

УДК 629.12.001

М.Э. Францев, канд. техн. наук, АОЗТ «Нептун-Судомонтаж»
141703, Московская область, г. Долгопрудный, п. Водники.

ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В СОЧЕТАНИИ С КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В КОНСТРУКЦИИ ПАССАЖИРСКОГО ГЛИССИРУЮЩЕГО СУДНА ДЛЯ МАЛЫХ РЕК СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Ключевые слова: Высокопрочные стали, композиционные материалы, глиссирующее пассажирское судно

Статья содержит проектное обоснование целесообразности применения высокопрочных сталей для корпуса глиссирующего пассажирского судна с надстройкой из композиционных материалов на основе уравнения прочности. Расчеты показывают, что при использовании сталей, судно теряет около 9% скорости полного хода с одновременным ростом расходных характеристик примерно на 10%. Стальной корпус в сочетании с композитами может быть альтернативой легким сплавам, особенно для скоростных судов, предназначенных для эксплуатации в сложных условиях, в удаленных районах страны, где нет высокотехнологичной ремонтной базы.

При выполнении исследований системы пассажирских перевозок в рамках НИР по технологическому направлению № 3 «Концептуальные проекты морской техники» («Новый облик») ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы, мероприятие № 3.3.2 «Скоростные пассажирские суда» с шифром «Сибирь», предусматривающей разработку требований к новым скоростным судам для Сибири и Дальнего Востока, а также концептуальных проектов этих судов, было определено широкое использование скоростных судов проектов 946, 946А, Р83 и Р83А под общим проектным названием «Заря».

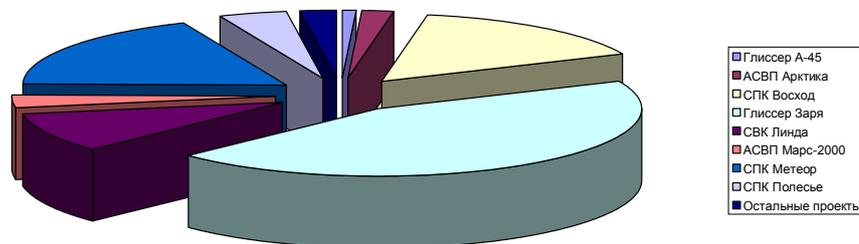


Рис. 1. Структура распределения количества пассажиров, перевозимых скоростными судами различных типов в бассейнах рек Сибири и Дальнего Востока, в том числе скоростными судами типа «Заря»

В настоящее время на долю этих судов приходится почти половина всех пассажиров, перевозимых скоростными судами в бассейнах рек Оби, Иртыша, Енисея, Лены, Амура и ряда других. При этом была определена потребность в строительстве судов такого типа, имеющаяся в ряде регионов.

Стандартный выбор материалов для корпуса скоростного судна ограничивается легкими сплавами. Известно, что легкие сплавы примерно в три раза легче судостроительной стали. Однако допускаемые напряжения для легких сплавов в два-три раза

ниже, чем для судостроительных сталей. Кроме того, легкие сплавы существенно более чувствительны к концентрации напряжений, динамическим многоцикловым нагрузкам, а также ряду других факторов, снижающих эксплуатационные качества корпусов судов из легких сплавов, особенно в условиях мелководья, на реках с бурным течением и другими сложными эксплуатационными условиями. Стоит алюминиевый прокат, в настоящее время, примерно, в десять раз дороже стального проката той же массы. Кроме того, легкие сплавы имеют некоторые технологические особенности изготовления и обработки, существенно удорожающие производство.

Необходимо отметить, что в технических заданиях на проектирование судов, подобных «Заре», выдаваемых в настоящее время проектантам некоторыми судостроительными предприятиями, указывается в качестве материала корпуса не легкий сплав, а судостроительная сталь.

Известно, что все более широкое распространение в России, в том числе в Сибири и на Дальнем Востоке, получает пассажирское судно переходного режима движения КС100-32 со стальным корпусом, имеющее пассажировместимость 30 чел. и скорость хода, по утверждению завода-строителя, 27–29 км/час.

При этом из судостроительной практики известно, что изготовление настроек скоростных судов из тонких листов легкого сплава 1561 вызывало и вызывает технологические трудности на предприятиях-изготовителях. Оно, в частности, требует использования ряда специальных технологий (типа клеено-сварных соединений на СПК), а также других конструктивных и технологических мероприятий. [1] При этом в практике отечественного судостроения имеется положительный опыт создания протяженных надстроек скоростных судов в виде многослойной оболочки из композиционных материалов, сочетающей в своей конструкции, кроме несущих элементов, также элементы изоляции, зашивки и обстройки.

