К.С. ЕРАНОСЯН, Е.А. МАСЛИЧ, Н.Н. ФЕДОНЮК
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА КОРАБЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработаны варианты конструкций корпуса с однослойной и трехслойной обшивками, удовлетворяющих всем требованиям по прочности, жесткости и устойчивости связей и обладающих более низкой трудоемкостью изготовления за счет значительного сокращения количества балок набора и узлов их пересечений. При этом увеличение относительного веса по сравнению с корпусом корабля-прототипа составило около 9 %.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, корпусные конструкции, прочность, устойчивость, оптимизация, метод конечных элементов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Ераносян К.С., Маслич Е.А., Федонюк Н.Н. Оптимизация конструкции корпуса корабля из полимерных композиционных материалов. Труды Крыловского государственного научного центра, 2018. Специальный выпуск 2: 124–130.

УДК 629.5.023.2:678.067.2/.8 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-124-130

K.S. ERANOSYAN, E.A. MASLICH, N.N. FEDONYUK
Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, Russia

OPTIMIZATION OF SHIP HULL MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Developed single-layer and three-layer hull plating options fully satisfy all requirements with respect to structural strength, stiffness and buckling. They require less man hours due to considerable reduction of framing members and their intersections. As compared to the ship-prototype relative weight increase is about 9 %.

Key words: polymer composite materials, hull structures, strength, buckling, optimization, finite-element method.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Eranosyan K.S., Maslich E.A., Fedonyuk N.N. Optimization of ship hull made of polymer composite materials. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 124–130 (in Russian).

UDC 629.5.023.2:678.067.2/.8 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-124-130

Для судостроительной промышленности корабли и суда из полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются объектами, коренным образом отличающимися от традиционных металлических судов. Эксплуатационная надежность этих судов в значительной степени зависит от правильности конструктивного оформления и качества изготовления узлов соединений корпуса. Немаловажную роль играет и число этих узлов, т.к. они являются наиболее «слабыми звеньями» корпусных конструкций из ПКМ, а их большое количество значительно увеличивает трудоемкость постройки корпуса.

С учетом зарубежного опыта основные направления совершенствования существующих в отечественном судостроении конструкций корпусов судов и кораблей из ПКМ заключаются в следующем:

- использование в наибольшем объеме подкрепляющего набора в форме трапециевидного (П-образного) профиля;
- максимальное снижение количества балок набора и узлов пересечений балок разных направлений между собой;
- уменьшение количества соединений связей, в том числе соединений между собой балок одного направления;
- использование в обшивке корпуса (настилах палуб, полотнищах переборок) трехслойных (многослойных) композиций, состав и структура которых обеспечивали бы существенное повышение изгибной жесткости этих связей.

Минимизация количества балок набора корпуса и узлов их пересечений ведет не только к поиску

