

При сочетании противоречивых требований мореходности и достаточно высокой скорости проектная задача усложняется тем, что на пути к отысканию оптимума необходимо решить несколько подзадач: найти компромиссную форму обводов корпуса, обеспечить прочностные характеристики при движении на волнении, добиться минимальных масс корпуса и двигателей, создать такую структуру распределения масс, при которой инерционные характеристики благоприятно влияют на достижение плавности качки.

Соответственно одной из важных оптимизационных задач, решаемых на начальном этапе конструктивного проектирования судна, является выбор материалов для судовых корпусных конструкций, включающих в качестве главных элементов собственно корпус судна и его верхние строения. От того, насколько правильным и обоснованным будет выбор материала корпусных конструкций, во многом зависит, насколько полно судно будет удовлетворять предъявленным к нему требованиям, насколько эффективно оно будет с точки зрения эксплуатации.

Упомянутые вопросы особенно важны для скоростных спасательных катеров, быстроходных промысловых шхун (рис. 1), служебных катеров. В соответствии с современными принципами проектирования любое судно может быть представлено как система, обладающая сбалансированной совокупностью проектных характеристик. Судно как система состоит из подсистем. Судно как единое целое описывается системой уравнений – нагрузки, вместимости, ходкости, остойчивости и др. Данные уравнения содержат суммы величин и суммы произведений тех же величин на координаты, причем каждое из слагаемых относится к какой-либо подсистеме.[1, 2, 7]



Рис. 1. Промысловое судно с корпусом и верхними строениями из композиционных материалов

ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СУДОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ХОДКОСТИ И МОРЕХОДНОСТИ

М.Э.Францев, канд. техн. наук, СПбГМТУ,
контакт. тел. 8 903 7173125

Показанное на рис. 1 быстроходное промышленное судно обладает многими характеристиками, соответствующими оптимальным проектным решениям. Наряду с рациональной формой корпуса и применением композиционных материалов следует отметить наличие подруливающего устройства и благоприятную продольную центровку. При оптимизационном поиске на первом уровне декомпозиции судно рассматривается как совокупность подсистем, выделяемых по функциональному признаку, например, «Корпус», «Гидродинамический комплекс» и др. Процесс рационального обоснования объектов при проектировании судна заключается в обеспечении рациональных характеристик системы в целом путем придания определенных свойств отдельным ее подсистемам. При этом изменение свойств каждой из подсистем в той или иной степени влияет на изменение характеристик всей системы. В свою очередь, соответствие системы определенным общим требованиям обуславливает определенный уровень свойств ее подсистем. С экономической точки зрения применительно к подсистеме «Корпус» выбор материала влияет как на массу, так и на стоимость. Например, применение композитов приводит к снижению массы корпуса, но в схеме

экономического анализа надо учесть и возрастание удельной стоимости композиционных материалов. Не менее важно учесть возможность снижения мощности при экономии полной массы и соответствующего снижения массы двигателей, массы запаса топлива, цены двигателей и затрат на топливо.

Иерархия подсистем определяется их доминантностью, т.е. степенью влияния свойств той или иной подсистемы на качество системы в целом. Доминантность подсистем судна определяется внешней задачей его проектирования, критериями экономической и технической эффективности, а также доминирующими факторами предполагаемой эксплуатации и определяемыми ими граничными условиями. При проектировании судна как системы необходимо иметь четкое представление о доминирующих факторах его предстоящей эксплуатации. Правильный учет этих факторов позволяет принимать необходимые решения в процессе проектирования по определению, изменению и уточнению свойств подсистем.

В свою очередь, подсистемы первого уровня представляют набор подсистем более низкого порядка. Между смежными уровнями могут существовать однонаправленные и двунаправленные связи. На ранних стадиях проектирования подсистемы второго и дальнейших уровней декомпозиции образуют изолированные группы, замыкающиеся на одну подсистему высшего уровня [3, 8].

Для судов с повышенными характеристиками ходкости и мореходности подсистема «Корпус» доминирующая. Масса корпуса входит в качестве слагаемого в уравнение нагрузки и может быть выражена как

$$D = \sum P_i = P_k + \sum P_{i-1} = q_k(LBH) + \sum P_{i-1}, \quad (1)$$

где D – полная масса судна; P_i – масса i -й статьи нагрузки; P_k – масса по статье нагрузки «Корпус»; $\sum P_{i-1}$ – масса по статьям нагрузки без статьи «Корпус»; L, B, H – длина, ширина, высота борта; q_k – кубический модуль, величина которого зависит от материала корпуса.

