

Системный подход и моделирование как универсальные методы исследования

Из опыта научной школы академика Ю.Н. Работнова



К.Л. Комаров
профессор СГУПС

Со дня открытия Новосибирского государственного университета в 1959 г. Юрий Николаевич Работнов возглавил подготовку специалистов в области механики деформируемого твёрдого тела. Первая группа студентов-механиков, членом которой являлся и автор настоящего материала, состояла из 10 человек. Эти студенты после специальных собеседований были приняты на 2-й курс после окончания 1-го курса в вузах Москвы, Новосибирска, Улан-Удэ, Алма-Аты и других городов Советского Союза. Собеседование с потенциальными студентами проводили три академика: ректор НГУ Илья Нестерович Векуа, Сергей Алексеевич Христианович и Юрий Николаевич Работнов.

В декабре 2013 г. исполнилось 50 лет нашему выпуску, и за всё это время не появилось ни одного примера такого внимания ведущих научных авторитетов страны к начинающим путь в науку.

Системный подход к подготовке специалистов Юрий Николаевич начал с того, что практически все курсы, связанные с механикой деформируемого твёрдого тела, кроме теории пластичности, он читал студентам сам. Академик читал лекции 10-ти (!) студентам. С самого начала Юрий Николаевич задавал высокую планку требований к уровню самостоятельности и системности в подготовке специалистов-механиков. Лекции Юрий Николаевич проводил в своем кабинете заместителя директора Института гидродинамики, в котором он ещё и руководил отделом прочности. Практическая составляющая подготовки проходила в лабораториях этого отдела.

Примером системного подхода к освоению практического содержания курсов при высокой степени самостоятельности может служить задание автору настоящего материала, обучающемуся на 3-м курсе и студенту того же курса Владимиру Жигалкину (в последующем известному специалисту, доктору наук, заведующему лабораторией Института горного дела).

Задание состояло в том, чтобы двум студентам 3-го курса спроектировать, изготовить, собрать, запустить действующую испытательную установку (размером примерно 1 м), на которой было необходимо исследовать ползучесть трубчатых дюралевых образцов (диаметром 5 мм) на непрерывные знакопеременные нагрузки (растяжение — сжатие) и внутреннее давление при высокой температуре.

Задание было выполнено, и, что очень важно, каждый из участников проекта совершенно чётко определил сферу своих интересов в дальнейшей специализации. Володя Жигалкин выбрал экспериментальную механику, которой успешно занимался до последних дней, а автор этих строк остановился на теоретическом направлении в механике деформируемых сред. Но в обоих направлениях мы стремились сохранять системный подход к изучаемым процессам и моделированию свойств изучаемых материалов.

Всё последующее обучение в университете и дипломирование автор выполнял непосредственно под руководством Юрия Николаевича. Схема взаимодействия состояла в следующем: Юрий Николаевич разрабатывал различные феноменологические модели, описывающие поведение материалов при различных схемах нагружения и температурах (например, скорость ползучести ма-

териала в условиях трещинообразования), а задача студента состояла в том, чтобы предлагаемую модель материала, выраженную в виде математических соотношений, наложить на все опубликованные результаты соответствующих экспериментов в изданиях различных стран.

Приходилось искать подобные результаты в отечественной и иностранной литературе при весьма скромных познаниях в английском, французском, немецком, испанском и других языках. Такая работа развивала кругозор и позволяла приобщиться к современному уровню теории деформируемых сред, в том числе к технологиям моделирования свойств материалов. Итогом этой работы автора стало дипломное исследование «Ползучесть сплошного диска в условиях трещинообразования», в котором была получена оценка времени до разрушения диска, как одного из ответственных элементов ракетного двигателя. Используя ту же модель Ю.Н. Работнова, была решена и задача «чистого изгиба балки прямоугольного сечения в условиях ползучести и трещинообразования», и другие подобные задачи.

В дальнейшем системный подход и моделирование свойств материала, развитый в трудах Ю.Н. Работнова и его учеников, естественным образом был распространён на исследование поведения конструкций с использованием моделей жёсткопластического и упругопластического тела.

