих». Отыскание хорошего решения не дает гарантии оптимальности, т. е. того, что нет еще лучшего решения, но и этот результат оправдывает практическое применение адаптивных методов.

Адаптация может оказаться полезной не только из-за неопределенности условий, но и в связи с большими вычислительными трудностями. В последнем случае некоторые данные можно посчитать неизвестными и решить задачу методами адаптации, хотя и приближенно, но избегнув чрезмерных вычислений.

Основное направление приближенного решения сложных задач — использование аналитических методов для приведения процесса к такому виду, когда окончательное решение может быть принято волевым актом человека. Здесь следует обратить внимание на методы исследования операций, эвристического программирования и ситуационного моделирования.

Термин «исследование операций» обязан своим возникновением сложным военно-техническим вопросам, которые военному командованию приходилось рассматривать совместно с группами гражданских специалистов и ученых. (К таким задачам относились наилучшее использование новой военной техники и борьба с новым воору-

жением и новой тактикой противника.) В соответствии с принятой в армии организацией на них возлагается задача подготовки, на основе проведенных исследований, обоснованных предложений. Они докладываются инстанции, руководящей военной операцией, она принимает окончательное решение. Таким образом, коллектив ученых, исследующих операции, — как бы аналог штаба при командующем.

В дальнейшем такой подход стал все больше применяться и в других областях целенаправленной человеческой деятельности. Некоторые авторы под исследованием операций понимают науку о применении научного подхода к задачам, связанным с функционированием систем, с целью помочь лицам, отвечающим за управление системами, принять наилучшие решения.

Операцией называют этап функционирования системы, ограниченный интервалом времени и выполнением задачи. Операция — управляемое мероприятие, в процессе которого выбираются тем или другим способом некоторые параметры, зависящие от оперирующей стороны, чему соответствует принятие на основании рекомендаций определенных решений. Поскольку, как указывалось выше, само принятие решений выходит за рамки исследования операций и совершается лицами, которым предоставлено такое право и которые могут при этом учитывать дополнительно свои соображения, то принятие решения не может быть процессом автоматическим, а скорее автоматизированным. В нем участвуют не только вычислительные машины или другие алгоритмические средства, но и человек. Такое сочетание в большей степени гарантирует правильность решений, чем деятельность человека, опирающегося только на опыт и здравый смысл, или только работа машины, выполняющей заранее предписанную ей программу. В этом смысл шуточного определения «исследование операций представляет собой искусство давать плохие ответы на те практические вопросы, на которые даются еще худшие ответы другими методами».

В последние годы все большее значение приобретают суждения экспертов. Коллективный опыт, ассоциативное мышление и скрытые способности человеческой интуиции могут давать поразительные результаты. В опытно-конструкторских разработках соображения, отражающие глубокое понимание содержания предмета инженерами,

имеют большое значение. Математик с его традиционной манерой мышления бессилён там, где инженер добивается результатов, удовлетворяющих практику.

Делаются попытки использования программ для отыскания решений промышленных задач снижения металлоёмкости, оптимизационный подход к которым трудно найти или на решение которых уходит слишком много времени. Здесь на помощь приходит теория решения задач, её можно рассматривать как некоторую часть проблемы создания искусственного интеллекта.

Исследование искусственного интеллекта сводится к созданию методов и средств конструирования машин, способных выполнять задания, с которыми до недавнего времени справлялся только человек. Это направление весьма перспективно и увлекательно, ему посвящена обширная литература.

Использовать чисто математический метод принятия решения можно только при чётко определенных целях, возможных вариантах его достижения и количественных критериях выбора оптимального варианта. Однако на практике математически сформулировать цели и критерии часто затруднительно, а число вариантов превышает допустимое (с точки зрения возможности их рассмотрения). Поэтому предпринимаются попытки развития направления, называемое эвристическим программированием. Схематически решение задачи — преобразование первоначального состояния объекта к другому, конечному, предпочтительному с какой-либо точки зрения. К этому сводится, в частности, инженерное проектирование технических объектов. Возможен следующий путь — сравнение начального и конечного объектов, определение разницы между ними, поиски оператора, уменьшающего выявленный разрыв и его последовательное применение вплоть до практического устранения этой разницы.

Эвристический метод похож на игру «горячо — холодно». Одна из задач на сообразительность (решалась с помощью программ «общего решателя проблем»), например, вопрос о перевозке через реку в двухместной лодке трех миссионеров и трех каннибалов. Во избежание неприятностей на любом берегу миссионеры не должны оставаться в меньшинстве. Программы моделируют ход рассуждения человека при поставленных им целях преобразования ситуации, применяя те или иные операторы

и уменьшая постепенно различия между существующим состоянием и желаемым.

Первые шаги эвристического программирования (их можно назвать «лабиринтным подходом») — поиски пути от начальной площадки к конечной в некотором лабиринте. Проблема решалась перебором возможных путей, но с использованием интуиции для сокращения числа проб. Такой подход не всегда возможен, например, в задачах с неопределенной областью поиска.

Для задач, не подпадающих под категорию лабиринтной структуры, разрабатываются более совершенные методы. В основе их лежат анализ интеллектуальной деятельности человека в работе над близкими задачами, творческий акт выработки стратегии при решении проблемных ситуаций. Удачный термин, характеризующий продуктивный мыслительный процесс — соображение, в процессе которого вырабатывается решение применительно к ситуации на основании моделей ее элементов. Успешно решаются многие сложные задачи машинной реализации модельного подхода, а именно модельный метод управления динамическими ситуационными системами; он может найти приложение в оптимальной разработке технических объектов. Метод отличается от существующих автоматов, построенных по стимульно-реактивной схеме, у него динамичная внутренняя среда, порождающая изменения стратегии поведения системы в окружающем мире.

Нормативные требования и метод предельных состояний

Размеры, а следовательно, и вес конструкции обычно определяются в прочностном расчете, в вычислении напряжений, деформаций и перемещений под влиянием внешних нагрузок. Затем полученные данные сопоставляют с нормативными значениями — этап, который, несмотря на элементарность, очень важен, так как определяет в конечном счете надежность, долговечность и экономичность конструкторского решения.

Метод расчета и способ его сопоставления с нормативами взаимосвязаны. При детерминистическом расчете нормативы обычно представляются в виде допускаемых

напряжений, коэффициентов запаса или безопасности. Старые методы проектирования ориентировались на таблицы Баха или Ретшера и Бока, где допускаемые напряжения указывались в готовом виде. В дальнейшем инженеры стали определять допускаемые напряжения делением предела текучести для статической нагрузки или предела усталости для переменной нагрузки на коэффициент запаса прочности, учитывающий особенности материала и технологии, неточность определения сил и расчетных формул, размеры изделия, влияние поверхностной обработки и коррозии, а также концентрацию напряжений. Составляющие общего коэффициента запаса прочности, например нормальная температура, приводятся в литературе, полная величина его довольно велика и колеблется от двух до семи и более.