Ниже приведено проектное обоснование целесообразности применения высокопрочных сталей в сочетании с композиционными материалами в качестве материалов корпуса пассажирского глиссирующего судна для малых рек Сибири и Дальнего Востока.

Выполним сравнительный анализ геометрических и других характеристик сечения корпуса скоростного судна при обосновании выбора материалов выполняется с помощью уравнения прочности:

$$M_{\max} = \frac{DL}{k_1} = k\sigma_0 W \quad (1)$$

где M_{\max} – предельный изгибающий момент от общего изгиба судна при наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки;

D – полная масса судна;

L – длина расчетная;

σ_0 – допускаемое напряжение материала;

k, k_1 – коэффициенты пропорциональности;

W – момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса в наиболее опасном сечении судна.

Для упрощения анализа будем считать, что общая прочность корпуса, обеспечивается только за счет собственно корпуса, то есть исключим надстройку из работы на общую прочность судна. Тогда момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса в наиболее опасном сечении корпуса может быть выражен как:

$$W = \frac{\eta_1 FH}{2} \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения эквивалентного бруса;

H – высота борта;

η_1 – коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

$$M_{\max} = \frac{DL}{k_1} = \frac{k\sigma_0\eta_1FH}{2} \quad (3)$$

Выражение (3) устанавливает взаимосвязь между полной массой скоростного судна, его главными размерениями, размерами поперечного сечения эквивалентного бруса и механическими характеристиками материала, из которого изготовлен корпус в виде допускаемых напряжений. При этом площадь поперечного сечения эквивалентного бруса судна определяется конструкцией его корпуса. Момент сопротивления эквивалентного бруса может быть представлен как:

$$W = \eta_1(B + H)t_{cp}H \quad (4)$$

где B – расчетная ширина;

t_{cp} – средняя толщина обшивки.

Тогда изгибающий момент, действующий на корпус судна, может быть представлен как:

$$M_{\max} = k\eta_1(B + H)t_{cрст}H\sigma_{0ст} = k\eta_1(B + H)t_{cралюм}H\sigma_{0алюм}, \quad (5)$$

где: $t_{cрст}$, $t_{cралюм}$ – соответственно средняя толщина обшивки стального и алюминиевого корпусов;

$\sigma_{ст}$, $\sigma_{алюм}$ – допускаемые напряжения соответственно для стального и алюминиевого корпусов.

В результате:

$$\frac{t_{cралюм}}{t_{cрст}} = \frac{\sigma_{0ст}}{\sigma_{0алюм}} \quad (6)$$

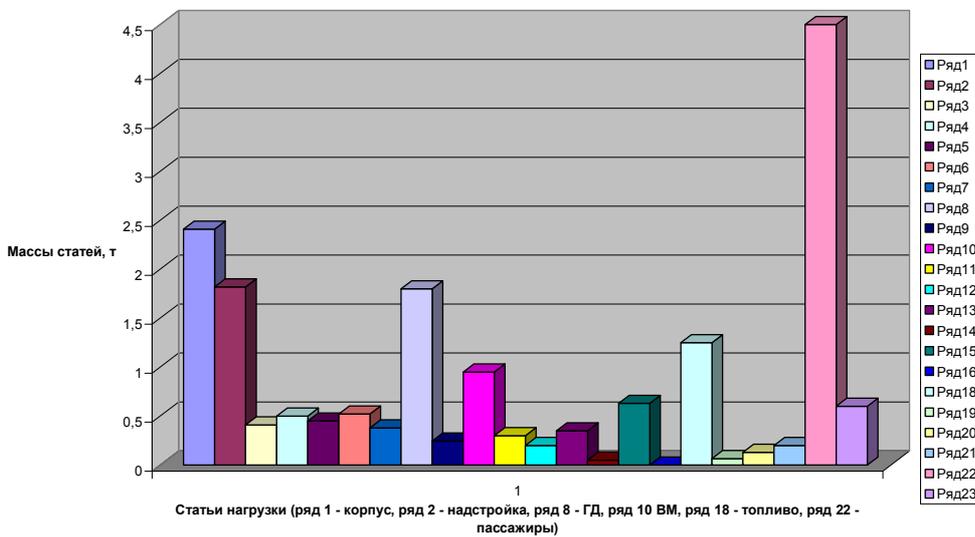


Рис. 2. Нагрузка масс пассажирского глиссирующего судна с корпусом из легких сплавов и надстройкой из композитов

Несмотря на большую разницу в допускаемых напряжениях для легких сплавов и высокопрочных сталей, не может быть пропорционального уменьшения толщины судовых корпусных конструкций при переходе от одного материала к другому. Это связано с тем, что кроме условий прочности, размеры конструкции определяются еще соображениями конструирования, технологии, а также характеристиками ее долговечности. Поэтому при определении минимальных толщин судовой корпусной конструкции из стали необходимо результаты, полученные при расчетах прочности сверять с требованиями нормативных документов, например, Правил Речного Регистра [2].