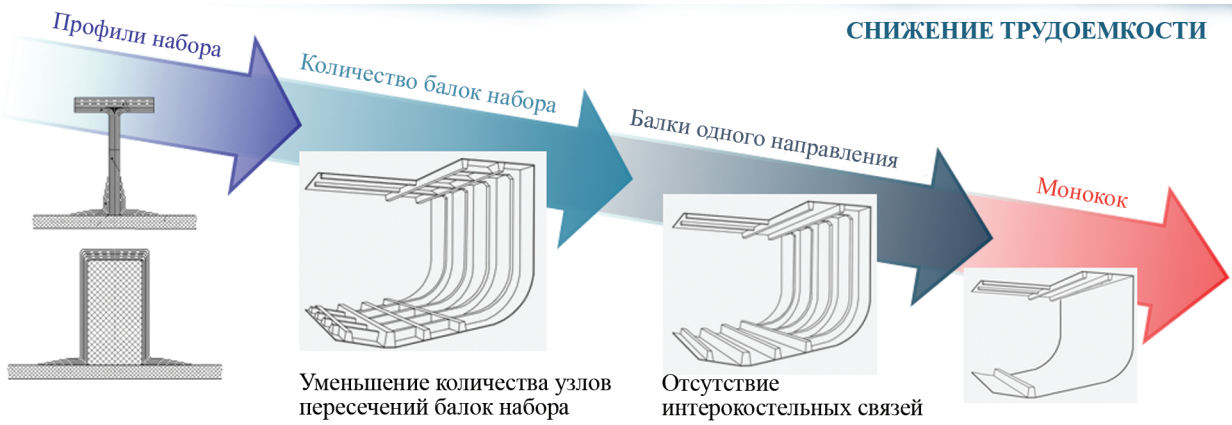


Рис. 1. Конструктивные факторы снижения трудоемкости

оптимального решения по расстановке продольного и поперечного набора композитного корпуса, но и к возможной замене однослойной обшивки корпуса, настилов палуб и полотнищ переборок на трехслойные конструкции. В частности, одним из путей поиска оптимума является переход от традиционной смешанной системы набора к системе набора перекрытий с балками одного направления.

Что касается балок Т-образного профиля, то следует отметить, что их изготовление связано с необходимостью отдельного формования таких балок в специальной предварительно изготавливаемой оснастке с последующей их приформовкой к обшивке. Это существенно увеличивает трудоемкость постройки корпуса, а также требует выделения специальных площадей для изготовления балок. В свою очередь, при изготовлении балок П-образного профиля специальной оснастки не требуется. Балки могут формоваться непосредственно на конструкции путем приклейки заполнителя – «сердечника» из пенопласта к обшивке (настилу палубы, полотнищу переборки) с последующей его обформовкой с одновременным образованием соединительных фланцев. В ряде случаев балки набора могут формоваться совместно с обшивкой за один технологический процесс, что не только снижает трудоемкость, но и значительно повышает прочность соединения балок с обшивкой, а следовательно, работоспособность и надежность всей конструкции.

Реализация перечисленных выше основных направлений совершенствования, существующих в отечественном судостроении конструкций корпусов судов и кораблей из ПКМ, естественным образом приводит к снижению трудоемкости постройки такого корпуса. Схематично конструктивные факторы, оказывающие влияние на снижение трудоемкости, приведены на рис. 1.

Предметом настоящего исследования является поиск компромисса между относительным весом корпуса и трудоемкостью его изготовления. В ходе исследования решалась задача разработки оптимальной конструкции корпуса корабля из ПКМ с обеспечением требований, предъявляемых к корпусным конструкциям по прочности, жесткости и устойчивости [1, 2], путем последовательного сокращения балок набора и узлов их пересечений. При этом возможный диапазон изменения относительного веса был принят равным 0,34–0,7, где первое число представляет собой относительный вес корпуса корабля-прототипа.

В качестве объекта исследования влияния конструкции корпуса корабля на его относительный вес и трудоемкость постройки выбран корабль из ПКМ, серийно строящийся в настоящее время, который был принят за прототип. Корабль имеет монолитную однослойную обшивку корпуса переменной толщины с местными усилениями, однослойную верхнюю палубу (ВП) и палубу полубака (ПП) трехслойной конструкции. В районе миделевого сечения пластины обшивки днища подкреплены в продольном направлении стрингерами и вертикальным килем, а настилы палуб – карлингсами. В поперечном направлении днище, борт и палубы подкреплены, соответственно, флорами, шпангоутами и бимсами со шпацией 1000 мм. Корпус в районе борта имеет поперечную систему набора. Стрингеры, вертикаль-

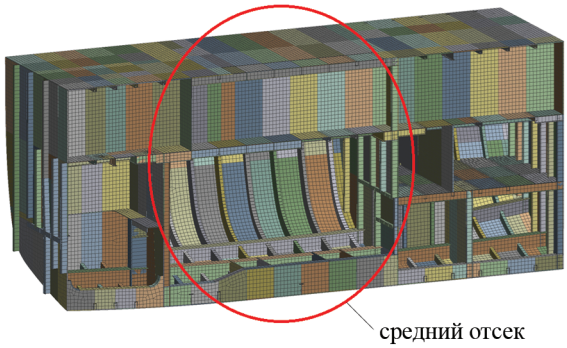


Рис. 2. Общий вид трехотсечной КЭ модели корпуса корабля-прототипа

ный киль и карлингсы имеют Т-образный профиль; шпангоуты, флоры и бимсы – П-образный профиль.