При конструировании деталей машин коэффициенты запаса или безопасности выбираются с учетом опыта и общих соображений, а в некоторых случаях достаточно произвольно. То, что границы интервала коэффициентов отличаются иногда на весьма значительную величину, в то время как в современных условиях может иметь значение даже один процент размера конструкции, говорит о том, что проблема запаса весьма серьезна и требует скорейшего решения. Некоторые попытки уточнить вопрос не дали положительного результата. Предлагался, например, так называемый «дифференциальный метод», когда коэффициенты представляются в виде произведения многих дифференцированных по различным факторам составляющих. Каждый из сомножителей выбирается на основании специальной таблицы, где указаны допустимые интервалы. Можно считать, что нижней границей будет пользоваться смелый конструктор, а верхней — осторожный. В первом случае значение коэффициента окажется близким единице, а во втором доходит до весьма больших чисел.

Дифференциальный метод разработан подробно и в нем учтено значительное число факторов, которые могут влиять на величину запаса. Он представляет определенный интерес, хотя с самим выводом о величине общего запаса согласиться нельзя. В методе общий коэффициент — это произведения десяти частных коэффициентов, которые делятся на группы по следующим факторам: надежность методов выявления дефектов материала и ответственность конструкции; неточность расчетов и влия-

ние концентрации напряжений; неточности определения механических характеристик (несоответствие условий работы материала в образце и натуре, малое число образцов, масштабный фактор); и наконец, совокупность технологических условий (состояние поверхности, остаточные напряжения, предварительные напряжения).

Если принимать во внимание только верхние и нижние границы интервалов и даже не учитывать некоторую произвольность аналогии рассматриваемого случая с теми или иными рубриками, общий коэффициент может быть принят равным как 2,5 так и 6,5, т. е. разброс более чем в 2,5 раза. А такое недопустимо!

Можно еще добавить, что оценка степени точности расчета и выбор соответствующего частного коэффициента, по существу, произвольны: коэффициент может быть без ограничений как меньше, так и больше единицы.

Чрезмерная дифференциация явно приводит к потере определенности и вместо объективного определения запасов имеет место субъективный, волевой процесс. Была сделана также попытка устранить недостатки дифференциального метода, сведя коэффициент к двум сомножителям: общего значения (находится по таблице) и специального, выбираемого в каждом частном случае.

Задача выявления эффективности одновременного влияния нескольких факторов еще не решена. Можно согласиться с мнением члена-корреспондента АН СССР И. А. Одина: рассматриваемый вопрос весьма сложен, и, по сути дела, речь идет о необходимости создания новой науки, которая должна получить в машиностроении такие же права, как, например, теоретическая механика или сопротивление материалов.

В некоторых отраслях, где весовая отдача особенно важна, например в авиационном машиностроении, конструкции проектируются по разрушающей нагрузке, с введением коэффициента безопасности на величину наибольшей нагрузки (таковая имеет место при эксплуатации каждого экземпляра аппарата). Ввиду трудности определения разрушающей нагрузки и ответственности конструкций проводят контрольные испытания в натуре — до полного разрушения. Коэффициенты безопасности выбирают обычно несколько ниже интервала, существующего в общем машиностроении, и обычно их значения для полетных состояний лежат в пределах 1,3—1,5. Эта величина принимается с некоторыми оговорками — ограничения по ме-

теоретическим условиям, например, исключение полета в грозовой обстановке; меньшая величина берется для беспилотных аппаратов и т. п. Основные факторы, определяющие значение коэффициентов безопасности, — предупреждение пластических деформаций при эксплуатационных нагрузках и возможность перегрузки в любом экземпляре большой серии.

Применение передовых расчетных и экспериментальных методов определения напряжений и нагрузок помогает уточнить запасы прочности и уменьшить вес изделия на 30 и более %! В целом ряде случаев устаревшие методы расчета или допускаемые в них неточности приводят к неоправданному увеличению запасов прочности и веса. Иногда же они завышаются сознательно, для перестраховки.

Опыт эксплуатации и сравнительно малая аварийность по причине недостаточной прочности говорят о том, что существующие нормативные требования обеспечивают достаточную надежность. Вместе с тем напрашивается предположение, что в каждом отдельном случае нормы завышены, так как разработчики ориентируются на верхнюю границу интервала. Вообще, еще раз подчеркнем, вопрос о запасах — один из наиболее сложных в конструкторском деле. Простота назначения коэффициента запаса или безопасности — кажущаяся, и часто приводит к необоснованным решениям и вмешательству малокомпетентных лиц.

В последнее время наметилась тенденция заменить, особенно для сложных и новых конструкций, заранее определенные нормативные требования расчетами механической надежности — оценки вероятности выхода переменных состояния системы за определенную границу. Здесь нормирование коэффициентов к детерминированным величинам заменяется нормированием допустимой вероятности разрушения, потери устойчивости формы из-за чрезмерных остаточных деформаций и т. п. Современная теория механической надежности основывается на методах статистической динамики. Процессы в конструкциях при эксплуатации моделируются случайными функциями, а характеристики внешних воздействий и свойств материалов определяются статистической обработкой экспериментальных данных.

Использование для моделирования процессов в конструкциях вероятностных (стохастических) методов при

оптимизации обуславливает применение стохастического программирования, о котором говорилось выше. Пример вероятностного подхода — анализ оптимальной надежности методами исследования операций.

Обычные детерминированные расчеты и стохастические методы предполагают наличие точных данных об используемых параметрах в первом случае и о их вероятностных характеристиках (математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты корреляции и т. д.) во втором. В детерминированных расчетах, как указывалось, на всякого рода неточности вводят нормативные коэффициенты запаса, в стохастические приемы в существующей практике поправок не вводят. В результате если первый подход ведет к завышению запасов, то второй, не полностью учитывающий возможные неопределенности, может несколько завышать теоретическую надежность по отношению к фактической. Дальнейшее развитие данной области принесет практически важные результаты при применении не только оптимизационных, но и игровых, а также имитационных моделей, использующих наряду с мощными вычислительными средствами опыт и интуицию квалифицированных специалистов.

При использовании оптимизационных моделей проектирования, важны ограничения в виде неравенств. Чтобы обеспечить работоспособность конструкций, нужно правильно сформулировать входящие в эти ограничения предельные величины, характеризующие условия эксплуатации. Так, при разработке силовых конструкций методом расчета по допускаемым напряжениям наибольшие напряжения, определенные расчетом или опытным путем, не должны превышать установленных на основании испытаний образцов материала напряжений допускаемых. Понятие о напряжении относится к точке или бесконечно малому элементу конструкции. Оценка прочности по напряжениям связывает прочность всей конструкции с напряженным состоянием в той точке, где оно достигает наибольшей величины.

Определение напряжений в теле конструкций заданной формы при некоторых известных внешних воздействиях (нагрузках) опирается на мощную теоретическую базу в виде целого ряда наук и дисциплин — сопротивление материалов, теория упругости и термоупругости, теория пластичности и ползучести, механика сплошной среды, теория пластин и оболочек, упругих колебаний, стро-

ительная механика плоских и пространственных стержневых систем. Развитию этих дисциплин способствовали успехи математической физики, вариационного исчисления, вычислительной техники.

