

УДК 539.3

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Образцов И. Ф.

Композитные материалы находят в настоящее время широкое применение в различных областях машиностроения и являются в последние годы объектом интенсивного исследования в работах теоретического и прикладного направления. Интерес к этим материалам связан прежде всего с тем, что они обладают комплексом свойств и особенностей, существенно отличающих их от традиционных конструкционных материалов (металлических сплавов) и в совокупности открывающих широкие возможности как для совершенствования существующих конструкций самого разнообразного назначения, так и для разработки новых перспективных конструктивных форм и технологических процессов.

Эти свойства порождаются, во-первых, характеристиками исходных компонентов — армирующих элементов (волокон, нитей, жгутов, тканей) и матрицы (полимерной, углеродной, металлической и керамической), и, во-вторых, так называемым эффектом синергизма, связанным с появлением у композиции свойств, которыми не обладают изолированные исходные компоненты. Из характеристик первого рода следует прежде всего отметить высокую удельную (по отношению к плотности) прочность и жесткость композитов при нагружении в направлении армирования, которые определяются как прочностью и жесткостью волокон, так и способностью матрицы обеспечить их эффективную, совместную работу по восприятию внешней нагрузки. Из характеристик второго рода укажем на высокую вязкость разрушения композиций, образованных из хрупких и обладающих низкой трещиностойкостью компонентов (например, стеклянных волокон и эпоксидной матрицы). Наличие многочисленных поверхностей раздела как между волокнами и матрицей, так и между отдельными слоями существенно повышает сопротивляемость хрупкому разрушению и позволяет создавать материалы, у которых высокий уровень статической прочности сочетается с высокой ударной вязкостью. Заметим, что повышение прочности традиционных конструкционных материалов, как правило, сопровождается снижением ударной вязкости.

Перечисленные характеристики, определяющие основные достоинства композитов, далеко не исчерпывают их конструкционных свойств и возможностей. Композиты на основе полимерных матриц отличаются высокой коррозионной стойкостью; сочетание этих матриц с органическими или стеклянными волокнами позволяет получить материал, обладающий электроизоляционными свойствами и радиопрозрачностью, а комбинация полимерной или металлической матриц и углеродных волокон обеспечивает электропроводность. Низкая теплопроводность большинства композитов позволяет эксплуатировать их без дополнительной защиты в условиях интенсивного кратковременного поверхностного нагрева и определяет возможность их использования в качестве теплозащитных и тепло-

изоляционных материалов. Высокая теплостойкость углеродной карбонизованной и керамической матриц в сочетании с высокой прочностью, жесткостью и теплостойкостью углеродных волокон обеспечивает получение материалов, сохраняющих близкий к исходному уровень механических характеристик при температурах, превышающих температуры плавления большинства металлических сплавов. Композиции на основе углеродных волокон позволяют осуществлять направленное изменение коэффициентов линейного температурного расширения, т. е. создавать конструкции, сохраняющие стабильность геометрических параметров в условиях циклического температурного воздействия.

Таким образом, композиты обладают широким спектром полезных, а в некоторых отношениях и уникальных свойств, а их рациональное сочетание позволяет получать эффективные конструкции с высокой степенью весового совершенства, разработка которых предусматривается в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 г. и на период до 2000 г. Однако реализация больших потенциальных возможностей, заложенных в идее композитного материала и в свойствах его компонентов, требует решения комплекса технических задач, в том числе и задач механики конструкций, анализ которых дается ниже.

Основной особенностью композитов как конструкционных материалов является направленный характер их свойств, которыми можно управлять в процессе изготовления конструкции. Как известно, композит, как правило, не существует отдельно от конструкции, а разработанные к настоящему времени эффективные автоматизированные технологические методы (намотки, прессования, вакуумного и автоклавного формования) позволяют получать материалы, обладающие широким спектром механических и физических характеристик. Таким образом, в принципе для каждой конструкции может быть разработан и реализован материал, наиболее полно соответствующий ее назначению, полю действующих нагрузок и условиям эксплуатации. В этом отношении композиты отчасти аналогичны природным материалам, эффективность которых неоднократно обсуждалась в работах по биомеханике.

