

Конструкция современного корпуса на базе древесины и эпоксидных смол

Источник : книга "The Elements of Boat Strength" , год издания 2000

Автор : Dave Gerr

Перевод С.Б.

От "переводчика". Все приведенные в главе формулы имели графические номограммы , которые я исключил по причине трудностей с интернетом . Ссылки на большинство формул из других глав книги даны по тексту . Перевод делался поверх отсканированного из книги текста и несмотря на многие исправления ошибок распознавания знаков арифметики они могут присутствовать .

За последние тридцать лет деревянное судостроение претерпело своего рода революцию . Как бы ни был прочен и надежен корпус классической конструкции с обшивкой по шпангоутам , он обладает несколькими серьезными недостатками :

- Прочность всей конструкции в целом зависит от прочности каждого элемента крепежа в отдельности
- Что более важно , деревянная конструкция подвержена гниению.
- Древесина - сравнительно мягкий материал , в особенности по сравнению с металлом и корпус может разрушиться от ударных или абразивных нагрузок .
- Периодические разбухание и усушка древесины ведут к ослаблению крепежа и загниванию древесины
- Классическая конструкция хорошего уровня требует применения древесины высочайшего качества , найти которую становится все труднее и дороже .

Современные эпоксидные клеи настолько крепки , эластичны и непроницаемы для водяных паров , что они снимают все эти проблемы . Прочность лодки , элементы которой соединены на эпоксидной смоле , уже не ограничивается прочностью металлического крепежа . Клеевой шов обладает намного большей прочностью , чем отдельный элемент крепежа и вся структура при этом становится единым целым - монококовой конструкцией .

Если окружить каждую отдельную деревянную деталь слоем эпоксидной смолы , влажность ее древесины как бы застывает на том уровне , которое было в момент покрытия . Ни водяные пары , ни кислород , уже не могут проходить свободно через этот барьер (хотя сама пленка в некоторой степени и проницаема , этого недостаточно для развития гнили) . Это не только исключает любую возможность гниения , но и избавляет всю конструкцию от периодического забухания , делая ее стабильной в размерах .

И наконец , оклейка корпуса стеклотканью или другим подходящим материалом значительно повышает сопротивление ударным и абразивным нагрузкам . На ранних этапах корпуса пытались оклеивать на полиэфирной смоле , что обычно не имело успеха . Полиэфирная недостаточно эластична и обладает малой прочностью на отрыв . В отличие от нее эпоксидные смолы обладают тем и другим в достаточной степени и показывают себя очень хорошо . К тому же само тканевое покрытие не подвержено разбуханию на корпусе , конструкция которого пропитана эпоксидной смолой и стабильна .

Характеристики древесины

Полное облачение древесины в эпоксидную смолу и высокая прочность , достигаемая при помощи монококовой конструкции , позволяют для пропитанного смолой корпуса делать выбор из гораздо большего числа пород древесины . Более того , от древесины уже не требуется того высокого качества и не обязательно применение пород , которые от природы стойки к гниению . Как правило , годится практически любая древесина , удовлетворяющая следующим требованиям :

Формула 11-1

- Древесина для обшивки корпуса (малые суда) - 384 - 512 кг /куб.м
- Древесина для обшивки корпуса (большие суда) - 512-704 кг /куб.м
- Шпангоуты , кили , элементы поперечного набора - 512-704 кг/куб.м
- Древесина должна быть с минимумом сучков и прямослойная . Если широко используется древесина тангенциального распила , сечения должны быть увеличены на 8-10 процентов .
- Древесина не должна содержать природных кислот и масел , которые ухудшают прочность клеевого шва (примерами таких пород являются тик и дуб) . Хотя тик и дуб тоже можно клеить эпоксидными смолами , долговечность такой конструкции будет под сомнением , требуется дополнительная подготовка поверхности и опыт склеивания . Для конструктивных связей это не рекомендуется .

Методы постройки

Применяя технологию пропитки древесины эпоксидной смолой , можно построить деревянное судно любой конструкции . Даже корпус с обшивкой из досок можно полностью пропитать смолой (но только в случае , когда он строится по этому методу с нуля) . Корпус с обшивкой вгладь будет иметь пропитанные смолой элементы - шпангоуты , флоры , киль , бимсы , привальный брус , стрингеры должны быть склеены и соединены крепежом . Фанерная палуба и рубка должны быть склеены воедино и покрыты смолой . Однако доски обшивки должны ставиться на обычный крепеж , а не на клей и герметизироваться набивкой . Если применяются традиционные материалы в виде хлопка и дегтя , доски обшивки не должны пропитываться эпоксидной смолой . Это требуется для того , чтобы они , забухнув , обеспечили водонепроницаемость соединения . Можно поступить и по другому , покрыв все доски обшивки по отдельности смолой и установив их на крепеж без клея . В данном случае в щели необходимо будет вклеить длинные узкие полосы клиновидной формы .

Пользуясь технологией пропитки древесины эпоксидной смолой , можно построить такой корпус с обшивкой вгладь , однако процесс будет весьма трудоемким . Стандартными же методами постройки корпусов из древесины и эпоксидной смолы являются реечная , фанерная и диагональная (состоящая из многих стоев шпона) обшивка . Мы рассмотрим все по очереди .

Конструкция реечной обшивки на эпоксидной смоле .

Подобная конструкция является промежуточным звеном между корпусом с классической реечной обшивкой по шпангоутам и корпусом , полностью оклеенным стеклотканью снаружи и изнутри и лишенным большей части традиционного набора . Последние являются фактически композитными корпусами с реечной обшивкой в качестве заполнителя и сродни скорее стеклопластиковому сэндвичу , нежели традиционному деревянному корпусу .

Стандартная реечная обшивка на эпоксидной смоле похожа на классическую реечную обшивку . Разница между ними состоит в том , что все составляющие деревянной конструкции склеиваются между собой эпоксидным связующим судостроительного назначения . Дополнительно к этому каждый из элементов покрывается минимум тремя слоями эпоксидной смолы без наполнителя .