Техническая литература по перечисленным областям огромна. Число публикаций быстро растет в связи с усложнением конструктивных форм вновь создаваемых машин, разнообразием и интенсивностью внешних воздействий при бурном развитии техники. Если выполнить с достаточной точностью теоретический расчет, то мы получаем картину напряжений и деформаций в любой точке конструкции.

В подавляющем числе случаев напряженность элементов конструкции неоднородна, т. е. меняется от точки к точке. Вообще представление о том, что напряжение в какой-либо точке всегда определяет прочность конструкции, не соответствует действительности. Появление пластических деформаций значительно перераспределяет напряжения. Распространение пластических зон до определенных пределов не нарушает несущей способности конструкции, даже возникновение местных трещин не обязательно приводит к ее разрушению.

С другой стороны, разрушение не единственный показатель непригодности конструкции — возможны потеря жесткости, остаточные изменения размеров, изменения структуры материалов и т. п.

Поэтому метод допустимых напряжений недостаточно точен, так как он отражает состояние только точки тела конструкции, а не условия работы последней в целом. Взамен традиционных методов расчета был создан новый метод предельных состояний.

Впервые метод предельных состояний в упрощенной форме был отражен в нормах проектирования железобетонных конструкций по предложению советских ученых. На его основании составлены действующие в СССР строительные нормы и правила (СНиП). В дальнейшем он нашел применение не только в строительстве, но и в ряде отраслей машиностроения, а также был принят странами, входящими в СЭВ, и другими европейскими государствами. Метод предельных состояний позволяет проектировать более рациональные, а следовательно, и менее материалоемкие конструкции.

Преимущества его — возможность более обоснованного выбора запасов при проектировании конструкции и

ликвидации имевших место излишеств, что отражено в современных нормах проектирования строительства.

Оценка какого-либо варианта конструкции невозможна без учета силового, температурного и других внешних воздействий. Под предельным состоянием понимается то, при котором конструкции перестают удовлетворять предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям, т. е. теряют способность сопротивляться внешним воздействиям, получают недопустимые деформации или местные повреждения.

Для принятия обоснованного конструкторского решения необходимо не только общее, качественное определение, но и количественное, в виде ограничения типа неравенства, на основании которого производится выбор лучшего варианта по критерию веса. Сейчас достаточно ясно, что поведение материалов, а тем более конструкций нельзя полностью определить только по одному какому-либо типу разрушения. Теории предельных состояний в точке тела могут быть основаны на гипотезах и на обработке данных испытаний. Пример — предположение о решающем влиянии главных либо касательных напряжений и т. п. Считается, что гипотезы должны проверяться экспериментально, но этот процесс обычно затягивается и не всегда завершается, что дает пищу оживленным научным дискуссиям.

Экспериментальные данные могут быть представлены в виде опытных коэффициентов, например, модулей упругости, либо в виде эмпирических функций — диаграмм испытаний, которые позволяют уточнить специфические свойства различных материалов.

При переходе к анизотропным и неоднородным материалам проблема создания теории предельных состояний усложняется, и вряд ли можно надеяться найти столь простой ключ к решению, каким долгое время были теории прочности (в ряде простых случаев они не потеряли своего значения, как, например, гипотеза энергии формообразования в теории пластичности).

Одним из вопросов, нерешенных до сих пор окончательно, на этом сравнительно ясном пути — задача, связанная с пространственностью напряженного и деформированного состояния. В условиях пространственной работы конструкции напряжение в точке не может быть выражено одним числом — это трехмерный тензор, имеющий шесть независимых компонент.

Практически невозможно определить свойства материала при любом соотношении компонентов тензора напряжений, полученных расчетным путем. Поэтому возникли так называемые теории прочности, цель которых — иметь возможность определять критерий прочности любого вида напряженного состояния по результатам упрощенных опытов с образцами материалов. Все изучавшие сопромат, конечно, помнят теории прочности — наибольших нормальных и касательных напряжений, энергии деформации — и характерные рисунки, изображающие круги Мора. Обычно описания этих теорий не сопровождались достаточно уверенными и однозначными рекомендациями об областях их применения.

Долгое время теории прочности, разработанные вначале для критерия разрушения, применялись для расчета условий возникновения пластических деформаций, несмотря на разницу в физической природе этих явлений. В литературе указывается, что имеющиеся разработки лишь частично удовлетворяют запросам практики. Поиски продолжаются, теории поведения материалов совершенствуются и развиваются, но усложняются и требования к ним в связи с широким применением в технике новых материалов, в частности, неоднородных по структуре, волокнистых, зернистых. Пока общих решений нет, и приходится ограничиваться данными для узких классов напряженных состояний и свойств материалов.

В практике укоренились следующие предельные механические характеристики материалов: предел прочности, предел текучести, удлинение при разрыве. Однако нельзя считать, что они полностью определяют поведение конструкций. Так, например, металлы с высоким пределом прочности, или, как их называют, высококачественные, могут иметь склонность к образованию трещин, плохо свариваться (некоторые хромо-марганцевые стали). Молибденовые стали с высоким пределом прочности и удлинением при разрыве иногда разрушаются при неполной нагрузке спустя некоторое время после начала эксплуатации.

Наряду с отдельными показателями — механическими характеристиками нужны данные о конструктивных свойствах, которые содержатся в рамках дисциплины о конструктивной прочности, пока недостаточно разработанной. Имеющиеся же сведения основаны главным образом на экспериментальных исследованиях.

Экспериментальные исследования при разработке конструкций

В связи со сложностью разрабатываемых объектов, которые можно рассматривать как системы из некоторого числа узлов, отсеков или агрегатов, целесообразно проводить опытную отработку элементов с последующим усовершенствованием системы в целом. Опытно-конструкторские работы обычно проводятся сперва для опытного, а затем для серийного образца изделия. При этом для тщательности проработки и более полного использования возможностей улучшения и облегчения конструкций рекомендуется вначале испытывать отдельные части или подсистемы, вносить по результатам таких испытаний необходимые изменения и проводить испытания повторно. Затем организуются испытания в сборе, вносятся соответствующие изменения и — новые испытания. Таков цикл работ как для опытного, так и для серийного образца; причем для последнего учитываются результаты всех перечисленных этапов.

Таким образом, разработка современных сложных образцов изделий сопровождается, как правило, большим объемом экспериментальных работ в лабораторных условиях и натурными испытаниями. Задача испытаний, кроме проверки функционирования системы и соответствия поставленным требованиям, — получение уточненных данных о параметрах системы, введение улучшений в конструкцию, ее всемерное облегчение.

Автономные испытания отдельных элементов проще и доступнее, чем комплексные, поэтому использование их результатов имеет большое значение для сокращения объема срока и стоимости последних. Трудоемкость и продолжительность экспериментальных работ определяют важность их оптимального планирования.