Материал корпуса и верхних строений является подсистемой второго уровня декомпозиции по отношению к подсистеме «Корпус». Характеристики материала корпуса входят в качестве множителя в уравнение прочности: [5, 7]

$$M_{\max} = k\sigma_0 W, \quad (2)$$

где M_{\max} – предельный изгибающий момент от общего изгиба судна при наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки; σ_0 – предел прочности материала; k – коэффициент пропорциональности; W – момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе судна.

Предельный изгибающий момент от общего изгиба судна в наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки

$$M_{\max} = DL/k_1, \quad (3)$$

где D – полная масса судна; L – расчетная длина корпуса; k_1 – коэффициент пропорциональности.

Момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе

$$W = F\eta H/2, \quad (4)$$

где F – площадь поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе; H – высота борта; η – коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

Подставив величины (3) и (4) в уравнение (2), получим выражение

$$DL/k_1 = k\sigma_0 F\eta H/2. \quad (5)$$

При рассмотрении выражения (5) можно сделать вывод о необходимости учета при выборе материала корпусных конструкций судна его полной массы, расчетной длины, высоты борта и механических характеристик материала в виде его предела прочности. Площадь поперечного сечения эквивалентного бруса судна определяется конструкцией его корпуса.

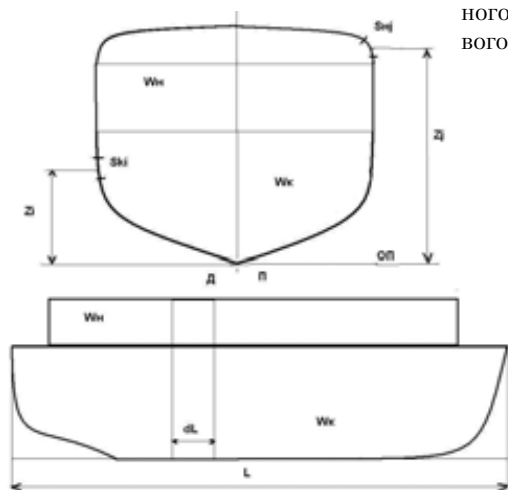


Рис. 2. Расчетная схема, иллюстрирующая возможность применения различных материалов для собственно корпуса и верхних строений

Важным аспектом, определяющим выбор материала корпуса, является учет на качественном и количественном уровне его взаимосвязей с подсистемой «Гидродинамический комплекс». Сложность обводов подводной части корпуса судна в большой степени определяется технологическими возможностями обработки применяемых материалов.

Разделим поверхность корпуса и надстройки на два участка. Первым участком будет подводная часть корпуса и часть надводного борта, вторым участком – поверхность палубы и верхних строений судна. На поверхность первого участка действует комплекс статических и динамических нагрузок. Поверхность второго участка подвергается эпизодическим внешним воздействиям нагрузок, имеющих существенно меньшую величину и принципиально другой характер. Конструкция корпуса и конструкция верхних строений обеспечивают прочность при действии соответствующих нагрузок и имеют различную площадь поперечного сечения и массу единицы поверхности.

Рассмотрим элемент поперечного сечения корпуса и верхних строений длиной ΔL . Выделим на поверхности первого участка элементарную дугу S_{ki} , на поверхности второго участка S_{nj} . Отнесем к площадке $S_{ki}\Delta L$ массу всех корпусных конструкций G_i , находящихся на этой площадке, а к площадке $S_{nj}\Delta L$ – массу всех корпусных конструкций G_j , находящихся на этой площадке на втором участке. Тогда масса поверхности первого участка может быть представлена в виде

$$P_1 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L. \quad (6)$$

Масса поверхности второго участка

$$P_2 = \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L. \quad (7)$$

Определим моменты относительно плоскости мидель-шпангоута и основной плоскости для каждого элементарного участка. Соответственно для первого и второго участков запишем:

$$M_{1x} = \sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L; \quad (8)$$

$$M_{1z} = \sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L; \quad (9)$$

$$M_{2x} = \sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L; \quad (10)$$

$$M_{2z} = \sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L. \quad (11)$$

Масса корпуса

$$P_k = P_1 + P_2 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L. \quad (12)$$

Следовательно,

$$X_{гк} = (M_{1x} + M_{2x})/P_k = (\sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L) / (\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L); \quad (13)$$

$$Z_{гк} = (M_{1z} + M_{2z})/P_k = (\sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L) / (\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L). \quad (14)$$

Формулы (12)–(14) показывают, что разделение всей поверхности корпуса и верхних строений на два участка, имеющих различные механические характеристики и, соответственно, различную массу элементов площади поверхности. Это позволяет изменять массу подсистемы «Корпус», применяя для этих участков различные материалы. Кроме того, это позволяет в определенных пределах управлять положением центра масс по высоте, что дает возможность управлять характеристиками остойчивости и плавности качки.