Если говорить о прикладном системном анализе, то надо отметить, что эта дисциплина выходит из ряда традиционных наук и имеет меж- или наддисциплинарный характер. К ключевым понятиям прикладного системного анализа относятся:

— объект как реальная сущность (свойство), которая может быть выделена по некоторым признакам;

— система выделения особых классов объектов;

— субъект — любая сущность, в которую входит объект (группа, тип);

— проблема — субъективное отношение субъекта к существующей ситуации.

Любые взаимодействия субъекта с его окружением описываются посредством моделирования.

Пример 1. Ползучесть диска или балки в условиях трещинообразования.

Объект — диск, балка;
Система — двигатель, строительная конструкция;

Субъект — ракета, корабль, самолёт, стартовая установка для запуска ракет;

Проблема — определение времени до разрушения в условиях ползучести и трещинообразования — модель Ю.Н. Работнова (скорость ползучести в условиях трещинообразования).

Результат 1. Получена расчётная формула для определения времени до разрушения диска и балки прямоугольного сечения в процессе ползучести в условиях трещинообразования.

Пример 2. Моделирование механизмов потери несущей способности крупных механических систем под воздействием нагрузок высокой интенсивности (разработано совместно с учеником Ю.Н. Работнова профессором Ю.В. Немировским).

Проблемы, связанные с повреждаемостью конструкций под действием кратковременных нагрузок высокой интенсивности типа взрыва, уже более четырёх десятилетий привлекали к себе внимание. Изучение поведения несущих конструкций при динамическом нагружении имеет первостепенное значение для многих отраслей техники — строительной, авиационной, машиностроительной, кораблестроительной и т.д. Однако даже простой перечень вопросов динамического поведения неупругих конструкций свидетельствует об их сложности и многоплановости.

Помимо трудностей, возникающих при решении динамических задач теории упругости, имеются трудности адекватного математического описания таких факторов, как диссипация энергии при пластическом деформировании, упругая разгрузка из пластических состояний, упрочнение, зависимость предела текучести от скорости деформирования, влияние геометрических изменений и других нелинейных эффектов. Целесообразность преодоления этих трудностей

в некоторых случаях объясняется тем, что учёт пластических деформаций позволяет вскрыть значительный резерв сопротивляемости конструкций динамическим нагрузкам и приводит к существенной экономии материальных ресурсов.

Большая часть внешней энергии может рассеяться при пластическом деформировании прежде, чем конструкция разрушится или получит заведомо недопустимые остаточные деформации. Последние могут стать мерой повреждаемости конструкций. Определение остаточных деформаций (перемещений) — одна из главных целей динамических расчётов пластических конструкций. При воздействии на конструкцию интенсивных нагрузок, в частности взрывной, оценка повреждаемости на основе остаточных деформаций служит научной базой для разработки методики определения взрывоопасных расстояний.

В настоящее время для решения указанных задач в подавляющем большинстве случаев используется модель идеального жёсткопластического материала. При этом фундаментальная проблема о степени сходимости результатов «жёстко- и упругопластического» анализов для нагрузок взрывного типа оставалась до некоторых пор не исследованной. Отдельные стороны данной проблемы рассматривались только применительно к искусственным задачам, где реальная нагрузка заменялась определенным полем скоростей.

Следует обратить внимание, что практически во всех работах, посвящённых динамическому поведению отдельных элементов и конструкций в целом, исследуется движение либо равномерно распределённых, либо неподвижных нагрузок. В то же время, несмотря на высокую скорость движения взрывной волны, ей требуется конечное время для того, чтобы распространиться на всю поверхность конструкции, расположенной под некоторым углом к её движению. Для крупных строительных объектов и крупных надводных кораблей это время составляет 0,1—1 с.

При этом возможны эффекты, которые априори нельзя проигнорировать. Кроме того, самостоятельную практическую ценность имеют задачи по определению повреждаемости балок, находящихся под действием движущихся нагрузок, обладающих массой и превышающих статически допустимые значения. Такие задачи важны для расчётов временных мостов под автомобильную или железнодорожную нагрузку, а также трубопроводов, подкрановых балок и т.п. В основе решения таких задач лежит моделирование механизмов потери несущей способности конструкций, механизмов их разрушения.

Объект — балки главного направления, перекрестные балки, пластины, оболочки вращения, их комбинации.