Различают пассивный и активный эксперимент. Пассивный — это, в частности, наблюдение за процессом, происходящим в природе. Он все в большей мере уступает место активному, так как обработка данных пассивного эксперимента обычно не позволяет вскрыть внутренние закономерности изучаемого объекта из-за взаимной корреляции переменных. Опыт применения экстремального планирования активных экспериментов, накопленный в нашей стране, показывает, что сложные задачи

могут решаться в короткие сроки. В литературе по планированию эксперимента, в которой рассматриваются способы оценки параметров целевой функции известной структуры, результаты измерения называются «репликами», аргументы целевой функции — «факторами», а область поиска — «факторным пространством».

При разработке новых образцов часто приходится сталкиваться с так называемыми плохо организованными, или диффузными, системами, в поведении которых не выделены четко отдельные явления и действия переменных различной физической природы. Здесь проведение описанных экспериментов наталкивается на трудности в отношении истолкования результатов.

Одно из прогрессивных направлений — оптимальное использование пространства независимых переменных — новая для экспериментатора идея, выдвинутая в современной математической статистике. Если мы имеем дело с рядом факторов, описываемых независимыми переменными, которые образуют многомерное пространство, то можно написать их регрессию как линейную функцию и изобразить ее плоскостью многомерного пространства. Целесообразно варьировать все параметры сразу, анализируя при каждом последующем эксперименте результаты анализа предыдущих и соответственно планируя его.

Сложность изделий и сооружений современной техники и высокие требования в части максимального облегчения их делают экспериментальные методы необходимыми. Вместе с тем возможности экспериментирования на самом объекте крайне ограничены. Возникает вопрос о проведении испытаний на моделях, или использовании понятия агрегата, т. е. сложного объекта, который можно расчленить на элементы, доступные для исследования, а связи между ними описать математически. На основании данных об испытании элементов агрегата строится его математическая модель для изучения необходимых характеристик. Такой подход можно назвать опытно-теоретическим и применять для получения данных метод факторного планирования, или, как его называют, «активного планирования».

Весьма эффективный способ экспериментального исследования — физическое моделирование. Оно позволяет значительно упростить, удешевить и ускорить работу (по сравнению с натурными испытаниями), оно подчас единственная возможность справиться с затруднениями.

Высококачественные металлы, экономичный прокат, новые знания о свойствах материала

Уменьшение веса изделия наиболее тесно связано с повышением прочности на единицу веса. Повысить удельную прочность можно, изменив технологию изготовления уже давно использовавшихся металлов, освоив ранее мало применявшиеся материалы и создав новые, в частности — композиты.

Издавна применяется в производстве термическая обработка металлов. Термообработка сама по себе значительно повышает уровень прочности стали, но еще больший эффект дает внедряемая в настоящее время упрочняющая термообработка металлопродукции — листов, стержней, рельсов, колес и т. п. Сам процесс — это сочетание нагрева с деформированием и последующей закалкой (точнее, пластической деформации аустенита с закалкой на мартенсит и низкого отпуска). Термомеханическая обработка позволяет получить предел прочности 200—300 кГ/мм² для листов толщиной до 20 мм и прутков диаметром до 32 мм и дает экономию металла до 20%.

В качестве примера расширения области применения известного ранее материала укажем титан, который становится в последнее время одним из важных конструкционных материалов. Объем его производства увеличивается, а стоимость снижается. Сплавы на основе титана обладают большей удельной прочностью, чем чистый титан и высокой жаропрочностью: допустимая температура 1000°C. А у материалов на основе ниобия, молибдена и вольфрама — до 1100—1200°C.

При равной прочности применение титана и его сплавов может снизить вес конструкции в 1,5—1,8 раза. Средняя прочность освоенных промышленностью титановых сплавов равна 100—110 кГ/мм², в 1,7—1,8 раза больше, чем та, которую имеют стальные материалы той же прочности. С учетом высокого сопротивления коррозии и действию агрессивных сред можно снизить вес машин и аппаратов примерно в 1,5—2,0 раза, насосов, в частности, — в 4—5 раз. Не решены, однако, вопросы

стойкости титана и его сплавов в кислороде, азоте, водороде.

Появляется все больше металлических сплавов с высоким сопротивлением механическим и температурным воздействиям, а также влиянию агрессивных сред. В автотранспорте перспективен, например, тепловой реактор, в котором выхлопные газы доводятся до полного сгорания, что предотвращает загрязнение атмосферы окисью углерода. Температура работы конструкции 870—1260°C при воздействии сильных и механических нагрузок. Хорошие результаты показал сплав, созданный для потребностей атомной энергетики.

Повышение качества металла без существенного изменения удельного веса достигается легированием. Может возникнуть вопрос об оптимальном количестве легирующего металла, стоимость которого значительно выше, чем основного материала. Критерием в данном случае служит интегральный показатель качества в виде отношения допустимой нагрузки к затратам легирующей добавки. Предположим, что количество легирующего металла влияет на среднее разрушающее напряжение пропорционально квадрату величины добавки и на разброс механических свойств пропорционально первой степени ее. Тогда, определяя несущую способность по низшему пределу при заданной надежности (с учетом разброса механических характеристик), получим показатель качества в виде функции от количества легирующей добавки. Продифференцировав ее, можно определить оптимум.

Экономически эффективно применение низколегированных сталей, в которых менее 2% дорогостоящих легирующих элементов; предел же текучести повышается до 35—45 кГ/мм², предел прочности — до 60 кГ/мм². Это экономит 18—20% металла при сравнительно малых дополнительных расходах.

Низколегированные стали до настоящего времени применялись в основном только при сооружении нефти и газопроводов, в судостроении и вагоностроении, но они могут значительно снизить металлоемкость и в других отраслях машиностроения.

Для конструктивных металлов техническая прочность значительно меньше теоретической (из-за несовершенств структуры и дислокаций кристаллоза). Один из способов повышения технической прочности как будто

парадоксален, он состоит в увеличении количества начальных несовершенств. Имеются данные, показывающие, что при увеличении количества несовершенств структуры прочность вначале резко падает, потом, после достижения некоторого минимума, начинает повышаться. Промышленные металлы и сплавы по структуре относятся к началу участка подъема прочности в зависимости от количества несовершенств. Можно предположить, что дальнейшее увеличение количества дефектов само по себе не влияет на разрушение, но при этом роль каждого из несовершенств, в том числе того, которое может оказаться причиной разрушения, уменьшится. Такое явление наводит на мысль о возможности повышения прочности с помощью предварительного разрушения, превращения металла в порошок с последующим уплотнением.

