



И.Г. Терегулов, Р.А. Каюмов, К.П. Алексеев

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ОСНОВ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Кафедра образована в 1971 году, возглавил ее д.ф.м.н., профессор И.Г.Терегулов.

Научные исследования сотрудников кафедры охватывают проблемы механики тонких и толстых оболочек, построения уточненных теорий и учета нелинейности механических характеристик типа нелинейной упругости, пластичности, ползучести, а ряд исследований касается одновременного учета физической и геометрической нелинейностей. Много внимания уделяется вопросам, связанным с вариационными принципами механики деформируемого тела.

В последние годы научные исследования на кафедре проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Академии наук РТ. Эти исследования соответствуют уровню передовых разработок в мире, а по некоторым результатам превосходят их.

В теории пластин и оболочек существенной является та ее часть, в которой исследуются анизотропные пластины и оболочки. Среди них к отдельной группе со специфическими особенностями относятся оболочки, армированные высокопрочными волокнами, существенно повышающими прочностные свойства материала. Так как эти оболочки зачастую изготавливаются путем послойной компоновки однонаправленно армированных структур - лент или пластин, то, естественно, изучению были подвергнуты именно эти структурные элементы с тем, чтобы в последующем их свойства учесть в расчетах многослойных оболочек.

Опираясь на то, что в направлении армирования жесткость однонаправленно армированных структур существенно выше, чем в поперечном направлении армирования, целесообразно было поставить вопрос об асимптотическом анализе по малому параметру физических соотношений для этих армированных образований. В этом плане выполнены исследования, послужившие основой для ряда публикаций в престижных изданиях. Исследованы были и многослойные анизотропные тонкие и средней толщины оболочки.

Так как разрушение таких (и не только таких) оболочек происходит за счет накопления микрповреждений, то интересы заведующего кафедрой и его учеников были сосредоточены

также на направлении, связанном с проблемой накопления микрповреждений. Эти исследования привели к построению модели микрповрежденности анизотропной среды (ортотропной) путем введения понятия эквивалентной представительной микропоры в виде трехосного эллипсоида. В последующем эти разработки привели к обострению интереса вообще к построению моделей сред, в которых происходят необратимые процессы. К их числу относится и процесс накопления микропор (микрповреждений), который сопровождает процессы пластического деформирования и ползучести, приводя в итоге к разрушению. Естественно, в этом весьма сложном случае необходимо исходить из самых общих позиций, рассмотреть ряд параметров процесса, что в итоге привело к учету термодинамических закономерностей.

Поскольку потенциал для напряжений в задаче об упругом режиме деформирования есть следствие закона сохранения механической энергии, то было выдвинуто предположение, что из соотношений термодинамики и для случая необратимых (пластических) деформаций тоже можно прийти к определяющим соотношениям. Однако это оказалось не так. Из этого предположения был получен парадоксальный результат - и для случаев пластического деформирования тоже существует потенциал для напряжений. Как выяснилось позже, к такому же выводу пришли и некоторые другие авторы, но они не обратили внимания на то, что этот вывод противоречит всем закономерностям общей механики. Предпринятый Терегуловым И.Г. пересмотр с азов всех путей получения соотношений классической термодинамики позволил прийти к выводу, что соотношения Гиббса, в которых приращения внутренней энергии постулируются полным дифференциалом, а приращение тепла в малом объеме допускает интегрирующий делитель, верны лишь для обратимых двухпараметрических процессов. Данный вывод послужил толчком к построению новой теории необратимых многопараметрических процессов, что, в свою очередь, позволило указать пути построения определяющих соотношений для таких процессов. Классическая термодинамика, предложенная



Гиббсом в конце XIX века, входит в эту новую теорию необратимых многопараметрических процессов как частный случай. Новая теория и ее приложения изложены в книге И.Г. Терегулова [1].

Значительный научный интерес представляет асимптотический метод построения неклассических теорий балок и пластин из ортотропного материала. Для анализа полученных систем дифференциальных уравнений равновесия используется метод малого параметра, который позволяет расслоить сложную в математическом плане задачу на две простые: внутреннюю задачу и задачу погранслоя. Подробно изучается погранслой и формирование краевых условий. Выясняется связь с некоторыми существующими прикладными теориями и с принципом Сен-Венана. Таким образом, с единых позиций исследуются как дифференциальные уравнения задачи, так и краевые условия. Построена процедура получения точного решения, однако особое внимание уделяется построению модели расчета полосы и пластины с точностью  $e^2$  ( $e=h/l$  - малый параметр) в уравнениях и краевых условиях, что, во-первых, достаточно для практического использования, а, во-вторых, при необходимости может быть уточнено.

