

**Францев М.Э.**

**Применение многослойных оболочковых конструкций на матрице из легких сплавов для надстроек, рубок и других надпалубных элементов малых судов. (Журнал "Судостроение" № 1 за 2005 год)**

При проектировании современных малых судов важной задачей, наряду с обеспечением высоких мореходных качеств, ходкостью и управляемостью, является повышение их полезной нагрузки. Увеличение полезной нагрузки может выражаться в улучшении обитаемости, условий нахождения экипажа на борту, снижении вредного влияния на него шума и вибрации. Еще одной, не менее важной задачей, является снижение загрязнения окружающей среды путем создания полноценных санитарно-бытовых условий для находящегося на борту экипажа и размещения на судне оборудования для утилизации отходов. Для улучшения обитаемости помещений необходимо увеличивать их объем. Увеличение объема помещений ведет к повышению надводного борта и развитию надстроек, рубок и других надпалубных элементов. Для обеспечения мореходных качеств судна необходимо стремиться к возможно более низкому расположению его центра масс. Для эффективного решения этой задачи представляется рациональным использовать в качестве надпалубных элементов конструкции с низкой удельной массой поверхности, способные выдерживать необходимые нагрузки. Ключом к решению этой задачи является применение современных материалов и технологий, в частности, использование многофункциональных конструкций. Такими конструкциями, например, являются многослойные оболочки.

Под оболочкой понимается тонкостенная конструкция, прочность которой обеспечивается за счет формы поверхности, в отличие от традиционных судовых конструкций, прочность которых обеспечивается за счет работы системы силовых элементов (шпангоуты, кильсоны, карлингсы, стрингеры). Оболочка может состоять из одного или нескольких слоев, которые могут быть выполнены из различных материалов и иметь различные механические характеристики, в том числе, и по различным направлениям. Наличие нескольких слоев позволяет существенно повысить механические характеристики конструкции, повышая ее устойчивость и прочность на изгиб за счет увеличения момента инерции сечения. Использование оболочки одновременно в целях задания формы, обеспечения прочности, тепло- и звукоизоляции, а также использование одного из ее слоев в качестве детали интерьера позволяет существенно сократить соответствующие статьи нагрузки судна. Многослойная оболочка на матрице из легких сплавов позволяет значительно снизить удельный вес площади поверхности по отношению к стеклопластику, в котором используется полимерная матрица, при сопоставимых механических характеристиках. Кроме того, оболочка на матрице из легких сплавов лучше воспринимает знакопеременные нагрузки, более стойка к усталостным разрушениям. Существует несколько причин, сдерживающих широкое применение таких конструкций в малом судостроении. Во-первых, это отсутствие методического обеспечения выбора исходных материалов для создания композита. Во-вторых, это сложность прочностных расчетов многослойных конструкций из разнородных материалов. В-третьих, это отсутствие доступных и широко распространенных технологий их изготовления. При проектировании оболочковых конструкций возникает множество методических вопросов, связанных с необходимостью анализа работы конструкции при одновременном воздействии различных факторов эксплуатации.

При создании практически любого композиционного материала одновременно решаются три разных задачи. Во-первых, это выбор или синтез отдельных

компонентов композита. Во-вторых, это разработка способа применения композита в виде законченной конструкции. И, наконец, это создание технологии изготовления изделия. Как правило, сумма затрат на решение этой триединой задачи определяет стоимость применения того или иного композиционного материала.

При изготовлении металлических композиционных материалов для пространственных несущих конструкций в малом судостроении в качестве матрицы могут применяться деформируемые алюминиевые сплавы. Достоинствами этих сплавов являются малая плотность, высокий уровень механических свойств и технологическая пластичность.

Получение металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов в качестве полуфабрикатов возможно твердофазным и жидкофазным способами. При помощи твердофазного способа получения могут быть изготовлены композиты для корпусных конструкций: «сэндвичевые» конструкции и пакеты из монослоев. Жидкофазный способ позволяет получать алюмопенокомпозиты, которые могут быть использованы для среднего слоя.