При этом может достигаться значительная экономия трудозатрат :

- Не требуется делать подгонку реек друг к другу или делать ребра реек вогнуто-выпуклыми , чтобы добиться плотного их прилегания . Все рейки имеют прямоугольное сечение и в таком виде ложатся на корпус , позволяя образование естественных щелей по ребрам . Все эти щели заполняются эпоксидной смолой с наполнителем после фиксации каждой отдельной рейки .
- Не требуется соединять рейки на ус для получения необходимой длины . Рейки стыкуются одна в торец другой . Перед стыковкой в торец одной из реек вбивается гвоздь . Торцевые стыки должны отстоять друг от друга не менее чем на шесть реек по вертикали и три шпации по горизонтали (такого типа соединение может впоследствии стать заметным при определенных обстоятельствах . Однако такое соединение достаточно надежно , т.к. если рассматривать всю конструкцию как единое целое , то хорошо разнесенные торцевые стыки представляют в оболочке корпуса собой соединения типа шкантованных и достаточно прочны) .

- Не требуется делать сужение реек по краям , чтобы те ложились параллельно линии борта . Допускается класть рейки под любым естественным углом или кривой , начиная от борта к килю или же наоборот . Но если вам хочется добиться ровного направления реек обшивки надводного борта , вы можете сделать следующее . От линии борта на каждом шпангоуте отмерьте одинаковые расстояния примерно до уровня закругления скулы . Затем начиная с киля обшейте рейкой днище ровно до отметок на шпангоутах . Рейка на днище может лечь как ей будет угодно , с любыми углами и кривизной . Теперь кромку днищевой обшивки надо будет аккуратно обрезать точно по отметкам . Эта линия будет теперь параллельна линии борта . Продолжите обшивку с нее и все рейки будут лежать строго параллельными борту
- На многих лодках вместо стандартных шпангоутов можно использовать постоянные несущие переборки . В подобном случае такие переборки являются конструктивными элементами аналогично тому , что мы имеем в стеклопластиковых корпусах . Размеры переборок рассчитываются по формуле 5-5 . Если такая переборка располагается поблизости от расположения расчетного шпангоута и если переборка представляет собой неразрывное кольцо (с минимальным соотношением по периметру высоты к толщине 6.75 :1) , шпангоут в таком случае не требуется .
- Водонепроницаемые переборки должны соответствовать формуле 9-29 . Их можно ставить на мокрый угольник , крепить к шпангоутам шурупами на клей или комбинировать эти два способа . Угольник должен быть из биаксиальной стеганой ткани , совместимой с эпоксидной смолой.
- Шпангоуты можно ламинировать непосредственно в корпусе , используя его в качестве матрицы . В этом случае привальный брус также можно ламинировать по внутренней поверхности обшивки (по шпангоутам или замещая их). Шельф не требуется , однако привальный брус должен иметь сечение , учитывающее его отсутствие (Ф.9-15).

Наружная оклейка корпуса с реечной обшивкой на эпоксидной смоле .

Все корпуса и палубы подобной конструкции должны оклеиваться стеклотканью или иным похожим материалом (Dynel , Vectra) . Это улучшает абразивную стойкость и гарантирует более толстый наружный слой структуры из волокна и смолы , который еще более защитит древесину от разрушения .

Минимальная толщина стеклоткани на корпусе и надстройках с натуральным видом древесины должна представлять собой один слой ткани весом 270-340 г/м² на эпоксидной смоле . Самые маленькие лодки типа каноэ или скифов требуют ткани весом 170 г/м² . Для тканей Dynel , Vectra или полиэфирной ткани Xupole минимальным весом будет 135 г/м² вне зависимости от размеров корпуса .

Палубы и крыши рубок покрываются стеклотканью согласно формулам 9-19 / 9-26 .

Чем более толстым будет слой наружной оклейки корпуса , тем большей абразивной устойчивостью и прочностью на скручивание он будет обладать . Однако в этом случае корпус придется окрасить , т.к. такой ламинат будет слишком толстым , чтобы сквозь него было видно красивую текстуру дерева . Еще лучше то (что мы позже увидим) , что эти прочность и устойчивость , которые дает оклейка , позволяют снизить толщину реечной обшивки .

- Корпуса с коэффициентом $S_n = 2$ следует оклеивать в несколько слоев биаксиальной стеганой тканью с ориентацией волокон 0/90 , волокно категории E (электро) . Когда такая ткань укладывается под углом 45 градусов к продольной оси корпуса , она выступает как диагональная стяжка и при этом увеличивает жесткость корпуса на скручивание .
($S_n = \text{Длина корпуса [м]} \times \text{Ширина [м]} \times \text{Высота от киля до палубы [м]} / 28.32$)
- Корпуса с коэффициентом S_n менее 2 можно оклеивать обычной стеклотканью вместо биаксиальной .
- Вес стекловолоконного покрытия днища следует увеличивать на один процент на каждый узел скорости свыше 25 .
- Корпуса с коэффициентом S_n ниже единицы не имеют каких-либо преимуществ при использовании данного метода постройки . Вполне годится обычный метод обшивки рейкой на смоле с легкой оклейкой .
- Толщина оклейки увеличивается на 10 процентов для рабочих лодок и оффшорных круизных судов .

- При наличии шпангоутов , переборок и внутреннего киля внутренняя оклейка не требуется и не рекомендуется .

Формула 11-2

Толщина оклейки корпуса с реечной обшивкой :

Для корпусов с $S_n=0.6$ и выше :

Суммарный вес ткани = $1,044 + (281.4 \times S_n)$ г/м²

Для корпусов с S_n менее 0.6 :

Суммарный вес ткани = $3.73 + (2,015 \times S_n)$ г/м²

Считаем вес стекловолокна , необходимого для оклейки нашего примера :

$1044 + (281.4 \times 2.97) = 1879.7$, округляем до 1880 г/м²

Формула 11-3

Толщина реечной обшивки с одной внешней оклейкой .