Итак, первая задача, на которой необходимо остановиться, рассматривая проблемы механики конструкций из композитных материалов, связана с проектированием этих конструкций, предусматривающим помимо традиционного выбора формы и размеров изделия определение вида и структуры композита.

Рассмотрим два примера эффективного использования композитов, с одной стороны, в достаточно хорошо отработанных, а с другой — в перспективных конструкциях. К первым можно отнести равнонапряженные баллоны давления и сосуды, изготавливаемые методом непрерывной намотки. Рациональное сочетание соответствующей конструктивной формы, структуры композита и совершенной технологии позволяет получать конструкции, степень весовой эффективности которых в 2—3 раза выше, чем у металлических прототипов. В настоящее время композитным баллонам давления уделяется большое внимание в связи с возможным использованием их в качестве емкостей для сжатого природного газа, устанавливаемых на автомобилях. Из перспективных элементов конструкций отметим инерционные накопители энергии — маховики. Эффективность использования композитов в этих элементах определяется двумя факторами, вы-

текающими из формулы для накапливаемой в них удельной (по отношению к массе) кинетической энергии  $e = k (\sigma/\rho)$ , — параметром  $k$ , зависящим от конструктивной формы и принимающим максимальное значение 0,5 для идеального свободно вращающегося кольца, и удельной прочностью материала при растяжении ( $\sigma/\rho$ ). Благодаря высокой удельной прочности композитов и возможности создания из них равнонапряженных дисков, у которых значение  $k$  близко к максимальному, удельная энергоемкость композитных маховиков оказывается в 4—6 раз больше теоретической энергоемкости конструкций из традиционных материалов.

Отмечая высокую в целом завершенность теории оптимального армирования композитных систем, необходимо указать на актуальную, важную в прикладном отношении и практически неисследованную задачу оптимального пространственного армирования. Существующие в настоящее время методы позволяют управлять жесткостью и прочностью материала только в плоскости слоя, при этом межслоевая жесткость и сопротивляемость материала расслоению определяются свойствами матрицы и остаются на низком уровне. Эти характеристики могут быть улучшены путем использования пространственных (например, трехмерных) схем армирования, предложенных в последние годы. Разработка теоретических и соответственно конструктивно-технологических методов, позволяющих обосновать и осуществить оптимальное пространственное армирование в окрестностях зон крепления композитных элементов, мест приложения локальных нагрузок, вырезов и т. п., позволило бы существенно расширить область применения композитов.

Отметим также, что основные задачи теории оптимального проектирования решены к настоящему времени для сравнительно простых конструкций типа баллонов давления, гладких панелей и оболочек вращения. В дальнейшей разработке нуждаются комплексные методы, предусматривающие автоматизированное проектирование сложных пространственных конструкций с одновременным определением структуры материала, оптимальной для комплекса силовых и других эксплуатационных воздействий.

Важным этапом процесса разработки любой, в том числе и композитной, конструкции является проверочный расчет, проводимый для обоснования выбранных проектных параметров. Композитные материалы, как известно, отличаются рядом особенностей — анизотропией, слоистым характером, сравнительно низкой межслоевой жесткостью и прочностью, в совокупности значительно усложняющих расчетные модели. Анализируя обширную литературу, посвященную расчету композитных элементов, можно отметить, что естественное условие адекватности расчетной модели и исследуемого объекта не требует строгого учета всех особенностей поведения композита. В частности, необходимость учета при решении прикладных задач трансверсальных деформаций и кромочных эффектов в тонкостенных элементах представляется в значительной степени преувеличенной.

Как известно, напряженное состояние тонкостенной конструкции, пластины или оболочки можно разделить на основное, которое сводится к погонным усилиям и моментам и удовлетворительно описывается уравнениями, основанными на классической или модифицированной (например, в соответствии с моделью С. П. Тимошенко) гипотезе прямой нормали, и напряженное состояние, соответствующее погранслою, локализо-

ванному вблизи края. Основному напряженному состоянию соответствуют кинематические граничные условия, предполагающие закрепление края по отношению к его смещениям и повороту и не зависящие от конкретного конструктивного способа такого закрепления.