Из продукции порошковой металлургии изготавливаются конструктивные материалы с высокими жаропрочными, вакуумплотностными и другими свойствами. Обработка давлением со значительным деформированием улучшает параметры изделия. При невозможности механического деформирования с помощью прессов применяется гидравлическое выдавливание — гидроэкструзия при давлениях порядка 25 тыс. ат (а в дальнейшем и до 30 тыс. ат). Такие давления исключают возможность образования микронесплошностей (трещин) и позволяют достигнуть, например, для стали 45ХНС предела прочности 270—290 кГ/мм² и предела текучести 265—280 кГ/мм².

В современной технике особенно широко применяются так называемые композиционные материалы — из двух или нескольких компонентов с различными физико-механическими свойствами. Вообще говоря, почти все материалы, применяемые в технике, можно рассматривать как композиционные или для краткости — как композиты. Это поликристаллические металлы и сплавы, силикатные материалы. Поскольку в природе мы также видим композиционные материалы, структура которых создавалась при длительном естественном отборе (кожа, кости, мышцы, дерево), то можно сказать, что техника следует принципам бионики.

Среди композитов выделяется множество так называемых армированных материалов, в которых один из компонентов — наполнитель со сравнительно большой механической прочностью и жесткостью. Другой компонент, обычно легкий и хорошо связывающий, может так-

же иметь и специфические особенности. Композиты на основе алюминия, меди и никеля, армированные волокнами вольфрама, используются при температуре 1200°C. Пример такого материала — ячеистый титан, диффузно связанный со стеклом.

Для лопаток компрессоров турбореактивных двигателей, работающих при температуре 316°C, применяются композиты из эпоксидных смол, армированные металлическими и неметаллическими волокнами. Полимерные материалы и композиции на основе их могут работать при низких температурах (до минус 100°C) и при высоких (до плюс 400°C). Следует отметить еще материалы, армированные волокнами углерода и карбида кремния.

Существуют и разрабатываются смешанные металло-полимерные материалы, в которых монокристаллические металлические нити komponуются на основе полимерных связующих.

Некоторые затруднения при использовании композитов на основе полимерных смол возникают из-за значительной усадки в процессе полимеризации при повышенных температурах, отчего нарушаются связи компонентов и возможно растрескивание при охлаждении. Усадка эпоксидных смол около 2,5%, полуэфирных — более 10%, она в основном имеет химическую природу, а отчасти связана с температурой.

Важная характеристика материалоемкости — коэффициент удельной — или весовой — прочности: отношение предела прочности к удельному весу. По этому показателю стеклопластики обогнали сталь. В стеклопластиках в качестве армирующего материала использованы стеклянные волокна высокой прочности. Заполнителями могут быть фенольные, полуэфирные, эпоксидные и другие полимерные смолы с хорошими адгезионными свойствами.

Итак, стеклопластики обладают высокой удельной прочностью, но кроме того, их отличает устойчивость к действию агрессивных сред и термостойкость. Сфера их применения — резервуары, сосуды с высоким внутренним давлением, трубы, корпуса автомашин, судов, камеры сгорания реактивных двигателей. Трудность состоит в стыковке элементов. Отдельные же элементы изготовить сравнительно просто, замкнутые сосуды и корпуса могут быть без стыков, в виде кокона.

Существенное преимущество конструкций из стекло-

пластиков — возможность их оптимизации. Уже разработаны методы создания оптимальных конструкций труб и оболочек. Научились выбирать угол намотки стеклонитей.

Кроме стеклопластиков можно указать еще много подобных заменителей металла. Что же это дает? Вот, к примеру, строительство. В США конструкционные пластмассы в 1970 г. заменили 5,5 млн. т металлов, в основном цветных. В Англии это дало в том же году экономию стали в 300 тыс. т. Применяется и большой ассортимент пенопластов (пенополиуритан, пенополистирол, пенополивинилхлорид, пенопласты на основе термопластичных и термоактивных смол).

Весьма существенно в плане снижения материалоемкости конструкций применение материалов, лучше сопротивляющихся внешним воздействиям, чем обычные традиционные металлы. Они должны сочетать такие качества, как высокая прочность и жесткость с малым объемом, малой теплопроводностью, стойкостью к агрессивным воздействиям среды и т. п. Это и понятно, от конструкций обычно требуется противостоять одновременно не только механическим, но и температурным и химическим воздействиям. При таком множестве условий от любого из них можно ждать требований увеличения конструктивных размеров, а следовательно, расхода материала, несмотря на то, что остальные условия обеспечиваются любым запасом. Отсюда желательно не только получать отдельные высокие характеристики материалов, но и научиться управлять их свойствами. Конструкции даже в разных своих частях находятся в различных условиях, и поэтому наибольший эффект приносит согласование свойств материала в объеме всего устройства с условиями работы, например, соответствие поля напряжений и деформаций изменению механических характеристик.

Значительная часть металлических материалов используется в виде прокатных листов и профилей, гнутых и штампованных, панелей и других металлоизделий. Меры, предусмотренные девятым пятилетним планом, значительно расширяют возможности выбора при конструировании наиболее выгодных исходных материалов, увеличивают количество возможных вариантов и тем самым, как ни парадоксально, повышают сложность принятия соответствующих конструкторских решений.

Промышленность, применяющая новую металлопро-

дукцию, обязана подготовиться к наилучшему использованию представляемых ей возможностей и усовершенствовать методику полного и комплексного использования материалов. Улучшение качества проката может дать существенное снижение металлоемкости. По приближенной оценке мы имеем экономию от: использования профилей высокой точности — 40%, применения специальных профилей обычной точности — 20%, использования гнутых профилей — 25%, внедрения холоднокатаного листа — 20%.

Есть и другие виды новых экономичных профилей, в частности обогнутые угловые, — с постоянной и переменной толщиной полок, двутавры и швеллеры с тонкими полками постоянной толщины, швеллеры с переменной толщиной стенки и др. По данным академика А. П. Чекарева, вес конструкций при их использовании снижается на 8—10%.

В течение девятой пятилетки освоено большое количество новых фасонных профилей, доля холоднокатаного листа возрастет с 18 до 21,5% общего количества листового проката, удельный вес которого, в свою очередь, увеличится с 38,3 до 40,9%. Холодная прокатка позволяет получить очень тонкий лист (менее одного миллиметра).

Несовершенства структуры объясняют отставание конструктивной и технической прочности от теоретической, определяемой силами сцепления молекул в твердых идеальных телах. Увеличение степени использования материала требует развития новых теоретических дисциплин — о реальных свойствах металлов.

«Механика разрушения» — термин, появившийся лишь несколько лет назад — связана с новыми методами оценки прочности, с учетом имеющихся в теле начальных трещин и исследованием закономерностей их развития. Наличие структурных образований — зерен, микротрещин, дислокаций и т. д. приводит к тому, что прочность материалов на два-три порядка меньше той, которая соответствовала бы идеальной молекулярной структуре. Издавна существующий подход (с позиции сплошной среды) рассматривает элементарный объем, нагруженный поверхностными напряжениями, как некоторый «черный ящик» с напряжением на входе и деформациями на выходе при данной температуре. Вводя гипотезу близкого действия, согласно которой параметры в данном элемен-

тарном объеме не зависят от состояния других объемов, можно образовать модели для исследования состояния тел, которые называются реологическими и различаются в зависимости от гипотез, характеризующих поведение материала (упругое, упруго-пластичное, вязко-пластичное тело).