Для определения уменьшенной толщины реечной обшивки на эпоксидной смоле , оклеенной толстым слоем биаксиальной ткани категории Е (по формуле 11-2) , считаем следующим образом :

Толщина = $16.51 \times S_n^{0.3}$ мм

При постройке нашего примера таким методом толщина реечной обшивки будет считаться так :

$16.51 \times 2.97^{0.3} = 24.7$ мм , округляем до 25 мм

Это отличается от 28 мм , требуемых для обшивки рейкой или доской вгладь при отсутствии оклейки .

Двойная диагональная обшивка шпоном поверх рейки

Альтернативой толстому слою стеклопластика снаружи корпуса является укладка двух диагональных слоев шпона . При этом методе внешняя поверхность корпуса все равно требует оклейки стеклотканью весом 270-400 г/м² . Для тканей Dynel и Vectra минимальный вес 135 г/м² . Такая конструкция с формированием двух диагональных слоев шпона обеспечивает жесткость на скручивание , аналогичную толстому слою стеклопластика . Поскольку сам шпон добавляет обшивке ощутимую толщину , толщину рейки соответственно уменьшают .

Корпуса с коэффициентом S_n менее двух при таком методе не имеют каких-либо преимуществ и тут лучше обратиться к обычной обшивке рейкой на смоле .

У этого способа есть два минуса - процесс укладки шпона более трудоемок , нежели стеклопластика и толстый слой стеклоткани обладает более высокой ударной и абразивной прочностью . Тем не менее и этот метод обеспечивает отличную конструкцию корпуса .

Заметим , что хоть в названии и указано "двойная" , нет никаких противопоказаний к тому , чтобы уложить четыре или шесть слоев , уменьшая соответственно толщину каждого для получения необходимой .

Формула 11-4

Толщина двух диагональных слоев шпона поверх реечной обшивки

$$\text{Толщина, мм} = (10.92 \times S_n^{0.2}) - 8.13$$

Таким образом, наш пример будет иметь такую толщину диагональных слоев:

$$(10.92 \times 2.97^{0.2}) - 8.13 = 5.44 \text{ мм, берем два слоя по 3 мм, итого 6 мм}$$

Чтобы посчитать, насколько следует уменьшить толщину нижнего слоя рейки, необходимо знать толщину биаксиального ламината, рассчитанного по формуле 11-2.

Формула 11-5

Перевод толщины биаксиального ламината в вес и наоборот

$$\text{Вес стекломатериала (г/м}^2\text{)} = (\text{Толщина ламината [мм]} \times 813) - 9.7$$

$$\text{Толщина ламината (мм)} = (\text{Вес стекломатериала [г/м}^2\text{]} - 9.7) / 813$$

Мы подсчитали, что вес стекломатериала наружной оклейки нашего примера должен быть 1,880 г/м².

$$\text{Тогда толщина его составит } (1,880 \text{ г/м}^2 - 9.7) / 813 = 2.3 \text{ мм}$$

Формула 11-6

Уменьшение толщины нижнего слоя рейки при диагональной оклейке шпоном.

Толщина рейки уменьшается по отношению к суммарной толщине оболочки при обшивке одной рейкой и толстым слоем оклейки.

Следовательно, в нашем примере толщина рейки при наличии диагональных слоев шпона может быть снижена до 22 мм.

$$24.7 \text{ мм рейки} + 2.3 \text{ мм стеклопластика} = 27 \text{ мм, } 27 \text{ мм} - 6 \text{ мм шпона} = 21; \text{ берем } 22 \text{ мм}$$

Таким образом, оболочка корпуса в нашем примере состоит из следующего:

- Один слой оклейки стеклотканью весом 270-400 г/м² или один слой ткани Dynel или Vectra весом 135 г/м².
- Два диагональных слоя шпона по 3 мм, итого 6 мм
- Рейка 22 мм

Внутренняя конструкция реечного корпуса с диагональной оклейкой шпоном или стеклотканью.

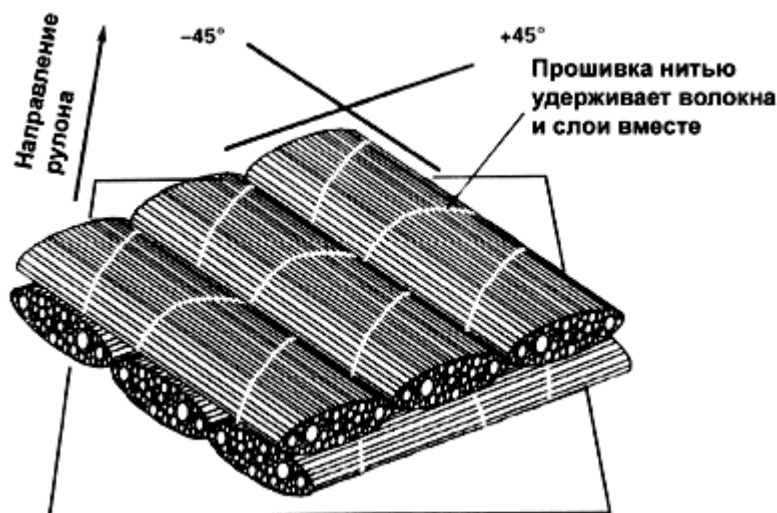
Добавление диагонального шпона или толстого биаксиального слоя ткани дает возможность уменьшить значительное количество поперечного набора. Внутренняя конструкция рассчитывается в этом случае аналогично корпусам из стеклопластика или сэндвичевым со следующими оговорками.

- Не требуются бортовые стрингеры
- Основание под двигатель / подмоторные стрингеры устанавливаются согласно описанию. Материалом может быть сэндвич с наполнителем из бальзы или пенопласта, сплошной

стеклопластик , скрепленный шурупами , болтами и клееный к корпусу на эпоксидной смоле . При их изготовлении из древесины они имеют сечения бальзового или пенопластового заполнителя .