Произведем сравнительный анализ массовых и экономических параметров вариантов изготовления корпуса скоростного судна из легких сплавов и судостроительных высокопрочных сталей, исключив из него надстройку. Размеры корпуса, определяющие его массу, зависят, в первую очередь, от общего расположения судна. Представим массу металлического корпуса как:

$$P_{кор} = \rho t_{cp} ba(\delta_1 L_{габ} B_{габ} H)^{2/3} \quad (7)$$

где: $P_{кор}$ – масса металлического корпуса;
 $L_{габ}, B_{габ}$ – габаритная длина и ширина корпуса;
 H – высота борта;
 δ_1 – коэффициент полноты формы корпуса;
 δ_1 – коэффициент полноты главной палубы;
 a – коэффициент пропорциональности;
 b – коэффициент, позволяющий учесть массу набора в массе корпуса;
 t_{cp} – средняя толщина обшивки;
 ρ – плотность материала.

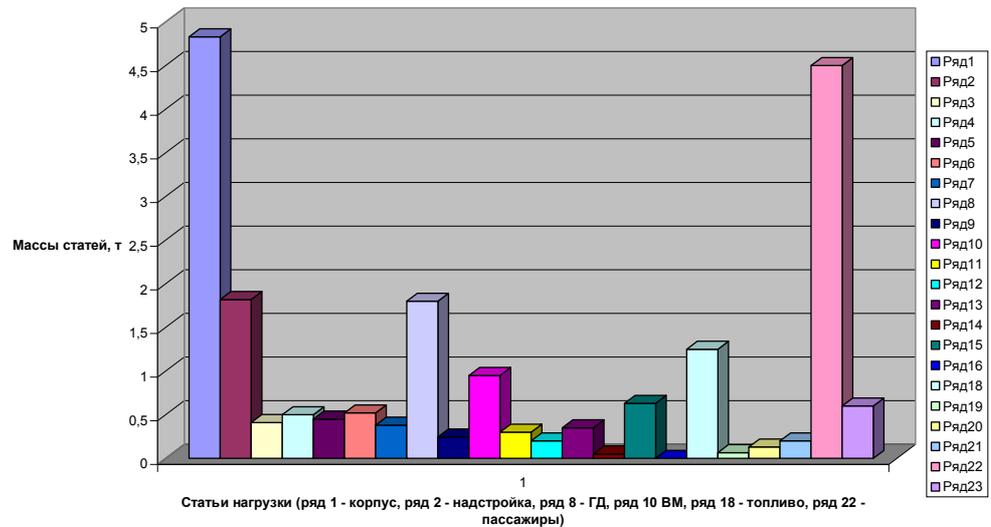


Рис. 3. Нагрузка масс пассажирского глиссирующего судна с корпусом из стали и надстройкой из композитов

Запишем формулу (7) для корпусов судов, изготовленных из судостроительных сталей и легких сплавов, соответственно:

$$P_{корст} = \rho_{ст} t_{срст} ba(\delta_1 L_{габ} B_{габ} H)^{2/3} \quad (8)$$

$$P_{коралюм} = \rho_{алюм} t_{сралюм} ba(\delta_1 L_{габ} B_{габ} H)^{2/3} \quad (9)$$

Определив массу корпусов, изготовленных из стали и легких сплавов, можно определить изменение стоимости корпуса при переходе от легких сплавов к высокопрочным сталям без учета технологической составляющей:

$$\frac{C_{кор ст}}{C_{кор алюм}} = \frac{P_{кор ст} \Pi_{ст}}{P_{кор алюм} \Pi_{алюм}} \quad (10)$$

Определим экономический эффект от применения в качестве материала корпуса высокопрочных сталей вместо легких сплавов. Рассмотрим уравнение нагрузки судна. Масса корпуса входит в качестве слагаемого в уравнение нагрузки и может быть выражена, как:

$$D = \sum P_i = P_k + \sum P_{i-1} = q_k(LBH) + \sum P_{i-1} \quad (11)$$

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 судна.