Учет погранслоя в принципе расширяет класс возможных граничных условий, однако не настолько, чтобы можно было описать реальный характер соединения композитных элементов между собой и с металлическими элементами. В соединениях такого рода, как правило, присутствуют болты, заклепки, штифты, упругие прокладки и местные усиления, имеют место нарушения сплошности, однородности или структуры материала, плохо поддающиеся формализации и математическому моделированию. Таким образом, учет напряжений, самоуравновешенных (в отношении усилий и моментов) по толщине стенки, вносит в расчет реальных конструкций лишь формальное уточнение и для решения прикладных задач вполне могут быть использованы более простые уравнения, описывающие только основное напряженное состояние. Заметим, что при этом не исключается последующий более детальный анализ зоны или узлов соединения. Отделив эту зону сечением, расстояние которого от края перекрывает область распространения погранслоя, и приложив в этом сечении усилия и моменты, соответствующие основному состоянию, можно далее исследовать ее с учетом конструктивных особенностей узла соединения более точными аналитическими или численными методами.

По-прежнему актуальными остаются вопросы, связанные с расчетом и проектированием соединений. Низкая прочность композитов при срезе и смятии, отрицательные эффекты, возникающие при перерезании волокон в процессе образования механических соединений, и специфические технологические методы получения неразъемных соединений (приформовка, химическая сварка) обуславливают устойчивую тенденцию к снижению количества стыков и соединений в композитных конструкциях. Опыт успешного внедрения композитов показывает, что в конструкции, спроектированной с учетом как положительных, так и отрицательных свойств композитов, число деталей и узлов, подлежащих соединению на этапе окончательной сборки, оказывается значительно меньшим, чем в аналогичной конструкции из традиционных материалов. Несмотря на эти особенности композитных систем и наличие достаточно полно отработанных к настоящему времени типовых адгезионных, механических и комбинированных соединений, проблема их конструирования и расчета остается одной из основных на пути внедрения композитов в сложные составные конструкции.

В заключение остановимся на одном актуальном классе нелинейных задач механики конструкций из композитных материалов. До последнего времени основной расчетной моделью для анализа композитных элементов являлась модель линейно-упругого анизотропного тела. Возможность широкого использования обобщенного закона Гука при расчете композитных элементов определяется прежде всего тем, что волокна — основные силовые элементы композита — линейно упруги практически до разрушения. Физическая нелинейность, свойственная полимерной и металлической матрицам, слабо проявляется в материале, поскольку жесткость матрицы, как правило, мала по сравнению с жесткостью волокон. Однако в некоторых структурах, например в пластинах и оболочках, образованных из чередующихся слоев композита с углами армирования  $\pm\varphi$ , как

установлено экспериментально, могут проявляться большие (до 100%) относительные деформации, при которых волокна практически не деформируются, но происходит значительное изменение углов между ними. Обсуждаемый эффект может быть использован, в частности, для разработки трансформируемых конструкций, образующихся из заготовок (систем волокон, соединенных эластичной или не полностью отвержденной полимерной матрицей) в результате дополнительного воздействия. Он позволяет также существенно расширить возможности современных технологических процессов, так как теоретические траектории армирования и конструктивные формы часто не могут быть непосредственно реализованы традиционными методами намотки и выкладки.

Выше были рассмотрены некоторые вопросы механики композитов, представляющие, по мнению автора, определенный интерес как в теоретическом, так и в прикладном отношении. Естественно, что они далеко не исчерпывают всех актуальных проблем механики, связанных с композитами, и лишь частично иллюстрируют задачи, появившиеся в последние годы в связи с интенсивным внедрением этих перспективных материалов в несущие конструкции.

Москва

Поступила в редакцию  
28.IV.1986