- Там , где имеются скуловые стрингеры , другое усиление скулы не требуется .
- В качестве альтернативы возможно изготовление композитной скулы
- Переборки и сплошные шпангоуты не требуют подкладок из эластомера , необходимых согласно Кодексу Федеральных Норм для пассажирских судов .
- Расположение флоров аналогично правилам для стеклопластиковых корпусов . При использовании древесины их сечение равно сечению бальзового или пенопластового заполнителя .
- При данном методе постройки возможно полностью исключить из конструкции киль и форштевень . Вместо них укладывается реечная обшивка и диагональный шпон . В этом случае толщина стеклопластика в районе киля и форштевня увеличивается в 1.8 раза по сравнению с остальным ламинатом оклейки снаружи и в 1.2 раза - изнутри . Корпус такого типа уже на самом деле являет собой стеклопластиковый сэндвич с древесиной в роли заполнителя .
- Еще один вариант конструкции киля - ламинировать его из фанеры (Формула 11-9С).

Примечание : Все ламинаты и тканевые покрытия требуют применения эпоксидной смолы , сами ткани должны быть совместимы с ней (т.е. не иметь связующих покрытий) , обычно в этой роли выступают стеганные ткани биаксиального типа (рис.) .



Корпус с реечной обшивкой с двусторонним стеклопластиковым покрытием .

Еще одним вариантом конструкции реечной обшивки на эпоксидной смоле является использование толстого слоя биаксиальной ткани снаружи и изнутри корпуса с заполнителем в виде рейки и без диагонального шпона . При таком способе также возможно избавиться от традиционного поперечного набора и прочего конструктива . Опять же при этом следует ориентироваться на методику расчета внутреннего набора для сэндвичевых стеклопластиковых корпусов . (См. также примечания к предыдущей главе) .

Формула 11-7

Толщина реечной обшивки при двусторонней оклейке стеклопластиком

В данном методе используется толстый слой пластика снаружи корпуса в паре с аналогичным слоем изнутри , считаемого по формуле 11-2 . Корпус считается обычным композитным сэндвичевым . Поскольку рейка в данном случае выступает в роли заполнителя , ее толщину можно еще более снизить :

$$\text{Толщина рейки , мм} = 15.24 \times S_n^{0.34}$$

Таким образом , наш пример с двусторонней оклейкой должен иметь толщину рейки $15.24 \times 2.97^{0.34} = 22$ мм

Формула 11-8

Внутренний слой стеклопластика для корпусов с двусторонней оклейкой

Корпус изнутри оклеивается той же биаксиальной тканью категории Е при коэффициенте S_n более двух . При коэффициенте менее двух это может быть обычная стеклоткань . Внутренний стекломатериал должен составлять 66% по толщине или весу от наружного , считаемого по формуле 11-2 .

Возвращаясь к нашему примеру . Вес материала внутренней оклейки : $0.66 \times 1\,880 \text{ г/м}^2 = 1,240 \text{ г/м}^2$

Реечная конструкция с двусторонней оклейкой и стеклопластиковая сэндвичевая .

В отличие от чрезвычайно непрочных (низкомодульных) заполнителей , традиционно используемых в конструкции стеклопластиковых сэндвичевых корпусов , конструкция заполнителя в виде рейки обладает значительной прочностью в продольном направлении , при сосредоточенном изгибе и ударе . Более того , заполнитель из рейки обладает намного большей прочностью на сдвиг , чем низкомодульные заполнители , применяемые в обычном стеклопластиковом судостроении . Помимо этого ламинат из биаксиальной ткани на эпоксидной смоле имеет куда более высокие механические свойства (прочность) , чем стандартный стеклопластик на основе стекломата с ровингом и полиэфирной смолы . Как следствие , хотя структура с заполнителем в виде рейки и стандартный сэндвич считаются аналогичным образом согласно правилам , приведенным в книге , в случае реечного заполнителя толщина наружного и внутреннего стеклопластика будет меньше , чем она была бы в случае обычного стеклопластикового сэндвича .

Диагональная реечная обшивка ("елочка") на днище остроскулых корпусов .

На корпусах с острой гранью скулы , в особенности тех , которые не рассчитаны на постройку из фанеры , бывает более удобно обшить днище рейкой диагонально , в виде "елочки" . Толщина обшивки считается по той же методике , что приводилась ранее , за исключением случая с минимальным днищевым набором . При этом толщину днищевой обшивки следует увеличить в 1.5 раза .

Конструкция ультралегкого корпуса с реечной обшивкой и оклейкой по методу Линдсея Лорда .

Мы до сих пор проектируем корпуса с жесткой оболочкой . Прочность в паре с нормами безопасности требуют значительной жесткости . Но есть и иной подход к этой проблеме : позволить оболочке корпуса небольшую гибкость . Возможно звучит это рискованно , тем не менее это не так . Конструктор Линдсей Лорд разработал , вероятно , самую облегченную технологию реечной обшивки (одну из самых легких за всю историю судостроения) в период после второй мировой войны . При том что Лорд спроектировал по своей методике и подверг обширным испытаниям несколько лодок в диапазоне от 7-метровых разъездных катеров до 25-метровых 40-узловых патрульных , по каким-то причинам в деталях она известна мало . Это довольно странно , потому что методика Лорда позволяет снизить материалоемкость конструкции и получить на удивление крепкие суда . Тем более что в свое время Лорд публиковал результаты .