Решение поставленной задачи выполнялось численными методами с использованием оптимизационного модуля программного комплекса ANSYS. При поиске оптимального варианта конструктивного оформления корпуса в качестве нулевого приближения была принята конструкция корпуса корабля-прототипа. Для нее была разработана трехотсечная конечноэлементная (КЭ) модель, охватывающая исследуемый отсек и два смежных с ним (рис. 2) [3, 4]. Такой подход справедлив применительно к корпусу корабля-прототипа, т.к. у обводов его корпуса в рассматриваемом миделевом районе нет резкого изменения его поперечного сечения. Применение же трехотсечной модели существенно сокращает время счета при проведении оптимизационной процедуры и позволяет максимально учесть конструктивные особенности корпуса в среднем отсеке, который содержит миделевое сечение и является наиболее нагруженным.

Задачей оптимизации являлось снижение трудоемкости изготовления корпуса за счет сокращения количества балок набора и узлов их пересечений. В качестве целевой функции был принят теоретический относительный вес исследуемой конструкции как функция ее варьируемых параметров (переменных проекта). В качестве постоянных проекта были приняты геометрические размеры корпуса и расположение основных связей корпуса (палуб, переборок), а в качестве переменных проекта – количество балок набора, параметры их поперечных сечений, толщины наружной обшивки и палуб.

На основе анализа конструктивных особенностей корпуса корабля-прототипа были определены новые проектные варианты конструкции корпуса в его миделевом сечении, которые отличались друг от друга количеством балок поперечного и продольного набора, имеющих П-образный профиль, и, следовательно, конструкцией и толщинами обшивки и настилов палуб. Последние, так же как размеры элементов поперечного сечения балок, определялись на основании результатов оптимизационных расчетов исходя из минимума относительного веса. При этом для каждого из проектных вариантов обшивка корпуса и настил ВП считались выполненными либо только из однослойных пластин, либо только из трехслойных пластин.

Основные параметры и общий вид КЭ моделей среднего отсека, сформированных для выбранных проектных вариантов, в сравнении с КЭ моделью корпуса корабля-прототипа представлены в табл. 1 и на рис. 3 соответственно. Таким образом, в общей сложности рассматривалось 12 вариантов конструктивного оформления корпуса корабля из ПКМ. Серия оптимизационных расчетов проводилась в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 4.

После определения переменных проекта оптимизации для каждого варианта конструктивного оформления корпуса выполнялись расчеты напряженно-де-

Таблица 1. Основные параметры проектных вариантов конструктивного оформления корпуса

№ варианта	Поперечная шпация, мм	Количество продольных балок			Количество поперечных балок			
		Днище	ВП	ПП	Днище	ВП	ПП	Борт
Прототип	1000	5	5	7	8	8	8	8
1	1210	7	5	7	6	6	6	6
2	1420	3	4	4	5	5	5	5
3	1700	3	4	4	4	4	4	4
4	2120	1	5	4	3	3	3	3
5	2120	5	4	4	0	1	1	3
6	–	1	4	4	0	0	0	0