Изложенный подход можно в дальнейшем использовать для решения новых классов статических и динамических задач тонкостенных конструкций. Особенно продуктивно использование данного подхода к многослойным полосам и пластинам. Это позволяет более глубоко проанализировать поведение таких конструкций, особенно в области постановки краевых условий.

Эти исследования опубликованы в монографии Ю.И. Бутенко [2].

К разработкам высокого уровня относятся методы расчета конструкций по теории предельного равновесия. Один из них основан на получении параметрического уравнения условия текучести в усилиях и моментах для элемента многослойной оболочки. Дальнейший расчет основан на традиционных методах сведения задачи о предельной нагрузке к задаче линейного программирования. Разработанные на основе метода программные продукты позволяют решать широкий круг задач, результаты подтверждаются экспериментами. Второй метод, разработанный Р.А. Каюмовым, основан на сведении задачи о предельной нагрузке к ряду задач неоднородной теории упругости. Исследованы вопросы сходимости метода, применимости его к различным классам материалов, на основе анализа численных экспериментов даны рекомендации по его применению. К достоинствам этого подхода

относятся, во-первых, применимость его к любым конструкциям, к любым теориям оболочек. Во-вторых, этот подход, в отличие от существующих, позволяет с помощью найденного решения задачи неоднородной теории упругости получать как верхнюю, так и нижнюю границы предельной нагрузки. В – третьих, в отличие от обычных методов, он не требует разработки специальных пакетов программ, позволяя использовать стандартные.

Эти исследования опубликованы в ряде центральных академических журналов и монографии [3]. Разработанные программные продукты использовались при расчете на прочность конкретных конструкций в области машиностроения и строительства.

Разработкой мирового уровня является и разработанный Р.А. Каюмовым метод решения задач идентификации механических характеристик материала по результатам испытаний конструкций, основанный на формулировке задачи минимизации обобщенного функционала. Предложенный подход позволяет получить хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов. На его базе разработаны методики, алгоритмы и программы идентификации жесткостных, кратковременных и длительных прочностных характеристик композитного слоя в составе композитной оболочки.

На кафедре создана экспериментальная база для экспериментального сопровождения фундаментальных исследований (основные элементы экспериментальной базы разработаны коллективом кафедры и запатентованы), которая включает:

- установку для исследования механических характеристик волокнистых композитов при кратковременном нагружении (установка изготовлена на базе универсальной испытательной машины ЦДМУ – 30 с модернизированным гидроприводом);

- установку для испытания материалов на длительную прочность (установка изготовлена на базе машины для испытания материалов на ползучесть и длительную прочность АИМА – 5);

- устройства, обеспечивающие крепление трубчатых образцов при осевом растяжении (сжатии), кручении, внутреннем давлении и совместном действии этих нагрузок; комплекты измерителей (электротензометров) малых и больших деформаций;

- автоматизированную систему регистрации и обработки экспериментальных данных на базе современной измерительной и вычислительной техники.

Разработаны методики проведения



экспериментов по определению жесткостных и прочностных характеристик намоточных композиционных материалов на трубчатых образцах как при кратковременном, так и длительном нагружении. Разработаны программное и аппаратное обеспечение для автоматизированной системы обработки экспериментальных данных. Проведены эксперименты на трубчатых намоточных образцах из органо- и углепластика с различной угловой ориентацией лент при кратковременной и длительной ползучести. В ходе экспериментов выявились некоторые особенности исследуемых материалов. Было обнаружено, что для образцов из органо- и углепластика с углами армирования  $\pm 45^\circ$  модули упругости вопреки прогнозируемым значениям в окружном направлении превысили модули упругости в продольном направлении для органопластика в 2.2 раза, а для углепластика - в 1.9 раза.

Доцентом кафедры А.У. Богдановичем в последние годы разработан метод решения задач устойчивости тонкостенных стержней переменного сечения, который является развитием известной теории В.З. Власова.

Необходимо также отметить результаты, полученные в области исследований

математических вопросов существования и единственности решений теории тонких анизотропных нелинейно упругих оболочек.

В заключение отметим еще одно из начинаний в работе кафедры – это проведение совместных исследований с кафедрами металлических конструкций, железобетонных и каменных конструкций, строительных материалов, водоснабжения и водоотведения. Такое сотрудничество обогащает опытом и знаниями исследователей кафедр и позволяет поддерживать их научный уровень, получать результаты высокого уровня.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Терегулов И.Г. Нелинейные задачи теории оболочек и определяющие соотношения. Казань: Изд-во "ФЭН". - 2000 г.
2. Бутенко Ю.И. Вариационно-асимптотические методы построения неклассических методов расчета стержней и пластин. Казань: ЗАО "Новое знание". - 2001 г.
3. Терегулов И.Г., Каюмов Р.А., Сибгатуллин Э.С. Расчет конструкций по теории предельного равновесия. Казань: Изд-во "ФЭН". - 2003 г.