

Современное ПЛАСТИКОВОЕ СУДОСТРОЕНИЕ

Артур Гроховский. Фото автора

Сегодня существует достаточно большое количество различных методик укладки стеклоткани в форму, пропитки ее смолой и последующей формовки корпуса. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, а также области применения. Совершенствование и разнообразие конструкционных материалов также накладывает свой отпечаток на применяемые процессы.

Современная стеклопластиковая композиция – очень сложный по составу и структуре материал, состоящий из трех основных компонентов. Это, во-первых, сама химическая матрица или связующее – иными словами, смола и ее отвердитель, во-вторых, армирующие волокна стекло- или углеткани, несущие в композите основную физическую нагрузку, в-третьих, наполнитель, предназначенный для снижения удельного веса и/или себестоимости готового композита. В качестве такого наполнителя часто выступают бальса, пенопласты разных марок и др.

Смолы

В пластиковом судостроении чаще всего применяются полиэфирные смолы, причиной тому служат их умеренная себестоимость и достаточно простая технология применения. Самые дешевые вариации полиэфирных смол – так называемые ортофталевые,

имеющие невысокие механические качества и ограниченную стойкость к соленой воде и ряду горюче-смазочных материалов. Эти смолы постепенно выходят из употребления, однако кое-где еще используются, прежде всего фирмами, которые производят небольшие лодки, значительную часть времени хранящиеся на берегу или рассчитанные на эксплуатацию в речных либо озерных условиях.

Гораздо более высокими механическими и химическими свойствами обладают изофталевые полиэфирные смолы, составляющие сегодня основную долю применяемых в малом судостроении. Но и им уже находится замена в лице винилэфирных смол: последние отличают не только более высокая прочность и химическая стойкость (они крайне мало подвержены гидролизному разложению или осмосу), но и (в отвержденном состоянии) повышенные вязкость и ударная стойкость. Также они берут на себя часть динамических нагрузок, испытываемых корпусом. Однако для полной реализации всех достоинств смол этого типа их отверждение должно происходить по четко контролируемой температурному графику, что сложно осуществить на малых верфях. Еще одной технологической особенностью современных полиэфирных смол с малым выделением стирола

(так называемых низкоэмиссионных) является сосредоточение после начала отверждения в их верхнем слое парафиноподобных веществ, резко снижающих адгезию. Если такая смола начала отверждаться, то последующая приформовка к ней любых деталей возможна уже лишь после тщательной механической обработки поверхности застывшей смолы.

Эпоксидные смолы стоят особняком. Это один из лучших по своим физико-химическим свойствам материалов из имеющихся на рынке. Они отличаются высочайшей химической стойкостью и исключительными прочностными характеристиками, обеспечивающими высокую долговечность построенных с их использованием судов. Опытные яхтсмены знают, что на ходу эпоксидные яхты ведут себя по-иному, чем полиэфирные: их более жесткие корпуса иначе реагируют на волну, удары гребней о корпус тоже звучат по-другому. С современными эпоксидными термоотверждаемыми материалами можно (в отличие от низкоэмиссионных полиэфирных смол) работать в несколько смен (они не ламинируются вплоть до 30–40 ч), что позволяет при необходимости формировать очень толстые или очень сложные поверхности. (Эта их особенность, впрочем, используется в основном как раз при изготовлении



Используемые сегодня стеклоткани и мультиаксиальные волокна имеют различные, порой весьма сложные, типы переплетения



Ручной труд по-прежнему остается неизменной частью пластикового яхтостроения: он применяется как при укладке стеклоткани, так и в процессе ручной пропитки

не крупносерийных, а эксклюзивных яхт.) Эпоксидные смолы обладают и гораздо более высокой адгезией. Однако, как и в случае с винилэфирными смолами, полная реализация всех высоких качеств эпоксидных связующих возможна лишь при «запекании» отформованного корпуса при определенной температуре. Кроме того, при работе с ними нельзя не учитывать их весьма высокую токсичность. Цена же этих материалов в два-четыре раза выше полиэфирных. В последнее время появились эпоксидные смолы с наполнителем из нанотрубок, что сделало их одним из прочнейших синтетических связующих на сегодняшний день (№ 212). Цена этой смолы пока непосильна для современного массового судостроения.