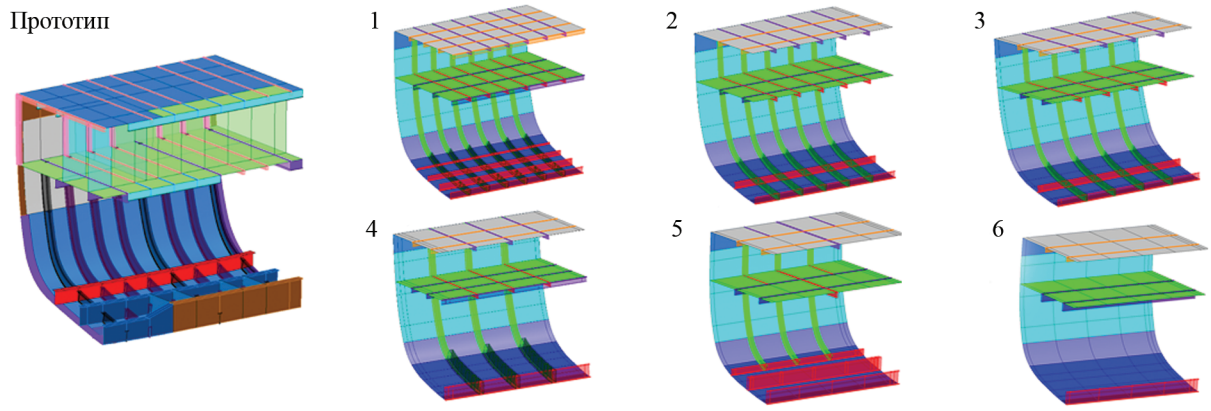


Рис. 3. Общий вид проектных вариантов конструктивного оформления среднего отсека корпуса корабля из ПКМ

формированного состояния (НДС) и устойчивости основных связей корпуса (пластин, балок, перекрытий), расположенных в среднем отсеке КЭ модели, при действии расчетного изгибающего момента (общий изгиб) и местной нагрузки от воздействия моря. Проверка статической прочности корпуса проводилась для случая нормального водоизмещения корабля отдельно для прогиба и перегиба корпуса. Зафиксированные расчетные напряжения и прогибы сравнивались с допускаемыми значениями, также определялись запасы по устойчивости [1, 2].

Расчетные исследования прочности трехотсечных КЭ моделей всех проектных вариантов конструктивного оформления корпуса показали:

1) При использовании однослойных конструкций в корпусе из ПКМ сильное влияние на выбор оптимальных геометрических размеров поперечных сечений балок набора, толщин наружной обшивки и палуб оказывают условия по жесткости этих связей (ограничения по допускаемым прогибам), а также запасы по устойчивости.

В частности, в зависимости от системы подкрепляющего однослойную обшивку набора меняется форма потери устойчивости корпуса в целом. На рис. 5 представлены формы потери устойчивости днищевых перекрытий при перегибе корпуса в случае перехода от смешанной системы набора к продольной системе и далее к практически полностью безнаборной конструкции днища.

При прогибе корпуса с однослойной обшивкой, имеющего достаточно большое количество шпангоутов, в первую очередь теряют устойчивость либо пластины борта, либо пластины настила ВП (рис. 6). При уменьшении количества балок набора с одновременным увеличением жесткости пластин борта и ВП начинает терять устойчивость палуба полубака.

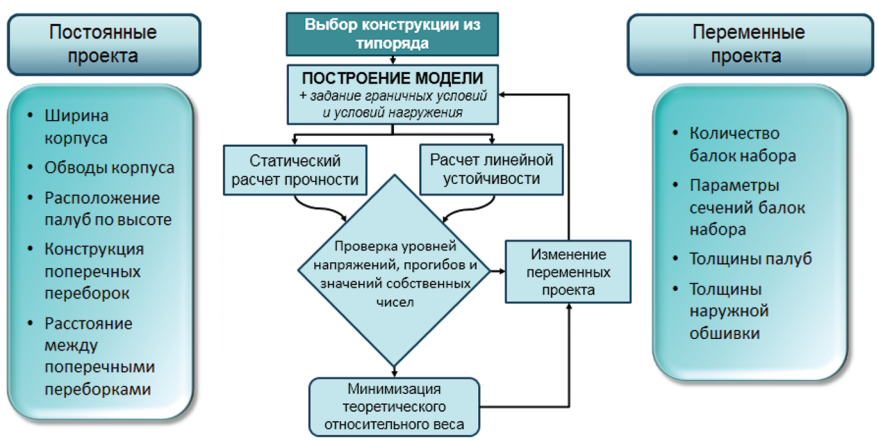
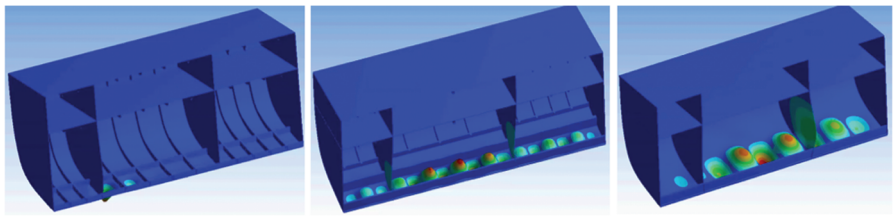
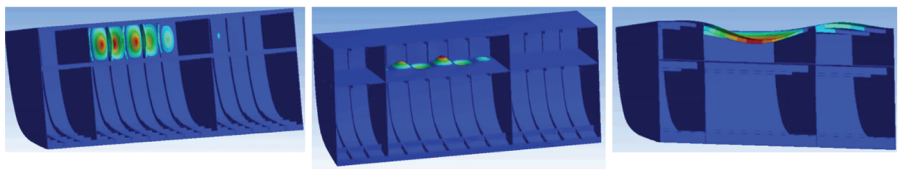