Сэндвичевые конструкции состоят из двух прочных облицовочных поверхностей, заполнителя (легкой жесткой сердцевины) и двух адгезионных слоев, связывающих поверхности с заполнителем. Материалами несущих поверхностей в сэндвичевых конструкциях могут служить алюминиевые сплавы. Основные функции заполнителя заключаются в обеспечении устойчивости несущих поверхностей и передаче сдвиговых нагрузок по толщине композита. Для успешного выполнения этих функций заполнитель должен быть легким и жестким. В качестве материала для изготовления заполнителя могут использоваться древесина, пенонаполненные структуры или соты из металла, армидных или крафт-бумаг. Сотовые структуры выпускаются с использованием, главным образом, двух технологических процессов: растяжения пакета и сборки пакета из профилей. При использовании алюминиевых сплавов эффективная плотность сотового заполнителя, полученного по технологии растяжения пакета, составляет 32...192 кг/куб. м, а заполнителя полученного методом профилировки 128...880 кг/куб. м. Сотовый заполнитель повышает изгибную жесткость конструкции. Проиллюстрировать это можно следующим примером. При относительном повышении плотности заполнителя на 6% жесткость конструкции повышается примерно в 39 раз. [10]

Важно отметить опыт изготовления многослойных панелей, разработанных ЦНИИ «Прометей» по заданию ЦНИИ им. акад. Крылова, в качестве исходной корпусной конструкции для формирования обшивки или полотнища переборки. Эти панели включают в себя пластины внешнего и внутреннего слоя и расположенную между ними продольно ориентированную гофрированную мембрану, касающуюся их верхушками гофров. В данной панели, в отличие от традиционных трехслойных панелей, полимерный заполнитель не выполняет механических функций по обеспечению необходимого расстояния между внешней и внутренней пластинами. Эту задачу выполняет продольно ориентированная мембрана. Полимерный заполнитель выполняет функцию термозвукоизоляции и препятствует поступлению воды или воздуха во внутренние полости панели при аварийном повреждении.

Весьма перспективно в конструктивном и технологическом отношении применение пакетов из монослоев. К этой группе композитов относятся листовые материалы, получаемые из алюминиевых сплавов путем склеивания или совместной прокатки разнородных листовых материалов. В результате технологических операций получают многослойные листы, состоящие из последовательно чередующихся слоев алюминиевых сплавов или алюминиевых

сплавов и полимеров. Последние получили в отечественной практике название алор. Толщина таких пакетов может составлять от 1,3 до 2,3 мм в зависимости от количества слоев.

Слоистые композиты позволяют увеличить применение высокопрочных материалов, обеспечивая повышение их надежности, и таким образом, способствуют росту весовой эффективности изделий. Слоистые листы менее, чем обычные чувствительны к концентраторам напряжений в виде отверстий. Долговечность слоистых листов при испытаниях на малоцикловую усталость выявили повышение долговечности по отношению к обычному листу на 20-30% у клееных листов и примерно в два раза у полученных прокаткой. [7, 8, 9]

Еще более привлекательные механические характеристики демонстрируют алоры. Из-за различия механических и теплофизических свойств армирующего наполнителя и матрицы между компонентами материала возникают уравновешенные остаточные напряжения, тем больше, чем выше температура технологического процесса получения композиционного материала. Эти остаточные напряжения играют роль компенсатора при определенных нагрузках. Поэтому существует понятие направленности алора, и в конструкции он располагается наиболее оптимальным образом.

Растяжка металлокомпозита с переходом алюминиевой матрицы в пластическую область, в свою очередь, изменяет величину и знак остаточных напряжений, что обуславливает значительное увеличение долговечности при испытаниях на малоцикловую усталость.