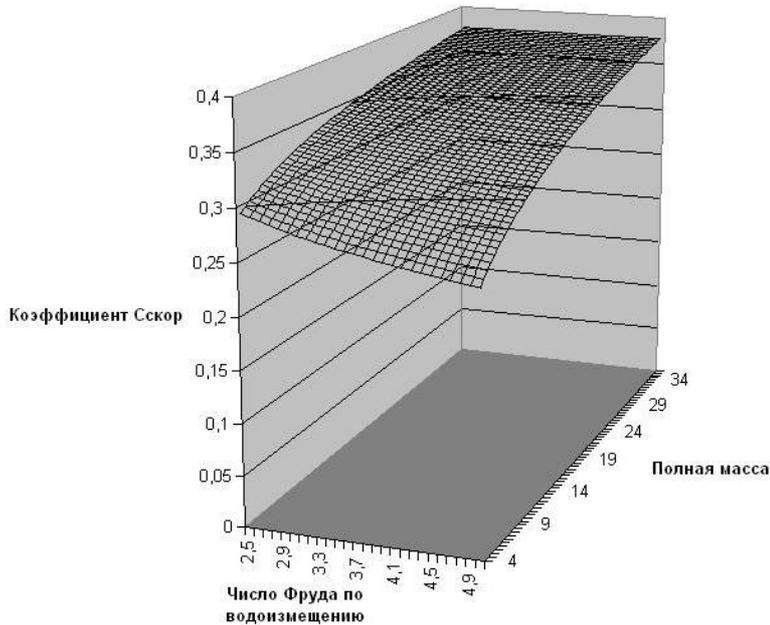


Рис. 4. Изменение суммарного пропульсивного качества в виде коэффициента $C_{скор}$ по интервалу полной массы 4–34 т и чисел Фруда по водоизмещению 2,5–4,9 для глиссирующих судов

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

Для оценки экономического эффекта от применения в конструкции скоростного судна высокопрочных сталей представим полную массу в виде:

$$D = \sum P_i = q_k(LBH) + p_m N + p_T Nt + \sum P_{i-3} \quad (12)$$

где N – мощность главных двигателей;

p_m – измеритель по статье «Механизмы»;

p_T – измеритель по статье «Топливо»;

t – продолжительность рейса;

$\sum P_{i-3}$ – масса по статьям нагрузки без статей «Корпус», «Механизмы», «Топливо».

Используя известное соотношение, представим мощность СЭУ как:

$$N = \frac{Rv}{\eta} \quad (13)$$

где R – сопротивление движению судна;

v – скорость судна;

η – пропульсивный коэффициент.

Выразим сопротивление через полную массу:

$$N = \frac{gDv}{K\eta} \quad (14)$$

где K – гидродинамическое качество «голового» корпуса;

g – ускорение свободного падения.

Представим суммарное пропульсивное качество гидродинамического комплекса в виде коэффициента:

$$C_{\text{скор}} = \frac{K\eta}{g} \quad (16)$$

где $C_{\text{скор}}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый с помощью анализа баз данных.

Тогда для глиссирующего судна определение мощности может быть произведено с использованием суммарного пропульсивного качества по формуле:

$$N = C_{\text{скор}} Dv \quad (17)$$

Объединение формул (12) и (17) приводит к зависимости:

$$D = q_k(LBH) + C_{\text{скор}} p_m Dv + Dv t C_{\text{скор}} p_T + \sum P_{i-3} \quad (18)$$

Оценим экономический и эксплуатационный эффект на примере скоростного судна, имеющего фиксированную скорость и неизменное время нахождения в рейсе. Представим изменение массы корпуса в виде величины ΔP_k . Тогда из формулы (4) можно получить изменение полной массы за счет изменения массы корпуса в виде:

$$\begin{aligned} \Delta D &= \Delta P_k + C_{\text{скор}} p_m \Delta P_k v + C_{\text{скор}} p_T \Delta P_k vt = \\ &= \Delta P_k (1 + C_{\text{скор}} p_m v + C_{\text{скор}} p_T vt) \end{aligned} \quad (19)$$

Наибольший интерес для анализа эксплуатационных и экономических качеств скоростного пассажирского судна представляет величина его расхода топлива на перемещение 1 пассажира на 1 км пути [3] в виде:

$$P_{\text{пасс}} = \frac{qN}{nv} \quad (20)$$

Рассмотренные выше параметры могут рассматриваться критерием оценки целесообразности применения высокопрочных сталей в конструкции пассажирского глессирующего судна для малых рек Сибири и Дальнего Востока.