Рис. 4. Алгоритм проведения серии оптимизационных расчетов



а) Смешанная система набора *б*) Продольная система набора *в*) Монокок

Рис. 5. Варианты потери устойчивости конструкции однослойного корпуса с различными типами системы набора при перегибе: *а*) смешанная система набора; *б*) продольная система набора; *в*) монокок



а) Потеря устойчивости бортового перекрытия или перекрытия ВП *б*) Потеря устойчивости перекрытия ПП

Рис. 6. Варианты потери устойчивости однослойной конструкции корпуса с различным количеством поперечных балок при прогибе: *а*) потеря устойчивости бортового перекрытия или перекрытия ВП; *б*) потеря устойчивости перекрытия ПП

2) При использовании трехслойных конструкций в корпусе из ПКМ на выбор геометрических размеров поперечных сечений балок набора, толщин несущих слоев наружной обшивки и палуб доминирующее влияние оказывают значения допускаемых прогибов этих связей. В случае применения трехслойных конструкций устойчивость всегда теряет наиболее удаленное от нейтральной оси перекрытие, а не его отдельные связи: при прогибе корпуса – перекрытие ПП, при перегибе – днищевое перекрытие.

В качестве примера на рис. 7 приведены результаты оптимизационных расчетов прочности, жесткости и устойчивости одного из вариантов корпуса корабля из ПКМ, обшивка которого и настил ВП выполнены однослойными, а на рис. 8 – одного из вариантов корпуса, обшивка которого и настил ВП имеют трехслойную конструкцию. Результаты представлены в виде диаграмм, на которых показано отношение допускаемых напряжений и прогибов к максимальным расчетным значениям, а также приведены запасы по устойчивости. Очевидно, что запас по допускаемым напряжениям достаточный, а доминирующими факторами при определении размеров основных связей корпуса является их прогиб и устойчивость.

В результате проведения серии многовариантных расчетов, согласно выбранной стратегии оптимизации, каждая конструкция из рассмотренного типоряда была приведена к оптимальному, с точки зрения теоретического относительного веса при выполнении всех условий по прочности, жесткости и устойчивости. Полученные результаты и изменение величины относительного веса корпуса корабля из ПКМ при переходе от одного расчетного проектного варианта к другому, в соответствии с табл. 1 и рис. 3, сведены в табл. 2.

Таблица 2. Теоретический относительный вес различных вариантов конструктивного оформления корпуса

№ варианта	Поперечная шпация, мм	Количество продольных балок			Количество поперечных балок				Теоретический относительный вес	
		Днище	ВП	ПП	Днище	ВП	ПП	Борт	Однослойные конструкции	Трехслойные конструкции
1	1210	7	5	7	6	6	6	6	0,35	0,34
2	1420	3	4	4	5	5	5	5	0,36	0,33
3	1700	3	4	4	4	4	4	4	0,37	0,33
4	2120	1	5	4	3	3	3	3	0,44	0,33
5	2120	5	4	4	0	1	1	3	0,46	0,37
6	–	1	4	4	0	0	0	0	0,70	0,37