По результатам испытаний установлено, что применение алоров обеспечивает повышение выносливости обшивки с двукратным увеличением долговечности по отношению к листам алюминиевого сплава аналогичной толщины. Конструкционные образцы, имитирующие продольный стык обшивки, по долговечности более чем в три раза превосходят аналогичные конструкции из алюминиевого листа. [7] Имеется опыт изготовления из алора деталей крыла и фюзеляжа летательных аппаратов.

Для создания композиционного материала, получаемого непосредственно на стапеле в процессе изготовления конструкции, можно применять листовые и профильные алюминиевые полуфабрикаты.

Отдельный современный класс материалов составляют, так называемые, пенометаллы. Они представляют собой легкий пористый материал с металлическими стенками ячеек. Плотность пенометаллов мала и составляет 0,05...1,0 г/куб. см. Некоторые из этих материалов с закрытой пористостью способны плавать в воде. Ярким представителем пенометаллов являются алюмопенокомпозиты (АПКМ).

Благодаря ячеистому строению АПКМ обладают высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, способностью гасить акустические и электромагнитные колебания, а также поглощать энергию удара. Малая плотность АПКМ позволяет изготавливать из них крупногабаритные панели сверхмалой массы. Алюмопенокомпозиты являются коррозионно-стойкими, износостойкими, экологически чистыми материалами. Технологические особенности производства АПКМ, относительно низкая стоимость сырья позволяют применять композиты такого типа практически во всех отраслях промышленного производства, в том числе и в малом судостроении. В настоящее время ВИЛС предлагает полуфабрикаты из этих материалов для широкого применения. Важным фактором является то, что цены на алюмопенокомпозиты соизмеримы с ценами на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов. [2]

Большую роль в обеспечении прочности многослойной оболочковой конструкции играют клеевые соединения слоев между собой. Прочность клеевого

соединения определяется в первую очередь адгезионными взаимодействиями на границе раздела двух веществ. При этом всегда происходит взаимодействие между адгезивом и субстратом. Поэтому адгезионная прочность зависит от их химического состава и строения. При разработке клеевого соединения существуют две взаимосвязанные задачи. Это, во-первых, возможность регулирования и направленного изменения интенсивности адгезионных взаимодействий. Во-вторых, это стабилизация достигнутой адгезионной прочности при действии на систему адгезив - субстрат воды, повышенной температуры, механических нагрузок и других факторов. Решение этих задач тесно связано с установлением характера взаимодействий адгезива с субстратом.

Смачивание твердого субстрата жидким адгезивом является необходимым, но недостаточным условием высокой адгезионной прочности. Достаточным условием смачивание может быть тогда, когда оно обусловлено химическим составом поверхностного слоя твердого субстрата, а не адсорбированными на его поверхности молекулами.

Второй задачей при создании клеевого соединения, как было сказано выше, является выбор путей стабилизации адгезионной прочности системы адгезив – субстрат. Важно не только получить клеевые соединения с высокой адгезионной прочностью, но и добиться высокой прочности в процессе эксплуатации. Снижение исходной адгезионной прочности при действии воды или ее паров связано с диффузией сравнительно небольших молекул воды внутрь материала под воздействием которых могут разрываться связи на границе раздела адгезив – субстрат. При этом молекулы воды вступают в конкуренцию с различными группами макромолекул адгезива, взаимодействующими с активными центрами твердого субстрата, занимая их места. Особенно легко разрыв адгезионных связей, сопровождающийся обменной адсорбцией и резким ухудшением адгезионной прочности, происходит в тех случаях, когда взаимодействие фаз обусловлено физическими силами. Ослабление этого нежелательного эффекта возможно при образовании между адгезивом и субстратом более прочных и гидролитически устойчивых адгезионных связей [3, 5, 14].

Состояние границы раздела полимер – твердое тело в большой степени определяет свойства таких систем, как клеевое соединение. Наличие различных дефектов в граничном слое сказывается на прочности, проницаемости и других свойствах клеевых соединений. С улучшением структуры этого слоя значительно повышаются свойства клеевых соединений, особенно стабильность их свойств в условиях длительной эксплуатации.