Корпус с реечной обшивкой по методу Лорда также является композитным сэндвичем . Заполнителем его служит рейка из древесины хвойных пород (сосна , ель , кедр и т.п.) . Он является именно настоящим заполнителем и может быть из достаточно низкосортной древесины . Рейки скреплены друг с другом посредством гвоздей (как в случае с реечной обшивкой на смоле) на временном болване . Затем корпус снаружи и изнутри оклеивается полипропиленовой тканью Vectra или модакриловой Dynel производства Union Carbide . Все клеевые соединения и оклейка производятся на эпоксидной смоле , предназначенной для эксплуатации в морских условиях (как и

в случае обычной реечной обшивки на смоле) . Никакая другая смола не обладает достаточной эластичностью для работы в такой сфере .

Важным моментом является то , что тут не используется обычный стеклопластик . Ткани типа Vectra и Dynel тянутся гораздо выше (т.е. допускают большее удлинение до момента разрыва) , нежели стеклопластик . Когда эта ткань приклеена к сравнительно тонкому реечному заполнителю в виде оболочки , в результате получается композитная панель , которая может прогибаться , гася удары и гнуться и скручиваться при экстремальных нагрузках . Для вышеприведенных тканей такие изгибы совершенно безвредны . Находясь в эпоксидной смоле , оболочка и заполнитель гнутся вместе и разгибаются обратно без каких-либо повреждений . Это означает , что тонкая и легкая конструкция может гасить такую же энергию , как и более толстая и жесткая .

Формула 11-9А

Реечный заполнитель с оклейкой по методике Лорда .

$$\text{Толщина} = 8.63 \times S_n^{0.44}$$

Минимальная толщина заполнителя - 9.5 мм . Палубы и крыши надстроек , по которым будут ходить , должны иметь толщину , в полтора-два раза большую , чем заполнитель корпуса .

Формула 11-9В

Вес ткани для оклейки реечного корпуса по методике Лорда

Стандартный вес тканей Dynel и Vectra - 135 г/м² . Методика предполагает использование какого-то одного из двух типов ткани .

$$\text{Наружный ламинат (г/м}^2\text{)} = 376 \times S_n^{0.43}$$

$$\text{Внутренний ламинат (г/м}^2\text{)} = 249 \times S_n^{0.36}$$

Для палуб и крыш надстроек толщины внутреннего и наружного ламинатов меняются местами . При остатке свыше 68 г/м² в расчетах наружного покрытия количество слоев ткани округлять в большую сторону . При остатке менее 101 г/м² в расчетах внутреннего покрытия количество слоев округлять в меньшую сторону .

При расчетах нашего примера по методике Лорда мы получим следующее :

Заполнитель :

$$\text{Толщина рейки} = 8.63 \times 2.97^{0.44} = 13.9 , \text{ округляем до } 14 \text{ мм}$$

Вес материала оклейки

$$\text{Снаружи : } 376 \times 2.97^{0.43} = 600 \text{ г/м}^2 ; \text{ принимаем равным четырем слоям Vectra или Dynel}$$

$$\text{Внутри : } 249 \times 2.97^{0.36} = 368 \text{ г/м}^2 ; \text{ принимаем равным двум слоям Vectra или Dynel}$$

Внутренняя конструкция

Лорд не использует ни шпангоутов , ни многих других традиционных элементов конструктива , однако у него имеются многочисленные переборки - "на расстоянии 8-10 футов , плюс неполные

переборки - для 80-футового судна" ("Проектирование глиссирующих судов"). Также он использует встроенные цистерны и полы внутренних помещений в качестве дополнительных элементов жесткости корпуса. За основу в большинстве случаев можно взять стандартную внутреннюю конструкцию стеклопластикового сэндвичевого корпуса, рассмотренную ранее с учетом замечаний и оговорок в описании внутреннего конструктива корпуса с реечным наполнителем.

Киль / Закладка

Для килля, форштевня, дейдвуда и ахтерштевня Лорд использует ламинат из фанеры, который выпилен по боковому профилю и склеен вместе до получения нужной толщины. Торцевые стыки соседних слоев следует разносить на значительные расстояния. Обшивка-заполнитель шпунтового пояса ложится на небольшие подкладные рейки, приклеенные смолой к боковым сторонам килля так, чтобы получилась четверть. Требуется минимальная малковка и практически никакой подгонки реек. Любые получившиеся щели и пустоты заполняются эпоксидной шпатлевкой или пенопластом (большие полости). Все крепится по месту небольшими гвоздями на клею, стыкам с помощью смолы и пенных наполнителей придается солидный радиус. Затем вся фанерная конструкция закладки и реечного наполнителя оклеивается определенным пластиком снаружи и изнутри. Реально подобная конструкция килля может считаться наполнителем.

Формула 11-9С

Толщина (т.е. ширина) наполнителя килля по методике Лорда

Для длины корпуса от 6 до 9 м - брать два слоя 15 мм фанеры

Для длины корпуса от 9 до 12 м - брать два слоя 18 мм фанеры

Добавить дополнительный слой 18 мм фанеры для каждого трех метров свыше 12.

Таким образом, 80-футовый корпус будет иметь шесть слоев 18 мм фанеры, что в сумме даст 108 мм.

- При желании вместо методики Лорда для любой части палубы или надстроек может быть использована фанера с оклейкой на эпоксидной смоле (Формулы 9-19 / 9-26).
- Важный момент - внутренняя оклейка тканью должна быть сплошной и непрерывной по всей длине корпуса. Обычно процесс постройки начинается с изготовления постоянного фанерного килля и установки его в перевернутом положении на временные шпангоуты. Корпус обшивается рейкой по временным шпангоутам, по-настоящему крепя рейки к киллю (но не к шпангоутам). Заполняются все полости и радиусы, скругляются угловые стыки обшивки у килля, форштевня и транца. Укладывается наружное покрытие и затем выравнивается. Корпус раскантивается и устанавливается во временные шаблоны для сохранения им формы. Все внутренние временные шпангоуты убираются. Корпус изнутри сглаживается и делаются радиусные переходы на угловых стыках с килем. Корпус оклеивается изнутри сплошными кусками ткани от носа до кормы и от борта до борта. После этого можно устанавливать постоянные переборки и внутренние конструкции.
- Нестандартные формы и заполнения могут быть изготовлены из древесины, пенопласта, бальзы и эпоксидной смолы как того требуется и оклеены подходящим пластиком снаружи или изнутри.
- Лорд даже рули и пиллерсы делал из фанеры и сосны, скрепляя их гвоздями вместе или к корпусу, выравнивал при помощи эпоксидной шпатлевки и затем укладывал сверху необходимое количество слоев пластика на базе тканей Vectra или Dynel.
- На киль и форштевень требуется дополнительный пластик:

При длине менее 40 футов - один слой

При длине от 40 до 80 футов - два слоя

При длине свыше 80 футов - три слоя

- Общая проблема с тканями Vectra и Dynel состоит в том , что они очень легкие (малый удельный вес) , и в эпоксидной смоле не тонут , плавая в ее толще . Выход находят в минимальном количестве смолы , необходимом для пропитки каждого слоя - не больше но и не меньше . Для начала стоит потренироваться на нескольких ненужных листах , чтобы понять материал и далее проблем уже не будет . Применение вакуумного прессования будет еще лучшим решением.

Формованная диагональная обшивка из нескольких слоев шпона

До сих пор мы вели речь о диагональной шпоновой обшивке как части оболочки корпуса (если она вообще имела место) . Однако при изготовлении корпуса можно применить и только один диагональный способ . Такая технология также известна под названием холодного формования , в отличие от ранних способов получения ламинированных корпусов в матрице с применением давления и температуры . Естественно , большинство полученных при помощи автоклава корпусов являются вариантами диагональной конструкции обшивки . Поэтому , когда на сцену вышли клеи , отверждаемые при комнатной температуре , появился и термин "холодное формование" , подразумевающий изготовление корпуса при помощи диагональных полос шпона .

У большинства диагональных корпусов снаружи присутствует лишь тонкий слой наружной оклейки стеклотканью . Он не несет на себе конструкционной нагрузки и предназначен лишь для противостояния абразивным и ударным воздействиям . Изнутри корпус с диагональной обшивкой должен быть , однако , усилен продольным набором . Он обеспечивает необходимую продольную прочность , кроме того он служит в качестве формы , на которую и укладываются полосы шпона . Установленные на большом расстоянии друг от друга шпангоуты вместе с переборками дополняют конструкцию . Они добавляют ей прочность в поперечном направлении .

Диагональный способ обшивки позволяет получить самый легкий корпус , который только можно построить с применением древесины , за исключением методики Лорда и способа DuraKore . Диагональная конструкция имеет множество сторонников , однако на мой взгляд трудоемкость этого процесса себя не оправдывает . Хотя корпус получается и более легким , чем обычный реечный или реечно-диагональный с оклейкой , требуется гораздо более высокий уровень строителя и времени , необходимого на подгонку , приклеивание , забивание скоб для большого числа полос шпона . Для большой лодки размерами свыше 15 м слоев может быть очень много . Я знаком с несколькими опытными специалистами , которые пробовали этот метод и нашли его настолько трудоемким , что вообще отказались от применения древесины и эпоксидной смолы . Вместо этого эти верфи при постройке крупных корпусов переключились на алюминий . Что весьма жаль - хотя алюминий явно обладает массой отличных свойств - в отличие от диагонального метода , многие другие способы реечной обшивки очень экономичны в отношении материалов и трудоемкости .

Мой опыт говорит о том , что при правильных методах реечная обшивка на эпоксидной смоле являет собой наиболее экономичный способ постройки круглоскулого корпуса в единственном экземпляре . Если же мы отбросим соображения трудоемкости в сторону , то корпус с диагональной обшивкой является великолепной конструкцией - легкой , прочной и долговечной . Если речь идет о быстроходных судах - гоночных катерах и яхтах , быстроходных моторных яхтах и патрульных катерах - излишние трудозатраты вполне могут себя и окупить с учетом некоторого улучшения скоростных характеристик .

- Оболочка толщиной 13 мм и менее обычно формируется из двух диагональных слоев шпона .
- Оболочка толщиной от 13 до 25 мм должна состоять не менее чем из трех слоев . В случае трех слоев наружный укладывается в направлении от носа к корме .
- Оболочка толщиной более 25 мм должна состоять не менее чем из четырех слоев . При применении нечетного количества слоев наружный обычно укладывается в продольном направлении , однако это требование не является обязательным .
- Корпуса с толщиной обшивки 25 мм и менее должны оклеиваться как минимум одним слоем стеклоткани весом 270-340 г/м² на эпоксидной смоле . Для небольших лодок типа каноэ и гребных скифов достаточно ткани весом 170 г/м² . Для тканей Dynel , Vectra и Hupole минимальным весом будет 135 г/м² .
- Корпуса с толщиной обшивки более 25 мм и все суда , чья скорость превышает 25 узлов , должны иметь на днище дополнительную оклейку стеклотканью весом 540-680 г/м² . Для

тканей Dynel , Vectra и Xynole минимальным весом на днище будет 270 г/м2 . Борта у таких судов могут иметь более тонкий слой оклейки , применяемый на корпусах с толщиной обшивки менее 25 мм .

Формула 11-13

Толщина диагональной обшивки = $13.97 \times S_n^{0.38}$

Таким образом , наш пример будет иметь такую толщину оболочки корпуса :

$$13.97 \times 2.97^{0.38} = 21.1 \text{ мм ; округляем до 22 мм}$$

Мы будем формировать ее из четырех диагональных слоев шпона по 5.5 мм каждый .