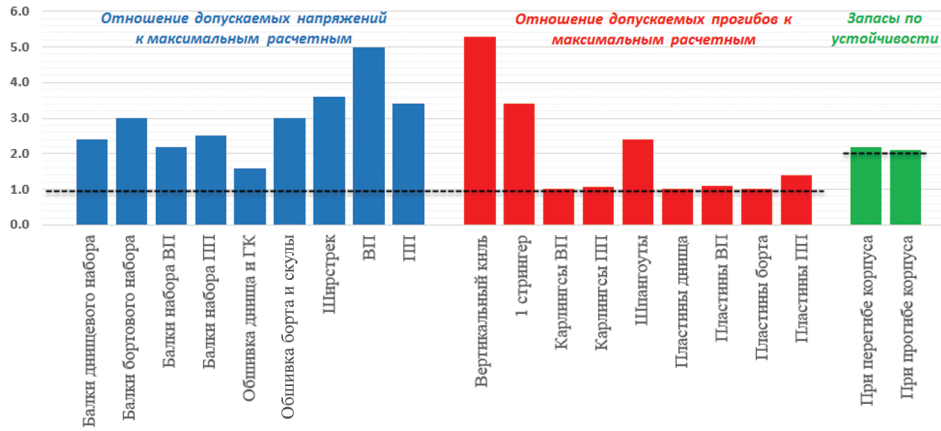


Рис. 7. Диаграммы результатов расчетов прочности, жесткости и устойчивости (однослойная конструкция, вариант 3)

Результаты выполненных оптимизационных расчетов показали следующее:

- увеличение на 20 % поперечной шпации корпуса с однослойной обшивкой по сравнению со шпацией корпуса прототипа позволяет сократить количество балок набора и узлов их пересечений на 16 %, а увеличение шпации на 70 % приводит к уменьшению количества этих балок и узлов на 68 %. При этом теоретический относительный вес корпуса в первом случае практически не изменяется по отношению к весу корпуса корабля-прототипа, во втором случае увеличивается до 0,45.
- в случае практически полностью безнаборного корпуса с однослойной обшивкой, имеющего в своем составе только вертикальный киль, его относительный вес увеличивается до уровня 0,7.
- в вариантах корпуса с трехслойной обшивкой можно создать практически полностью безнаборный (монококовый) [1] корпус или корпус только с продольной системой набора по днищу и палубам и поперечной системой по бортам со шпацией, в 2 раза превышающей шпацию корпуса корабля-прототипа. Оба варианта такого конструктивного оформления корпуса будут иметь теоретический относительный вес 0,37. При этом полностью исключается наличие узлов пересечений балок набора, что позволяет совместно с трехслойным настилом (обшивкой) изготавливать балки набора методом инфузии за один технологический процесс.

Результаты проведенных расчетных исследований подтвердили возможность разработки новых конструкций корпуса корабля, обладающего повышенной

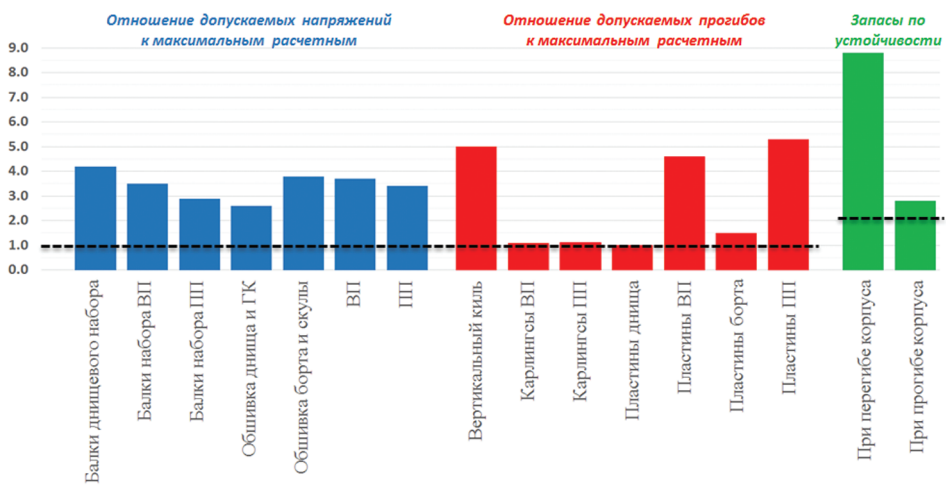


Рис. 8. Диаграммы результатов расчетов прочности, жесткости и устойчивости (трехслойная конструкция, вариант 6)