Проведенные исследования выявили непосредственную связь между возникновением дефектов в пограничном слое (рыхлость, пузыри и свищи) и наличием в клеевом составе летучих растворителей. При толщине клеевого слоя 0,03 мм внутри этих дефектов скапливались пары воды и других коррозионноактивных сред, что приводило к последующим коррозионным повреждениям соединяемых конструкций, усиливающимися в морской атмосфере.

На основании исследований сделан вывод о необходимости предварительной защиты деталей соединения антикоррозионными составами непосредственно перед нанесением клея. Был сделан вывод о меньшей подверженности дефектам в зоне пограничного слоя клеев холодного отверждения с длительной жизнеспособностью.

В качестве одного из примеров клеевого соединения, позволяющего оптимизировать свойства рекомендовано использование клеев холодного отверждения с подслоем из феноло - каучуковых клеев, имеющих высокую эластичность и деформативную способность. При этом дефекты в подслое, вызванные удалением из клея летучих растворителей заполняются клеем

холодного отверждения. При таком сочетании клеев не требуется использования высоких температур и больших давлений для отверждения, но, в тоже время, удастся получить соединение с удовлетворительной прочностью, эластичностью, водо-, атмосферо-, тропикостойкостью, а также термостабильностью. При этом подслоем феноло-каучукового клея выполнял роль антикоррозионной защиты поверхности раздела. [3, 5, 14]

При расчете на прочность надстройки, представляющей многослойную оболочку может быть предложен следующий способ. В зависимости от воздействия нагрузок одного характера вся поверхность надстройки делится на суперэлементы. В дальнейшем суперэлементы делятся на элементы второго порядка в зависимости от геометрических очертаний. Такое деление позволяет отнести каждый из элементов к одному из основных типов многослойных оболочек, по каждой из которых существует методика расчета:

- плоская трехслойная пластина, цилиндрическая, коническая трехслойная оболочка, нагруженные осевой нагрузкой;
- плоская трехслойная пластина, цилиндрическая, коническая или сферическая трехслойная оболочка, нагруженная распределенной нагрузкой, направленной нормально к поверхности;
- плоская трехслойная пластина, цилиндрическая, коническая или сферическая трехслойная оболочка нагруженная распределенной нагрузкой или изгибающим моментом на ограниченной площади, направленными нормально к поверхности. [12]

Все элементы оболочки считаются свободно опертыми по границам раздела. В случае невозможности расчета какого-либо из элементов по существующим методикам, необходимо использовать для расчетов методы вычислительной математики, в частности, метод конечных элементов.

При практическом расчете оболочек реальная анизотропная структура может быть заменена эквивалентной по механическим свойствам ортотропной, имеющей одинаковые с первой нормальные модули упругости и коэффициенты Пуассона в различных направлениях, а также прочностные свойства материала. Метод расчета анизотропной конструкции, основанный на сведении ее к ортотропной, позволяет с достаточной для практических целей точностью решить целый ряд инженерных задач. На этапе проектных исследований он представляется целесообразным, так как дает сравнительно простые зависимости и оправдывается хорошим согласованием теоретических результатов с экспериментами. При этом не отвергается возможность построения более точных решений, позволяющих сделать оценку слоистости материала, свойств исходных компонентов, качества адгезии и т.п. Такие данные дают возможность количественной оценки влияния каждого из перечисленных факторов в отдельности. Расчет многослойных оболочек из материалов с различными упругими характеристиками конструктивных слоев и упругими свойствами каждого слоя в разных направлениях требует вычисления величин жесткости каждого слоя. При проектировании оболочки из ортотропных или изотропных материалов, суть преобразований приведенных величин жесткости состоит в том, что для общего случая конструктивно многослойных оболочек с ортотропными слоями, отличающимися по геометрическим размерам и материалам, упругие свойства приводятся к условному изотропному материалу внутреннего слоя. Параметры жесткостей конструкции приводятся к срединной поверхности оболочки. При расчете оболочек без каркасированного среднего слоя при выводе формул пренебрегается влиянием сближения внешних и внутренних слоев, что позволяет принять модуль упругости заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности равным бесконечности. Принимается равным нулю