В настоящее время мы наблюдаем известный прогресс в повышении прочности металлов. В течение XIX века предел прочности железа поднялся примерно с 30 до 40 кГ/мм². В настоящее время существуют стальные сплавы с пределом прочности 200—300 кГ/мм², в ближайшие десятилетия он достигнет величины 400—600 кГ/мм². Разработки в области механики разрушения существенно влияют на выбор пути создания все более прочных материалов.

Использовать критерии разрушения, связанные с реологическими моделями, в настоящее время, однако, уже недостаточно. Обнаружен ряд явлений, которые не укладываются в классические рамки теории сплошной среды и критериальных свойств (наибольших напряжений, деформации, потенциальной энергии) в точках тела — влияние состояния, поверхности, разрушение при низких напряжениях и т. п.

В связи с этим создаются теории, опирающиеся на изучение самих процессов разрушения в виде образования дислокаций (скольжений) и трещин. В простейшем случае имеют место так называемые квазихрупкие трещины, когда область пластических деформаций у контура трещины мала по сравнению с ее расстоянием до границы тела. В общем случае развитие трещин не определяется только свойствами материала, но зависит от нагружения — соотношения изменения во времени различных параметров нагрузки. При этом вязкое разрушение, предшествующее хрупкому, допустимо, а хрупкое в настоящее время считается обычно недопустимым. Такой запрет имеет временный характер и в будущем будет, по-видимому, пересмотрен, что позволит еще в большей степени улучшить использование металла.

Традиционные характеристики — пределы прочности и текучести, ударная вязкость и пластичность — не могут полностью определять прочность материалов или изделий, так как не отражают особенностей природных условий. Важно определить сопротивление распространению трещин, зависящее от размера трещины, номинальных

напряжений вблизи нее и способности материала к стабилизации состояния (вязкость разрушения). При развитии трещины освобождается энергия упругой деформации, которую относят к площади трещины; при некоторой критической скорости освобождения энергии трещины распространяются быстрее, что характеризует вязкость нагруженного состояния. Методы аналитического определения скорости освобождения энергии упругой деформации интенсивно разрабатываются в механике разрушения.

Данные, приводимые в справочниках по материалам, относятся к так называемой металлургической прочности, т. е. прочности, значения которой получены при испытании стандартных образцов. Они не могут автоматически применяться для оценки прочности конструкции (конструкционной прочности). В первую очередь разница между ними определяется так называемым масштабным эффектом, обнаруживающимся в виде снижения прочности деталей больших размеров в случае хрупкого разрушения. Уточнение влияния этого явления позволит отказаться от грубых и завышенных эмпирических коэффициентов.

Механика разрушений в ее современном состоянии использует различные статистические гипотезы, например модели Даниэльса, основанные на предположении о марковости процесса (отсутствие влияния предыстории) при описании развития магистральной трещины. Полный перебор вариантов даже при малом числе волокон превышает современные вычислительные возможности. Но если учесть влияние границ тела и концентраторов как источников образования трещин, то с помощью ЭВМ можно решать задачи с числом состояний порядка ста. Таким образом, некоторые вопросы, связанные с влиянием размера концентратора и математического ожидания полного усилия на вероятность образования трещин, могут быть решены и найти применение в расчетах на прочность изделий из композитов. В литературе можно найти решение ряда задач и устойчивости, и несложных динамических задач, и оптимизации структуры.

Проблемы разрушения твердых тел — одни из наиболее актуальных при внедрении новых композиционных материалов. Для материалов классических, традиционных накоплен большой экспериментальный архив, по которому можно с той или иной степенью точности оцени-

вать прочность, в частности условия разрушения, не вникая в механизм явления. Для новых материалов, данных крайне недостаточно, для вновь проектируемых композиций опытных данных, естественно, нет совсем. Поэтому предварительная теоретическая разработка просто необходима.

Для высокопрочных тонких элементов существенный фактор — масштабный эффект, который может быть предсказан на основе статистических методов. Изучаются явления сцепления компонентов между собой. В стадии разработки находится еще ряд вопросов, например, оценка прочности материала по данным о его компонентах, разрушение при сложном напряженном состоянии, теория развития трещин.

Из многообразия прочностных параметров металлов в настоящее время выделяют те, которые легко контролируются — пластическая деформируемость, деформационное упрочнение, модуль упругости, когезия. Влияние поверхностной когезии проявляется при уменьшении ее по границам зерен резким изменением кривой напряжение—деформация. В проблеме разрушения рассматривается взаимодействие четырех параметров — скалывающего напряжения, сопротивления сдвигу, растягивающего напряжения и клезии.

Давно изучаются свойства выносливости материалов, в том числе и металлов, их способность противостоять усталости при длительных переменных нагрузках. Всем известны из курса сопромата такие характеристики, как предел выносливости (усталости), коэффициенты симметрии цикла, эффективной концентрации и масштабный фактор, позволяющие свести расчет на выносливость при наличии данных о поле напряжений к элементарному виду. Некоторые трудности возникали в связи с длительностью испытания образцов на усталость при предельном цикле для разнообразных условий и типов образцов. Однако это не единственное затруднение. Можно считать, что традиционные методы оценки выносливости конструкций по разрушающему напряжению в условиях неограниченного числа циклов изменения напряжения оправданы лишь для простых элементов, по форме, близких к стандартным образцам. Современные конструкции новых форм с ограниченным числом циклов нагружения или работающие в нестационарном режиме требуют новых методов проверки выносливости.

Согласно современным взглядам напряженное состояние реального материала, например, кристаллической структуры, не меняется плавно в пределах границ конструктивного элемента. По существующей терминологии различают напряжения первого, второго и третьего рода. Масштабы изменения первых двух родов соизмеримы как со многими, так и с единичными зернами, а третьего — с малыми частями зерен. Величины напряжений второго и третьего рода могут быть весьма существенными и определять образование местных пластических деформаций и микротрещин, постепенно разрушающих конструкции. Между тем эти напряжения нельзя определить средствами механики сплошной среды, а следовательно, и выявить расчетами по методу теории упругости и сопротивления материалов. Да и вообще, определение напряженного состояния не дает достаточного основания для оценки выносливости материала и конструкции. Усталостное разрушение в его первой фазе — образовании трещин — связано со структурными особенностями материала, состоянием поверхности, а также амплитудой цикла.

Теорию усталости нельзя в настоящее время обосновывать гипотезами, аналогичными используемым в теории предельных состояний, из-за сложности природы усталостного разрушения. Поэтому остается избрать опытный путь, базирующийся на описании и анализе экспериментальных данных; однако задача в этом случае значительно сложнее, чем для статической прочности.