Конструктивная реализация схемы, показанной на рис. 2, представлена на рис. 3. На ней дополнительно учтены внутренние конструкции.

Как правило, при выборе конструкционного материала для судов с повышенными характеристиками ходкости и мореходности, проектировщик рассматривает два основных варианта: корпус судна изготавливается из легких сплавов или из композиционных материалов.

Применение в проектном анализе способа разделения корпуса судна на верхнюю и нижнюю части позволяет получать компромиссные варианты конструктивных решений. Например, благодаря использованию в качестве материала верхних строений композиционных материалов в сочетании с нижней частью корпуса судна из легких сплавов, можно создавать суда с повышенной весовой эффективностью. А использование в качестве материала корпуса судна стали с повышенными характеристиками прочности в сочетании с верхними строениями повышенной прочности и пониженной массой типа углепластика позволяет в дополнение к весовой эффективности судов, обеспечивать им повышенные характеристики ходкости и мореходности. Распределение материалов и подкреплений в корпусе сов-

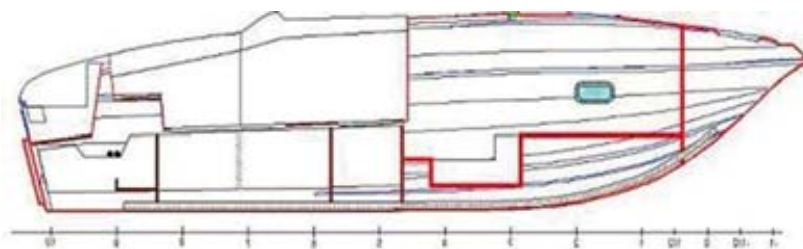


Рис. 3. Конструктивная схема корпуса из композиционных материалов

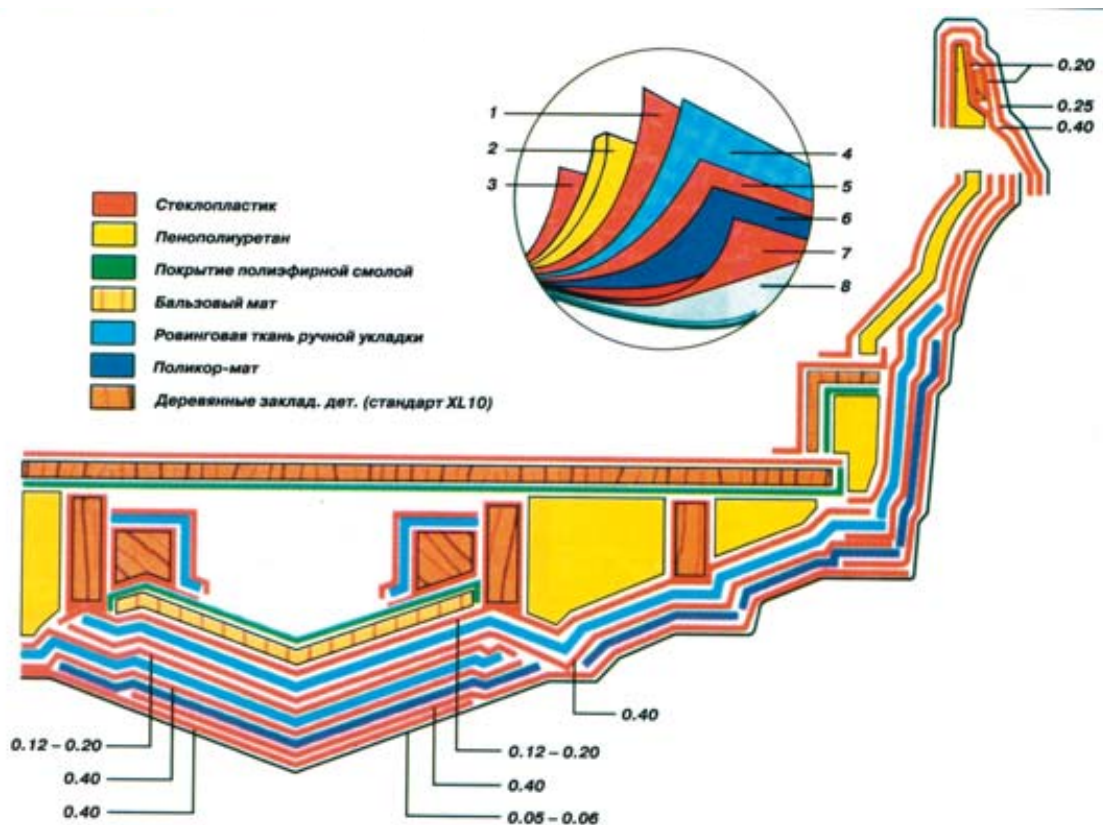


Рис. 4. Схема распределения материалов и подкреплений в корпусе современного судна из композитов
 1 – стеклопластик; 2 – пенополиуретан; 3 – стеклопластик; 4 – ровинговая ткань ручной укладки; 5 – стеклопластик; 6 – поликор-мат из полиэфирных волокон, в который введено связующее со стеклянными микросферами; 7 – стеклопластик; 8 – гелькоут

ременного судна из композитов иллюстрируется схемой по рис. 4.

Существенное влияние на выбор материала оказывают экономические соображения. Применение композиционных материалов для корпуса и верхних строений судов с повышенными характеристиками ходкости и мореходности приводит к существенному упрощению и удешевлению их постройки при одновременном сокращении ее сроков.

Для оценки экономического эффекта от применения в конструкции судна материалов с повышенными характеристиками прочности и пониженными характеристиками массы представим полную массу в виде

$$D = \Sigma P_i = q_k (LBH) + p_m N + p_T Nt + \Sigma P_{i-3}, \quad (15)$$

где D – полная масса судна; N – мощность главных двигателей; p_m – измеритель по статье «Механизмы»; p_T – измеритель по статье «Топливо»; t – продолжительность рейса; ΣP_{i-3} – масса по статьям нагрузки без статей «Корпус», «Механизмы», «Топливо».

Для определения мощности судов рассматриваемой группы наименьшую погрешность дает зависимость