нормальный модуль упругости заполнителя, то есть в выражение изгибной жесткости трехслойной конструкции вводятся данные только несущих слоев. При каркасировании среднего слоя дополнительно рассматривается взаимодействие отдельных элементов сечения и распределение напряжений внутри сечения. При вертикальной ориентации ячеек каркаса представляется правомерным в качестве одного из вариантов расчетной схемы принять бесконечно широкую трехслойную пластину, нагруженную вдоль одного размера распределенной сжимающей нагрузкой, со средним слоем в виде сотового заполнителя или полую цилиндрическую оболочку такой же конструкции. [1]

Предложена конструкция надстройки в виде многослойной оболочки на матрице из легкого сплава. В отличие от существующих конструкций, получаемых путем формирования поверхностей из готовых панелей определенных форм, предложенная конструкция предполагает послойное формирование надстройки. Для придания поверхности сложных форм требуется изготовление специальной оснастки для прессования отдельных ее элементов, что резко повышает стоимость конструкции. В тоже время, использование в конструкции оболочки поверхностей, разворачивающихся на плоскость, не требующих обработки давлением, позволяет применить минимум оснастки и приспособлений и добиваться хороших экономических показателей. Оболочка включает внешний и внутренний слои, состоящие из поверхностей, разворачивающихся на плоскость, а также среднего слоя из вспененного полимера, каркасированного алюминиевым профилем. При оптимальном разбиении поверхности на сборочные единицы, могут быть реализованы достаточно сложные дизайнерские решения, в частности, воспроизведены поверхности с двойной кривизной больших радиусов. При проектировании рассмотрены вопросы конструктивного снижения монтажных напряжений, возникающих при послойном формировании изделия. Определены мероприятия по снижению напряжений и деформаций на стыках поверхностей и в узле соединения с корпусом. Разработана последовательность формирования надстройки из блоков и секций. Особое внимание уделено формированию среднего слоя, вопросам возникновения в нем температурных напряжений. Обоснован вывод о необходимости дополнения "сэндвича" клетчатым каркасом профиля из легкого сплава. Конструкция является многофункциональной с внутренним слоем, являющимся деталью интерьера судна. Разработан и скомпонован комплекс технологических процессов, мероприятий по технике безопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии достаточный для изготовления надстройки многослойной оболочковой конструкции на предприятии, обладающем необходимым набором оборудования и персоналом с необходимой квалификацией. Технологические процессы разработаны на основании отраслевых стандартов семейства ОСТ5. Дана жесткая привязка операций и процессов к нормативным документам. Разработаны методы контроля, установлены перечень контролируемых параметров и способы устранения недостатков. Подобраны методы испытаний изготовленных конструкций.

В соответствии с выше изложенными принципами был создан опытный образец малого водоизмещающего катера проекта 82340 с многослойной алюминиево-полимерной надстройкой. В проекте 82340, согласованном Российским Речным Регистром без отступлений от Правил, использованы элементы проекта 371У: корпус, механическая установка и движительно-рулевой комплекс. Сохранено расположение водонепроницаемых переборок. При разработке проекта 82340 при улучшении обитаемости особое внимание было уделено сохранению мореходных качеств прототипа. В сентябре - октябре 2004 года были проведены испытания катера. Испытания включали взвешивание

судна, опыт кренования, швартовные и ходовые испытания, а также замеры уровня шума в пассажирских помещениях и ходовой рубке. Располагая тактико-техническими данными серийных катеров проекта 371У, было проведено сравнение ходовых и маневренных характеристик.