По-видимому, пока почти невозможно рассматривать свойства материалов отдельно от свойств конструкции. Нужны такие характеристики или показатели свойств материала, которые позволяли бы прогнозировать и оценивать выносливость конструкции при переменном нагружении в течение определенного времени. В случае если такие характеристики существуют, то требуется установить методику их определения и, возможно, стандартизации или нормирования. Для этого, в частности, следует установить законы подобия для экстраполяции результатов лабораторных испытаний в натурные. В настоящее время достаточно полного ответа на эти вопросы не имеется, но соответствующие исследования ведутся широким фронтом.

Применение прогрессивной технологии

Как уже указывалось выше, значительную роль в снижении металлоемкости продукции наряду с улучшением конструкций и использованием новых материалов играет усовершенствование технологии изготовления изделий. Здесь уместно рассмотреть не только стадию обработки металла и исходной металлопродукции, но и изменение технологии получения конечного продукта.

Например, металлургическое производство. Используя экономичные технологические процессы прямого восстановления руд и получения зубчатого железа, можно снизить расход чугуна на выплавку стали примерно на 10% при одновременном улучшении качества металла. Другой пример — внедрение установок для непрерывной разливки стали, что также снижает расходный коэффициент металла, дает экономию примерно на 10%.

В прокатке повышение уровня технологичности благодаря автоматизации агрегатов, повышению жесткости клеток прокатных станов, способствует сокращению допусков. Важный резерв здесь — создание прокатного оборудования большой мощности и размеров, что позволит расширить сортамент экономичных прокатных изделий и, таким образом, облегчит конструктору выбор эффективных решений.

Непосредственно в машиностроении современная техника предлагает очень большой арсенал средств, позволяющий значительно улучшить технологию именно с точки зрения снижения металлоемкости изделий. Здесь можно выделить в качестве основных направлений: уменьшение отходов металлов при производстве продукции; совмещение технологических операций при обработке, при одновременном улучшении свойств материала, что может быть учтено при проектировании и способствовать снижению веса. Отходы производства при металлообработке достигают внушительной цифры — 5 млн. т в год, что составляет, по некоторым данным, 28—30% всего используемого металла, причем в промышленности в целом его идет в стружку около 15%, а в машиностроении — до 25%.

Значительная часть отходов может быть использована вновь, но это требует больших затрат средств, энергии и времени, что снижает эффективность производства.

Уже разработано дополнительно много методов борьбы с отходами. Взамен классической технологии отливок в песочные формы все большее применение находят новые методы литья под давлением, центробежное литье, выплавляемые модели, литье в кокиль и в оболочковые формы. (К сожалению, однако, до 90% черных металлов отливается до сих пор традиционным способом.) Другие методы формообразования, существующие издавна, — ковка, обточка, строгание, фрезерование, штамповка, резка и сварка — также претерпевают большие изменения в процессе технического прогресса.

Наряду с усовершенствованными методами штамповки и высадки применяются сварно-штампованные конструкции. Меняется и соотношение между использованием различных методов. В настоящее время в СССР металлорежущие станки составляют 82% металлообрабатывающего оборудования, а коэффициент использования металла для соответствующего технологического процесса — 0,33—0,38. Вместе с тем применение штамповки дает коэффициент, равный 0,44—0,52. Цифры говорят сами за себя, они убеждают в необходимости увеличения удельного веса применения штамповки. В частности, на кривошипных горячештамповочных прессах расход металла снижается на 10—20%. Холодная штамповка также занимает значительное место в ряде отраслей машиностроения: до 90% в производстве товаров народного потребления, 70—75% в приборостроении, но лишь 30—40%, например, в тракторостроении. Между тем переход от горячей штамповки к холодной позволит снизить вес деталей на 20—40%.

Из других методов механической обработки отметим объемную штамповку, которая позволяет, по имеющимся в литературе данным, повысить к.п.д. использования металла в 2—3 раза. Есть данные и об использовании взрыва для получения весьма высоких кратковременных импульсов давления, а также ультразвука. Наряду с механической обработкой на повестку дня встало применение других средств — электрических, химических и т. д. Это, в частности, электроэрозионные, искровые, импульсные, радиационные, лучевые анодомеханические и другие методы.

В плане снижения металлоемкости весьма большой эффект сулит совершенствование сварки. Для создания легких изделий, наряду с огромным количеством про-

катных профилей требуются конструктивные элементы больших размеров, с особо тонкой стенкой, различной шириной стенок и других сложных сечений из стали повышенной прочности и износоустойчивости. Соединить такие детали в конструкции можно только сваркой. Это позволило бы сэкономить по сравнению с существующими способами получения горячекатаных профилей проката, например, двутаврового сечения, до 40% металла. В печати указывалось, что Институт имени Е. О. Патона, освоив сварку токамаи высокой частоты, добился для крановых балок снижения веса примерно на $\frac{1}{3}$ при удлинении срока службы в 2—2,5 раза, т. е. снизил металлоемкость с учетом долговечности почти на порядок. Исследуется возможность применения указанного метода для сварки деталей с толщиной стенки 2—4 мм, что будет качественным скачком в деле облегчения конструкций.

Возможно, что со временем механические методы обработки уступят первенство мощному лазерному лучу, который позволит довести точность изготовления детали до нескольких микрон.

При большом масштабе использования листового материала один из решающих факторов — экономный раскрой листа. Известно, что отходы при штамповке изделий из листовой стали обычно 15—25%, что обуславливает необходимость создания методов оптимального раскроя.

Задача об оптимальном раскрое листов металла в случае, когда нужно получить заданное количество нескольких типов заготовок и при этом затратить минимальное количество металла, — классический пример применения линейного программирования. Наметив несколько способов раскроя материала на заготовки заданных размеров, можно установить, сколько заготовок различных типов получится из одного листа. Необходимо учитывать следующие ограничения: число экземпляров каждого типа заготовок достаточно, т. е. не меньше заданного числа; количество листов при каждом способе раскроя не может быть отрицательным. Критерием является минимум общего числа раскроенных листов, т. е. сумма числа листов материала и ограничения обоих типов представляет собой линейные функции. Возможна геометрическая интерпретация задачи, если число типов заготовок равно двум.

Назовем число заготовок каждого типа параметром состояния. Откладывая эти параметры на осях прямоугольных координат, получим на плоскости точки с координатами, характеризующими отдельные способы раскроя. Внутренность многоугольника (вершины которого эти точки) соответствует сочетанию способов раскроя, она и есть область допустимых решений. Проведя через начало координат луч, наклон которого характеризует требуемое соотношение заготовок, найдем на нем точку области, наиболее отдаленную от начала. Это и будет решением задачи оптимального раскроя.

Имеет большое значение правильная организация запасов предприятия. Отсутствие на складе требуемого для производства материала приводит к заменам, идущим, как правило, с запасом и по размерам и по характеристикам: в результате фактическая металлоемкость конструкций значительно увеличивается. Излишние же запасы тоже не идут на пользу, так как материальные фонды омертвляются и не могут быть использованы там, где они нужнее. Здесь также необходимо применение научных методов оптимизации запасов, основанных на математическом программировании.