$$N = aDv, \quad (16)$$

где v – скорость судна; a – коэффициент пропорциональности, определяемый при анализе базы данных.

Объединение формул (15) и (16) приводит к зависимости

$$D = q_k (LBH) + ap_m Dv + ap_T Dvt + \Sigma P_{i-3}, \quad (17)$$

Оценим экономический эффект на примере промышленного судна, имеющего фиксированную скорость и неизменное время нахождения на промысле. Представим экономию массы корпуса в виде величины ΔP_k . Тогда из (17) можно получить уменьшение полной массы за счет уменьшения массы корпуса в виде [1, 4, 7, 9]

$$\Delta D = \Delta P_k + ap_m \Delta P_k v + ap_T \Delta P_k vt = \Delta P_k (1 + ap_m v + ap_T vt). \quad (18)$$

Формула (18) показывает, что снижение массы корпуса позволяет дополнительно снизить массу механизмов за счет снижения потребной мощности, достаточной для поддержания заданной скорости. Кроме того, дополнительно может быть уменьшен запас топлива за счет сокращения расходных характеристик двигателей. Образовавшаяся экономия полной массы может быть направлена на увеличение полезной нагрузки судна и на достижение более высоких экономических показателей.

Варьируя показатели, определяющие функции цены судна по различным статьям нагрузки, применяя в конструкции судна с повышенными характеристиками ходкости и мореходности различные сочетания композиционных и традиционных материалов, проектант может достичь максимального экономического эффекта, что вместе с обоснованными техническими решениями позволит обеспечить конкурентоспособность проекта судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашик В.В. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1985.
2. Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. – Л.: Судостроение, 1978.
3. Гурович А.Н., Родионов А.А. Проектирование спасательных и пожарных судов. – Л.: Судостроение, 1971.
4. Короткин Я.И., Рабинович О.Н., Ростовцев Д.М. Волновые нагрузки корпуса судна. – Л.: Судостроение, 1987.
5. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов. – Л.: Судостроение, 1981.
6. Ногид Л.М. Теория проектирования судов. Л.: Судостроение, 1955.
7. Пашин В.М. Оптимизация судов. – Л.: Судостроение, 1983.
8. Раков А.И., Севастьянов Н.Б. Проектирование промышленных судов. – Л.: Судостроение, 1978.
9. Францев М.Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов // Морской вестник. – № 4(28). – С. 93 – 98.
10. Францев М.Э. Задачи и особенности проектирования рыболовных судов с повышенной скоростью // Морской вестник. – № 4(32). – С. 109 – 111.
11. Царев Б.А. Оптимизационное проектирование скоростных судов. – Л.: Изд. ЛКИ, 1989. ■