Для того чтобы определить, как на самом деле влияет замена в качестве материала корпуса легкого сплава на сталь, выполним практический расчет. В рамках НИР шифра «Сибирь» был разработан концептуальный проект пассажирского глессирующего судна с корпусом из легких сплавов и надстройкой из композиционных материалов, имеющего скорость полного хода 55 км/час и пассажироместимость 60 чел.

Его нагрузка масс с корпусом из легкого сплава 1561М представлена в графической форме на рис. 2 и с корпусом из стали 09Г2С – на рис. 3. В нагрузке масс была изменена только одна статья – масса корпуса, которая при замене легкого сплава на сталь возрастает в два раза. При этом полная масса судна возрастает на 13,6%. При анализе нагрузки масс можно увидеть, что не имеется статей, за счет которых можно бы было компенсировать утяжеление корпуса.

Количество двигателей, которые могут быть установлены на скоростные суда данного типа, ограничено. В концептуальном проекте предусмотрена установка отечественных двигателей М419 и М482 мощностью 810 кВт производства ОАО «Звезда», а также MAN D2842LE410 (Германия) мощностью 809 кВт.

Выполним расчет изменения скоростного режима при фиксированной мощности судовой энергетической установки при измененной полной массе за счет утяжеления корпуса. Изменение коэффициента $C_{\text{скор}}$ представлено на рис. 5. [4] Расчет показывает, что утяжеление корпуса и соответствующее увеличение полной массы этого скоростного судна повлекут за собой снижение скорости его полного хода с 55 до 50 км/час, то есть на 9%. При этом судно, двигавшееся в полностью глессирующем режиме при относительной скорости $Fr_D=3,0$, будет двигаться в самом начале режима глессирования при $Fr_D=2,7$, что очень близко режиму движения СВК проекта 14200 «Линда», имеющему расчетный режим при $Fr_D=2,87$.



Рис. 5. Строительство стальных корпусов быстроходных судов компании «Danish Yachts»

Расчет показывает, что замена материала корпуса этого скоростного судна на сталь повлечет рост расхода топлива на 1 пасс-км на 10%.

При этом произойдет снижение стоимости корпуса без учета технологической составляющей практически в 5 раз.

Выполненные расчеты показывают, что применение высокопрочных сталей в сочетании с композиционными материалами для корпусов скоростных судов может быть реальной альтернативой легким сплавам, особенно для скоростных судов, предназначенных для эксплуатации в сложных условиях, в удаленных районах страны, где нет высокотехнологичной ремонтной базы.

В заключение необходимо отметить, что в настоящее время в современном мировом судостроении существуют прецеденты использования в конструкции скоростного судна сочетания стального корпуса из высокопрочных сталей с надстройкой из ком-

позиционных материалов. Примером таких прецедентов могут служить, например, некоторые конструкции скоростных судов компании «Danish Yachts» (Дания), сочетающие стальной корпус и развитые надстройки из композитов.

Список литературы:

- [1] Кользаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
- [2] Российский Речной Регистр. Правила. Том 2. – М., 2008. – 407 с.
- [3] Францев М.Э. Проектное обоснование обеспечения характеристик экономичности и конкурентоспособности скоростного пассажирского судна. // Сборник трудов конференции 9-е Прохоровские чтения. – Нижний Новгород. – 2013. – С. 94–98.
- [4] Францев М.Э. Проектный анализ различных форм уравнения «Мощности – Ходкости» при разработке проекта скоростного судна из композитов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 220–224.

**PROJECT ARGUMENTATION OF HIGH-RESISTANCE STEEL
USAGE IN COMBINATION WITH COMPOSITE MATERIALS
IN THE GLIDING PASSENGER SHIP CONSTRUCTION
FOR THE SMALL RIVERS OF SIBERIA AND THE FAR EAST**

M.A. Frantsev

Keywords: *High-resistance steel, composite materials, gliding passenger ship*

The report contains the project argumentation of high-resistance steel usage in a gliding passenger vessel hull with a superstructure made of composite materials on the basis of the resistance formula. Calculations show that when using steel, the vessel loses about 9% of full speed with a simultaneous increase of flow characteristics by about 10%. A steel body in combination with composite materials can be an alternative way to light alloys, especially for high-speed vessels designed for using in difficult conditions in remote areas of the country where there are no high-tech repair facilities.