Перечень новых технологических методов, позволяющих значительно снизить металлоемкость изделий и конструкций, очень велик. Такой большой арсенал заставляет задуматься над естественным вопросом о том, как им следует распорядиться в каждом отдельном случае. Большой выбор не только преимущества, но и причина озабоченности. Немецкая поговорка говорит, что кто имеет выбор, имеет и мучения. Положение в определенной степени упрощается тем, что использование того или иного метода требует соответствующей материальной базы, оборудования, позволяющего выполнить ту или иную операцию, а они далеко не всегда под руками. Конечно, следует стремиться к получению соответствующего современным требованиям оборудования, но это вопрос времени и средств. Поэтому приходится ориентироваться, хотя бы и временно, на то, что есть, что, естественно, сужает область выбора технологии.

Достаточно полное решение задачи снижения металлоемкости может быть достигнуто только при рассмотрении всех ведущих к этому путей как в отдельности, так и совместно. Второй из указанных подходов, который сейчас принято называть системным, усложняется

по мере увеличения объема системы и соответственно уровня иерархии, т. е. порядка подчиненности элементов системы (или ее подсистем). В данном случае проектирование и производство являются подсистемами, а весь процесс создания продукции — иерархическая система. Как принято считать в теории систем, каждая подсистема представляет собой также систему. В частности, это, несомненно, относится к современному проектированию, на что указывалось выше.

Разработке теории и практических рекомендаций для всего процесса создания новой техники пока лишь в начальной стадии, хотя занимаются этими проблемами весьма интенсивно, в частности, в капитальном строительстве — одном из крупнейших потребителей металла. В связи с решением проблемы «надежности экономики» строительства и низкой эффективности капитальных вложений разрабатываются новые методы проектирования и возведения конструкций с учетом их технологичности. Согласно определению члена-корреспондента АН СССР Н. С. Стрелецкого технологичность зависит от общности трех начал — проектировочного (экономия металла), производственного (экономия трудоемкости) и организационного (экономия времени). Пока общепринятого окончательного определения технологичности нет, но существует ряд важных работ по анализу совместимости проектных и технологических решений.

В частности, разработаны общие методы совместимости автоматических систем проектирования объектов (АСПОС) строительства и разработки проектов возведения (АСПВ) с применением теории функциональных систем, имитационного моделирования ситуаций, корреляционно-регрессивного анализа, алгебры логики и теории автоматов. Эти методы нашли конкретное применение при строительстве средних и крупных промышленных корпусов и сооружений. Возможно, что накопленный опыт будет полезен и в машиностроении, где вопросы эффективности и надежности весьма важны и правильное комплексное решение создания всего цикла продукции будет способствовать полной отдаче от каждого рубля, каждой тонны металла.

Мы рассмотрели ряд вопросов, связанных с проблемой снижения металлоемкости при разработке новой продукции высокого технического уровня. Многообразие этих вопросов и новизна задач не позволяют в рамках небольшой брошюры осветить их полностью и дать для всех случаев рецепты поведения. Однако многое из сказанного намечает пути дальнейших исследований и решения задач, оно заинтересует инженеров перспективами этой актуальной области.

Литература

- Материалы XXIV съезда КПСС. М., 1971.
- Болотин В. В. и др. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. М., «Стройиздат», 1972.
- Бусленко Н. П. и др. Лекции по теории сложных систем. «Советское радио», М., 1973.
- Вентцель Е. С. Исследование операций. М., «Советское радио», 1972.
- Виноградов А. И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике. Харьков, «Вища школа», 1973.
- Гасс С. Путешествие в страну линейного программирования. М., «Мир», 1973.
- Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительного производства. М., «Стройиздат», 1974.
- Диксон Д. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений. М., «Мир», 1969.
- Зинер К. Геометрическое программирование и техническое проектирование. М., «Мир», 1973.
- Канторович Л. В., Горстко А. Б. Оптимальные решения в экономике. М., «Наука», 1970.
- Комаровский А. З. Повышение эффективности и снижение металлоемкости производства и применения черных металлов. М., «Знание», 1974.
- Маккол Р. (ред.) Справочник по системотехнике. М., «Советское радио», 1970.
- Мастаченко В. Н. Надежность моделирования строительных конструкций. М., «Стройиздат», 1974.
- Налимов В. В. Теория эксперимента. М., «Наука», 1971.
- Первозванский А. А. Поиск. М., «Наука», 1970.
- Поляк А. А. Интенсификация производства и проблемы снижения металлоемкости. М., «Экономика», 1973.
- Растринин Л. А. Системы экстремального управления. М., «Наука», 1974.
- Ривлин Ю. И. и др. Металлы и их заменители. М., «Металлургия», 1973.
- Саймон Г. Науки об искусственном. М., «Мир», 1972.
- Тарасов Е. В. Алгоритм оптимального проектирования летательного аппарата. М., «Машиностроение», 1970.

Уилсон А., Уилсон В. Информация, вычислительные машины и проектирование систем. М., «Мир», 1968.

Феодосьев В. П. Десять лекций по сопротивлению материалов. М., «Наука», 1969.

Хилл П. Наука и искусство проектирования. М., «Мир», 1973.

Чуев Ю. В., Спехова Г. П. Технические задачи исследования операций. М., «Советское радио», 1971.

Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г. Испытания сложных систем. М., «Высшая школа», 1974.

Шац Я. Ю. Основы оптимизации и автоматизации проектно-конструкторских работ с помощью ЭВМ. М., «Машиностроение», 1969.

Шехтель Н. И. Улучшение качества и сортамента проката. М., «Металлургия», 1973.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОПТИМИЗАЦИЯ И КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ	6
О ТРАДИЦИОННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ	13
ТОЛЬКО ЛИ ОПЫТ? ТОЛЬКО ЛИ ТЕОРИЯ?	17
ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ	21
МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕН- НОСТИ	32
НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОД ПРЕДЕЛЬ- НЫХ СОСТОЯНИЙ	37
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РАЗ- РАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ	45
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТАЛЛЫ, ЭКОНОМИЧ- НЫЙ ПРОКАТ, НОВЫЕ ЗНАНИЯ О СВОЙСТВАХ МА- ТЕРИАЛА	47
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРЕССИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	57
ЛИТЕРАТУРА	62

ШРАЙБЕР Михаил Нисонелевич

СОЗДАНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ И МЕТАЛЛОЕМКОСТЬ

Редактор *Г. Флиорент*

Обложка *В. Лукин*

Худож. редактор *Т. Добровольнова*

Технич. редактор *А. Красавина*

Корректор *И. Сорокина*

А 12681. Индекс заказа 55001. Сдано в набор 5/XI 1974 г. Подпи-
сано к печати 8/XII 1974 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага
типографская № 3. Бум. л. 1. Печ. л. 2. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд.
л. 3,41. Тираж 63 000 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва,
Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 2104. Типография Всесоюзно-
го общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.