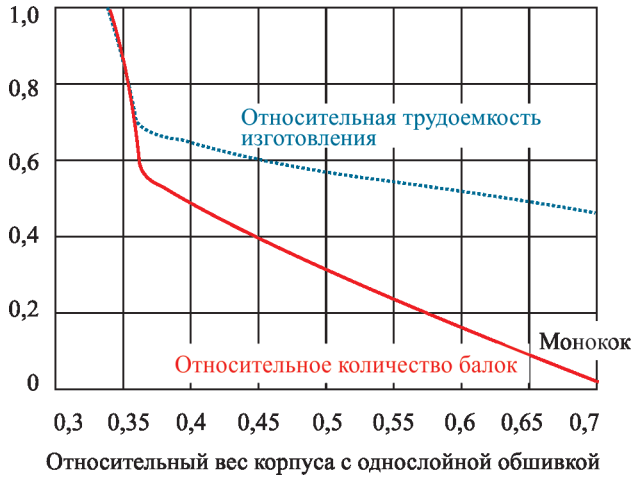


Рис. 9. Зависимости относительной трудоемкости изготовления корпуса и относительного количества балок набора от относительного веса корпуса с однослойной обшивкой

технологичностью и более низкой трудоемкостью изготовления при увеличении теоретического относительного веса не более чем на 9%, что допустимо, исходя из предъявляемых к кораблю требований.

Полученные результаты для корпуса корабля из ПКМ с однослойной обшивкой позволили оценить относительную трудоемкость его изготовления по отношению к трудоемкости изготовления корпуса корабля-прототипа. На рис. 9 представлены графики изменения относительной трудоемкости изготовления корпуса и относительного количества балок набора (по отношению к кораблю-прототипу) в зависимости от относительного веса корпуса.

Из этих результатов следует, что в случае с однослойной обшивкой относительная трудоемкость изготовления корпуса снижается на 30 % при практически неизменном его относительном весе. В случае если корпус имеет трехслойную конструкцию, он может быть выполнен практически безнаборным или с продольной системой набора по днищу и палубам, и поперечной – по бортам при двукратном увеличении поперечной шпации. При этом оба полученных варианта корпуса с трехслойными конструкциями приведут к увеличению теоретического относительного веса менее чем на 9 %.

Выводы

Результаты расчетных исследований показали принципиальную возможность разработки новых конструктивных решений для корпусов кораблей и судов из ПКМ, обеспечивающих выполнение заданных требований по прочности и работоспособности и одновременно позволяющих снизить трудоемкость постройки и, соответственно, стоимость и сроки строительства.

Библиографический список

1. *Федонюк Н.Н.* Применение полимерных композиционных материалов в зарубежном кораблестроении. Обзор по материалам прессы 1990–2006 гг. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2009. С. 45–88.
2. *Козлов С.Д., Федонюк Н.Н.* Исследование влияния состава и структуры многослойного гибридного композиционного материала на прочность и жесткость выполненной из него обшивки корпуса судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2006. Вып. 27(311). С. 85–98.
3. *Кудрин М.А., Маслич Е.А., Платонов В.В., Филатов А.Р.* Автоматизация расчетной проверки предельной и усталостной прочности корпусов навалочных и наливных судов на основе единых правил МАКО // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 82(366). С. 17–20.
4. *Bulkin V.A., Maslich E.A., Fedonyuk N.N.* Peculiarities of composite ship hull design // Collection of paper abstracts for NSN’2017 – 9th International Conference «Navy and shipbuilding nowadays. St. Petersburg, Russia, 29–30 June 2017. P. 113–122.

Сведения об авторах

Ераносян Карен Спартакович, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Маслич Елена Александровна, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Федонюк Николай Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 01.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018