Система — борт крупного надводного корабля, мостовые фермы, подпорные стенки.

Субъект — крупные надводные корабли, мосты, строительные конструкции.

Проблема — расчёт остаточных прогибов конструкций под действием динамических нагрузок, превышающих статически допустимые нагрузки, в том числе обладающих массой.

Модель — жёстко-пластическая модель твёрдого тела.

Результат 2. Построен алгоритм расчёта остаточных прогибов перекрытий, образованных системой взаимно перпендикулярных балок и пластиной, в зависимости от соотношений жёсткостей элементов, образующих перекрытие. Результаты были использованы специальными структурами для расчёта на действие взрывных нагрузок надводных и подводных судов различного типа.

Пример 3. Системный анализ в методах неразрушающего контроля деталей металлических конструкций, деталей подвижного состава из сталей и сплавов.

Высокая конструктивная прочность является одним из основных факторов, позволяющих обеспечить безопасность эксплуатации деталей и машиностроительных конструкций. Однако увеличение прочности, твёрдости и износостойкости металла сопровождается повышением вероятности хрупкого разрушения. Расчётные методы оценки прочности сложных технических систем не позволя-

ют достаточно точно определить состояние, вызванное тем или иным внешним воздействием на конструкцию, в связи с трудностями создания достоверной математической модели. Это приводит к необходимости выполнения экспериментальных исследований механических характеристик таких систем с использованием различных методов неразрушающего контроля.

В процессе эксплуатации металлических конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, в их материале происходит образование и развитие различного рода дефектов. Одним из наиболее опасных дефектов является нарушение сплошности материала в виде трещин, существенно уменьшающих ресурс конструкций и приводящих к авариям.

Важнейшей задачей неразрушающего контроля и технической диагностики является распознавание дефектов, определение их координат, формы, размеров, степени опасности. Различные методы неразрушающего контроля ориентированы на применение в определенных условиях с учетом контролепригодности объекта контроля и взаимно дополняют друг друга, что позволяет получать достоверную информацию о состоянии объекта.

При проведении прочностных испытаний тонкостенных авиационных конструкций измеряется целый ряд физических величин: сила, давление, деформация, перемещение и др. В ходе статических и ресурсных испытаний необходимо системно осуществлять контроль процесса нагружения конструкции и производить количественную оценку несогласования параметров нагруженности реализуемой программы по сравнению с заданной. Это связано с возможными ошибками системы автоматического нагружения и системы измерения сил.

Развитие схемотехники, появление быстродействующих компьютеров, разработка современных диагностических микропроцессорных многоканальных акустоземиссионных систем сделали возможным решение ряда сложных задач, связанных с оценкой степени опасности дефектов и определением остаточного ресурса испытываемого объекта контроля. Дальнейшее развитие тематической базы, разработка более мощного программного обеспечения потребовали создания новых методов, связанных с расчётом координат дефектов в сложных конструкциях с заклепочными и сварочными соединениями, в том числе тонкостенных, с произвольным расположением датчиков пьезоантенны, а также с системным подходом при использовании различных методов неразрушающего контроля для повышения надёжности деталей подвижного состава.

Объект — детали металлических конструкций, детали подвижного состава.

Система — тонкостенные и литые конструкции.

Субъект — несущие элементы конструкций, подшипники, рельсы и рельсовые плиты, боковые рамы, наддресорные балки.

Проблема — диагностика состояния металлических деталей и конструкций методом акустической эмиссии.

Модель — зависимость скорости распространения ультразвука от прочностных свойств сталей и сплавов.

Результат 3. Системный подход к использованию метода акустической эмиссии позволяет определять в реальном времени координаты дефектов в стальных изделиях и изделиях из сплавов, а также тип дефектов и степень их опасности с точки зрения развития дефекта под действующими нагрузками в самых ответственных деталях подвижного состава.

Результаты внедрены на различных промышленных и транспортных предприятиях для автоматизированного неразрушающего контроля эксплуатируемых конструкций, в том числе летательных аппаратов, вагонов и локомотивов.

В работе со своими учениками по широкому спектру научных проблем ученики Юрия Николаевича стремятся передать всё самое лучшее из того, что в них заложил Учитель.