Армирующие материалы

В качестве армирующих материалов в пластиковом судостроении используются в основном стеклоткани во многом благодаря универсальности их качеств: тут и цена, и прочность, и долговечность, и многое другое. Основную долю занимают так называемые ткани E-типа (или E-ткани), получившие букву «E» в своем обозначении от слова «electrical». Все дело в том, что первоначально волокна этого типа были созданы для электрической высоковольтной изоляции, и лишь после было обнаружено, что они пригодны для формовки сравнительно крупных изделий. Основными химическими ве-



ществами, входящими в состав этого волокна, являются SiO_2 (около 55%), Al_2O_3 (ок. 15%) и окиси кальция и магния (CaO и MgO), составляющие примерно 20% веса волокна. К недостаткам волокон E-типа следует отнести их невысокий модуль упругости, плохую стойкость к усталостным нагрузкам, относительно высокую (сравнительно с органическими волокнами) плотность. Правда, все это с лихвой компенсируется сравнительно низкой ценой, довольно высокой прочностью, химической, тепло- и огнестойкостью, а также простотой применения.

Относительно недавно начали входить в практику судостроения волокна S-типа, например, они применяются при постройке крупных яхт «Hanse». Буква «S» в индексе произошла от слова «stiffness» (жесткость) и наглядно указывает на основное отличие S-волокон от своих предшественниц. По прочности на растяжение, как можно увидеть из приводимой таблицы, эти волокна превосходят даже углеткань и кевлар, но вот модуль Юнга у них по-прежнему остается низким. Химический состав

этих волокон в процентном отношении заметно отличается от E-типа: SiO_2 – около 65%, Al_2O_3 – 25%, и MgO – порядка 10%. Основные недостатки S-тканей такие же, как и E-типа, но к ним надо добавить еще и более высокую цену.

Помимо тканей E- и S-типов существуют и чрезвычайно прочные стекломатериалы R-типа, имеющие высокий модуль упругости, но они пока нахо-

дят применение почти исключительно в аэрокосмической промышленности. Все существующие стекловолна совместимы как с полиэфирными, так и с эпоксидными смолами.

Кроме неорганических стекломатериалов в современном судостроении применяются и органические армирующие волокна двух типов: это арамидные волокна (кевлар и его разновидности) и углеволокно (последнее, строго говоря, нельзя относить к органическим). Эти волокна имеют весьма специфические качества. Молекула кевлара представляет собой очень длинную цепочку, состоящую из ароматической и амидной (отсюда – арамид) групп. При этом в волокне все молекулы ориентированы параллельно (вдоль его оси) и связаны между собой водород-кислородными связями. Такая структура вещества, близкая к огромному кристаллу, и придает кевлару его высокие прочностные свойства. Он отличается очень малой плотностью и высокой ударной стойкостью, а также превосходными абразивными качествами: хорошо противостоит ис-

тирающим воздействиям. Серьезным недостатком кевлара (как и всех арамидных волокон), помимо высокой цены, является его высокая впитывающая способность: материал чрезвычайно гигроскопичен, что затрудняет его применение в корпусах пластиковых судов. Воду постепенно впитывают и обычные (неорганические) стекломатериалы, но по поглощающей способности кевлар опережает их при-

Углеволокно (карбон), напротив, все чаще можно встретить не только в эксклюзивных или очень дорогих серийных яхтах, но и в конструкциях судов среднего класса. Углеволокно получается при нагревании синтетической нити (обычно используется нить из полиакрилнитрила) вплоть до ее обугливания (карбонизации) при температуре около 300° С в обычной атмосфере (при этом разрушаются все

превосходной прочностью на сжатие и растяжение, но плохо переносит изгибы и сильные ударные нагрузки. Используется исключительно совместно с эпоксидными смолами.

Армирующие материалы сегодня имеют форму свободно лежащих параллельных однонаправленных волокон, рулонной ткани либо матов, состоящих из перепутанных между собой сравнительно коротких (около



Стекломаты по-прежнему часто служат для набирания толщины обшивки



Вакуумное и инжекционное формование сегодня – одни из основных методов в яхтостроении



Для приформовки деталей к уже отвержденной «корке» используются специальные смолы и клеи с высокой адгезией, дополнительно подкрашенные контрастным красителем для удобства работы



Для лучшего контроля качества отформованного корпуса на британской фирме «Northshore Marine» (яхты «Southerly») применяются только прозрачные гелькоуты. Потом мастер контроля качества ставит на корпусе свои отметки.