Формула 11-4

Сечение стрингера (квадратное) , мм = $31 \times S_n^{0.38}$

Шаг стрингеров , мм = $279.4 \times S_n^{0.38}$

- Ширина стрингеров в крайних третях их длины может сужаться до 66 % от максимальной
- Стрингеры должны крепиться друг к другу и к форштевню при помощи брештуков , а к транцу - вертикальными кницами (Формула 10-11).
- Стрингеры располагаются таким образом , чтобы максимальный шаг между ними был на миделе . Корпус имеет такую форму , что по оконечностям стрингеры естественным образом соберутся вместе . Это желательно особенно в носовой части , поскольку там ударные нагрузки максимальны .
- Ближайшие к килю стрингеры располагаются от него на расстоянии , вдвое меньшем чем шаг между ними .
- Шаг стрингеров уменьшается на 1 процент для каждого узла скорости свыше 25 .
- Хотя это и не обязательно , лучше при проектировании рассчитать , чтобы стрингеры проходили вдоль рыбин проекции "корпус" теоретического чертежа и впоследствии перенести эти линии на внутреннюю сторону обшивки вдоль всего корпуса . Тогда при укладке вам придется иметь дело только с изгибом и кручением стрингеров .
- Глиссирующие катера должны иметь практически по всей длине ламинированные основания под двигатель , сечения которых считаются по формулам 9-31 и 9-32 . Основания в корпусе с диагональной обшивкой должны быть установлены посредством крепежа непосредственно к оболочке . Часто возможно и желательно избавиться от одного или двух днищевых стрингеров в местах , где их функцию с успехом выполняют основания под двигатель .

Возвращаясь к нашему старому примеру , считаем :

$$\text{Сечение стрингеров} = 31 \times 2.97^{0.38} = 46.8 \text{ мм , принимаем равным 48 мм , квадратное}$$

$$\text{Шаг стрингеров на миделе} = 279.4 \times 2.97^{0.38} = 422.5 \text{ мм , принимаем равным 420 мм}$$

Если бы он ходил со скоростью 35 узлов , мы должны были бы уменьшить шаг стрингеров до 380 мм . 35 узлов - 25 узлов = 10 . Следовательно , шаг уменьшается на 10 процентов . $422.5 \text{ мм} \times 0.9 = 380.2 \text{ мм}$

Формула 11-5

Шпангоуты и переборки в корпусе с диагональной обшивкой

Стрингеры в поперечном направлении опираются на шпангоуты и переборки . Размеры шпангоутов считаются по формулам 9-2 , а расстояние между ними - по формуле 9-3 . Однако даже для круглоскулого диагонального корпуса это расстояние следует считать как для натесных шпангоутов или же в 2.5. раза больше , чем для обычного круглоскулого корпуса , обшитого доской по шпангоутам . Шпангоуты крепятся только к внутренней поверхности стрингеров , они не касаются оболочки корпуса .

Обычные и водонепроницаемые переборки считаются по формулам 5-5 и 9-29 , однако правило их размещения тут не применимо по причине наличия стандартных шпангоутов . Там , где переборка оказывается рядом с местом расчетного шпангоута и где она являет собой неразрывное кольцо с минимальным соотношением толщины к высоте 6.75 - шпангоут не требуется . Если имеется такое число переборок , какое требует формула 5-5 , то зачастую от многих шпангоутов можно избавиться . Опять же , переборки обычно крепятся только к внутренней поверхности стрингеров , не требуется их контакт с оболочкой корпуса . Тем не менее это возможно , в случае требования водо- и газонепроницаемых переборок .

Формула 11-6

Флоры в корпусе с диагональной обшивкой .

Флоры в диагональном корпусе с продольным набором должны заканчиваться поверх одного из днищевых стрингеров . Это снимает концентрацию напряжений и распределяет нагрузку с конца флора вдоль стрингера . На катерах флоры должны простираться вверх как минимум до второго от киля стрингера , по обоим обортам . На парусных яхтах , в районе балластного киля и степса мачты , флоры должны простираться как минимум до третьего от киля стрингера . В остальных случаях флоры должны следовать требованию формул 9-7 и 9-8 .

Очень хорошей альтернативной конструкцией флоров для использования в диагональном корпусе с продольным набором является композитная конструкция из металла и древесины с поперечной металлической полосой , крепящейся на болтах к верхней поверхности стрингеров и деревянными вкладышами снизу в промежутках между стрингерами . Толщина таких флоров невелика , они легки в изготовлении и установке , как на шпангоутах , так и в местах , где их нет .

Основным элементом прочности в поперечном направлении является металлическая полоса , размеры которой должны быть следующими :

Ширина полосы , мм = $60.9 \times S_n^{0.36}$

Толщина , мм = Ширина / 7.5

- Подходящими материалами для изготовления металлических флоров являются кремниевая бронза и нержавеющая сталь марки 316 (на втором месте) . Горячеоцинкованная сталь , грунтованная и тщательно окрашенная перед установкой также может быть использована , однако это мало похоже на экономию с учетом стоимости оцинковки , окраски и недолгого срока службы .
- Полоса флора крепится насквозь к каждому из стрингеров и к килю . Она также крепится к деревянным вкладышам и к обшивке . Для корпусов с S_n менее двух может оказаться проще прикрепить эти вкладыши к обшивке шурупами снаружи корпуса и затем крепить к ним полосы флоров шурупами с обычной или шестигранной головкой изнутри .

Закрепите деревянные вкладыши под полосой на равной высоте или немного выше верхней части киля . Ширина вкладышей должна быть равна ширине полосы . Полоса кладется поверх вкладышей и является одной неразрывной деталью от одного до другого борта . На парусных яхтах в районе киля и степса вкладыши должны достигать третьего стрингера или далее . Высота вкладышей за вторым стрингером должна быть равной их высоте , а металлическая полоса простираться и над третьим стрингером .

Если бы наш пример имел флоры этой конструкции , они были бы такими :

Ширина = $60.9 \times 2.97^{0.36} = 90.1$, принимаем равным 90 мм

Толщина = 12 мм

Конструкция фанерного корпуса на эпоксидной смоле и клеевые швы

(С.Б. Здесь и далее имеется в виду конструкция типа stitch and glue)

Фанерный корпус сам по себе уже предрасположен к изготовлению в виде пропитанной и клееной эпоксидной смолой конструкции . Большой лист фанеры будет стабильней в размерах , нежели обычная доска обшивки (хотя прочность на растяжение у фанеры в два раза меньше) . Листы фанеры проще покрыть и установить на место .