Данные, полученные в результате испытаний, показали, что применение надпалубных многослойных оболочковых конструкций на алюминиевой матрице позволяет при существенном увеличении объема внутренних помещений получить близкие к прототипу значения массы, координат центра масс катера и, соответственно, обеспечить близкие характеристики остойчивости, ходкости и управляемости. Не зафиксировано повышенного влияния ветра на устойчивость на курсе и управляемость катера проекта 8230 по сравнению с прототипом. Не исключено, что это связано с большой энерговооруженностью обоих катеров и довольно высокой их скоростью (на полном ходу  $Fr=0,65$ ). Удалось добиться существенного снижения уровня шума в помещениях, расположенных в непосредственной близости от главного двигателя.

При сравнении катеров проекта 371У и 82340 необходимо выделить следующие преимущества последнего при практически полном сохранении мореходных качеств:

- архитектурно-конструктивный тип катера изменился от полуоткрытого к закрытому типу, что более рационально в условиях климата нашей страны, появилась возможность перемещения внутри помещений от носа до кормы, не выходя при этом на открытую палубу, что повысило безопасность нахождения на катере
- объем пассажирских помещений увеличился примерно в два с половиной раза, появилась полноценная прогулочная палуба, улучшилось естественное освещение и обзор из окон;
- улучшились условия на рабочем месте судоводителя;
- надстройка катера стала долговечной, не требующей сложного ухода.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о возможности серьезного улучшения эксплуатационных качеств малого судна в результате применения многослойных оболочек на матрице из легких сплавов для надстройки, рубки и других надпалубных элементов.

Литература:

1. Александров А.Я. Наумова М.И. Об определении оптимальных параметров элементов авиационных конструкций типа трехслойных пластин и пологих оболочек с сотовым наполнителем. – В кн. Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М. Машиностроение, 1984. С 4-14
2. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы. – Новосибирск: НГТУ, - 2002 – 378 с.
3. Богданов А.С. Михалев И.И. Применение сочетаний клеев для конструкционных соединений. – В сб. Авиационные материалы. М., 1988, с. 142 – 148 (ВИАМ)
4. Васильев В.В. Некоторые вопросы оптимального проектирования тонкостенных конструкций из композиционных материалов.– В кн. Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М. Машиностроение, 1984. С 66-77
5. Гаранина С.Д. и др. Структура и свойства тонкого слоя полимера вблизи твердой поверхности. - В сб. Авиационные материалы. М., 1986, с. 47 – 59 (ВИАМ)
6. Душин А.М., Ивонин Ю.Н., Определение минимального веса трехслойной конструкции. – В сб. Авиационные материалы. М., 1986, с. 89 – 100 (ВИАМ)
7. Загребалов А.А., Душин А.М. Сенаторова О.Г. Применение высокопрочных алюминиевых сплавов в металлополимерных композитах. – В сб. Авиационные материалы. М., 1990, с. 98 – 101 (ВИАМ)

8. Загребалов А.А., Кишкина С.И. Остаточные напряжения и выносливость композиционных материалов. – В сб. Авиационные материалы. М., 1990, с. 87 – 93 (ВИАМ)
9. Кадобнова Н.В. и др. Прочность слоистых алюминиевых листов. – В сб. Авиационные материалы. М., 1984, с. 276 – 282 (ВИАМ)
10. Киреев В.А., Толстобров Е.П. Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых панелей при поперечном изгибе. М., 1977, с. 3 – 17 (ЦАГИ)
11. Королев А.Я. Проблемы химии поверхности и теории адгезии. - В сб. Авиационные материалы. М., 1985, с. 15 – 33 (ВИАМ)
12. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М: Машиностроение, - 2003 – 447 с.
13. Фейгин Л.Л. Некоторые особенности клеесварных соединений. – В сб. Авиационные материалы. М., 1988, с. 133 – 137 (ВИАМ)