мерно впятеро. В силу некоторых особенностей кевлар применяется почти исключительно в составе эпоксидных композитов, так как он имеет крайне слабую адгезию к полиэфирному связующему. Однако сейчас этот материал почти полностью ушел из корпусов (как и предсказывал в интервью с нами известный конструктор Фридрих Юдель, № 200), оставаясь лишь в деталях и узлах, подвергающихся высоким истирающим или ударным нагрузкам: в привальных брусках, спинакер-гиках, палубных накладках.

водород-кислородные связи) и последующего нагрева до 1500–3000° С в атмосфере благородных (инертных) газов. При этом меняется молекулярная структура нити, становясь близкой к графену (№ 212). Температура, при которой нить доводится в среде инертных газов, и определяет основные качества углеродного волокна: относительно низкие температуры (около 1500° С) позволяют получать нить с высокой разрывной прочностью, высокие – с большим модулем упругости. Углеродное волокно отличается

10 см длиной) волокон. Для удобства применения отдельные свободнолежащие однонаправленные волокна перевязываются тонкими нитями в пучки (жгуты), что предотвращает их расползание. Подобным же образом отдельные жгуты могут быть соединены в слои, ориентированные под разными углами друг к другу: би-, три- и квад-раксиальные «пироги», в которых один слой волокон перевязан (именно перевязан, а не переплетен) тонкой нитью с другим. Помимо возможности ориентировать волокна ткани в направлении

Механические качества ряда основных волокон

Волокно	Плотность, г/см ³	Прочность на растяжение, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Стекло E-типа	2.55	Ок. 2000	80
Стекло S-типа	2.49	4700	89
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136
Углеткань	2.00	Ок. 3000	525

основных действующих напряжений, важным достоинством свободно лежащих волокон является отсутствие взаимных переплетений, что улучшает прочностные свойства готового материала. Пропитываемость смолой таких (как однонаправленных, так и мультиаксиальных) волокон также заметно выше, чем у материалов с тканым переплетением, а вот вероятность образования пузырей между слоями, наоборот, ниже. Применение свободно лежащих волокон – одна из основных технологических мер конструктора при создании особо легких и прочных судов, например, гоночных яхт. К недостаткам этого вида армирования



При работе с эпоксидными смолами используются полноразмерные защитные костюмы со встроенными противогазами



следует отнести повышенную трудоемкость их укладки при формовке объектов со сложной геометрией.

Здесь лучше подойдут традиционные тканые волокнистые материалы, выпускаемые ныне в широком ассортименте с самыми разными типами переплетения, прежде всего полотняным и сатиновым. Различие типов переплетения определяет, в первую очередь, легкость укладки стеклоткани в матрицу сложной формы, для этого больше всего подходит ткань сатинового переплетения как наиболее эластичная. Массовое судостроение широко использует стеклоткани как наиболее удобный и универсальный армирующий материал.

Стекломаты в современном судостроении имеют довольно ограниченное применение. Их прочностные качества сравнительно невысоки (на фоне тканей и однонаправленных волокон), поэтому маты обычно используют в качестве наружного слоя обшивки (между гелкоутом и первым слоем стеклоткани), что позволяет избежать «прорисовывания» структуры ткани на наружной поверхности корпуса. Также стеклоMAT укладывают между двумя слоями толстой ткани, где он как обладающий повышенной впитывающей способностью способствует предотвращению образования больших воздушных пузырей. На недорогих лодках стекломаты, кроме того, используются в качестве своего рода наполнителя для сравни-

тельно дешевого увеличения толщины обшивки.

Ручная формовка

Начать по праву следует с самого старшего способа изготовления пластиковых корпусов: ручной укладки и пропитки стеклоткани, зачастую называемой ручной формовкой. Эта методика появилась еще тогда, когда собственно стеклоткани в ее нынешнем понимании (в виде тканого материала) практически не существовало, и основную долю стекломатериалов составляли стекломаты, представлявшие собой различной толщины рулоны из перепутанных стеклонитей (перепутывание в процессе производства стекломатов обеспечивалось при помощи пневматических устройств). Сам технологический процесс формовки прост и понятен: в форму поверх гелкоута укладывались слои стекломата, последовательно пропитываемые полиэфирной смолой, вплоть до достижения нужной толщины. Как правило, на заре пластикового судостроения должная толщина стеклопластикового корпуса определялась более «на глазок», чем точными расчетами и набиралась в основном по принципам «запас карман не тяготит», «где тонко, там и рвется», «тяжело, зато надежно». Как следствие, весьма многочисленные пластиковые яхты постройки, к примеру, 60-х гг. до сих пор можно встретить на воде.

Продолжение следует