Толщина фанерной обшивки корпуса с применением древесины и эпоксидной смолы должна считаться согласно формуле 9-1 (Толщина= $18.79 \times S_n^{0.4}$, мм). Будучи подвергаемой многократному изгибу , слоеная конструкция фанеры имеет склонность к образованию внутренних дефектов , поэтому не стоит уменьшать эту величину .

Палубы и рубки рассчитываются согласно формул 9-19 / 9-26 .

Эпоксидная скула (Конструкция с оклейкой швов корпуса стеклолентой)

Фанера очень хорошо подходит для таких типов конструкции . Однако оклейка лентой швов может с успехом применяться и на реечных корпусах со скулой , при этом достигается значительная экономия трудозатрат . При формировании узла стыка днища с бортом для начала требуется , чтобы кромки обшивки того и другого касались друг друга . Обычно обшивка днища укладывается и обрезается заподлицо с бортовой . Поскольку эпоксидная смола хорошо заполняет полости , требуется минимальная малковка (причем достаточно грубая) , стык может быть довольно небрежным .

Снаружи грань скулы скругляется , а изнутри ровным гладким слоем по всей длине скулы на угловой стык наносится эпоксидный состав в виде радиуса . Все впадины и отверстия снаружи корпуса заполняются эпоксидной шпатлевкой , после чего корпус снаружи и изнутри покрывается слоем эпоксидной смолы без наполнителей . После этого на внутреннюю и внешнюю стороны скулы укладывается несколько слоев стеклоткани на эпоксидной смоле . Получившаяся в результате скула гладкая , ровная , водонепроницаемая и достаточно прочная . Что еще лучше , она проста в изготовлении , не требует высокой квалификации и точности измерений . Для сравнения , обычные скуловые стрингеры из древесины требуют точной малковки , подгонки кромок , гибки и кручения .

Соединения обшивки на клею

Хотя речь идет о скуле , те же самые принципы могут применены (со здравым смыслом) и в прочих местах , где требуется получить прочный угловой стык , к примеру , стык обшивки днища с килем , швертовый колодец , крыша и стены рубки , соединения палубы с бортом (вместо привального бруса) . В тех местах , где достаточно легко можно установить элементы из древесины (те же привальные брусья) , эти методы не гарантируют снижения время- и трудозатрат . Тем не менее скулы и аналогичные продольные стыки сложной формы значительно легче выполнить по описанной выше методике .

Другими областями применения этих методов является изготовление встроенных в деревянный корпус топливных и водяных цистерн (топливо только дизельное) , встроенных холодильных камер , душевых кабин и даже фанерных раковин для камбуза . Дополнительно к проклейке угловых стыков фанеры топливные баки должны быть изнутри дополнительно оклеены стеклотканью весом 270-400 г/м2 или Vectra/Dynel весом 135 г/м2 . При емкости баков свыше 450 л это покрытие как минимум удваивается .

Ламинированный фанерный киль

Корпус , изготовленный с применением соединений обшивки стеклолентой , может иметь киль , рассчитанный по правилу Лорда (формула 11-9С). В этом случае изнутри стыку его с обшивкой следует придать солидный радиус и оклеить стеклотканью . Дополнительно он оклеивается стеклотканью и в поперечном направлении .

Формула 11-10

Вес стеклоткани для формирования стыков обшивки

Суммарный вес стекловолоконного армирования для формирования скулы (или иного конструкционного стыка) должен быть пропорционален толщине обшивки :

Вес ткани (г/м2) = $(1.345 + [\text{толщина обшивки} , \text{мм} / 220])^{20}$

- В местах , где имеет место стык листов разной толщины , за исходное берется меньшая толщина
- Суммарный вес подразумевает максимальное значение , получаемое при наложении всех слоев снаружи и изнутри .
- Если каждый из слоев в отдельности имеет удельный вес 340г/м2 и менее , он имеет как правило форму стеклоткани . Если вес отдельного слоя более 340 г/м2 , это должен быть биаксиальный материал категории Е (электро) .
- Вес стекломатериала снаружи и изнутри стыка должен быть примерно одинаков . Однако если не удастся достигнуть равенства , этот слой укладывается изнутри корпуса , поскольку снаружи на стык еще ляжет оклейка всего корпуса , добавив ему прочности .

Если бы наш пример был из фанеры с острой скулой , толщина обшивки борта должна была бы быть 25 мм (Формула 9-1) . Тогда для скулы требуется следующее :

Вес ткани = $(1.345 + [25 \text{ мм}/220])^{20} = 1,900 \text{ г/м}^2$

Мы выбираем три слоя биаксиальной ленты весом 400 г/м2 изнутри и два слоя такой же ленты снаружи .

В сумме это дает 2,000 г/м2 , хотя такая точность и не нужна .

Формула 11-11

Снижение толщины пластика по краям .

Тканевое армирование укладывается на соединение в виде множества слоев ленты с перехлестом , которые в сумме дают требуемую толщину на скуле , уменьшаясь к краям ленты . Стекловолоконное армирование должно простираться по обе стороны от стыка листов на величину , равную девяти толщинам обшивки .

Формула 11-12

Размеры эпоксидного радиуса на стыке листов

Эпоксидная смола в форме галтели , находящаяся под стеклотканевым армированием , является сердцевинной соединения . Пропорции ее должны быть такими :

Ширина галтели вдоль борта = 1.5-2 толщины обшивки

Толщина галтели = 0.75-1 толщины обшивки
--

Толщина галтели неизбежно уменьшается с увеличением угла между листами обшивки . Когда он достигает 180 градусов , стык можно считать торцевым соединением и считать толщину галтели нулевой .
