

Особенности проектирования катамаранов

Часть 3. Конструкция и прочность

Альберт Назаров, к.т.н.



Прогулочный катамаран проекта AR980, построен в Таиланде

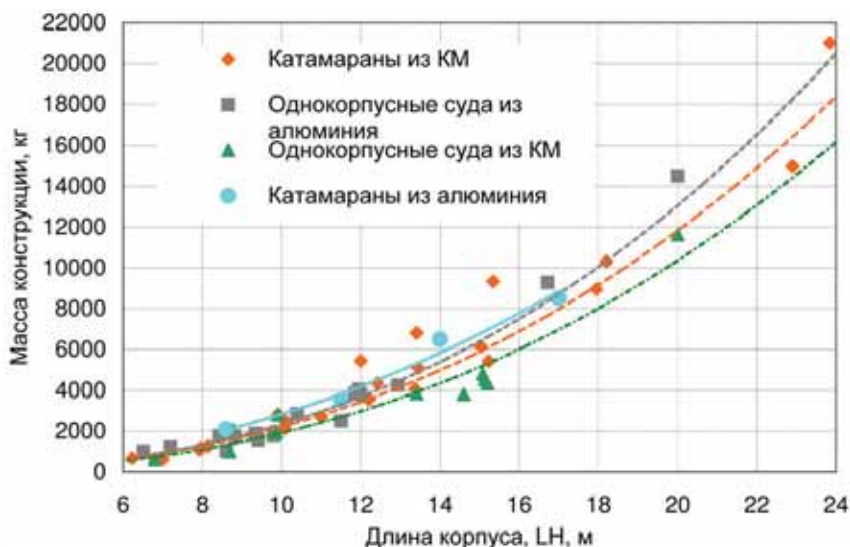


Рис. 1. Статистические данные (проекты автора статьи) по массе конструкции однокорпусных судов и катамаранов из алюминия и композитных материалов (КМ)

Масса конструкции

Из чего же строятся катамараны? Материалы, применяемые для их постройки – это преимущественно алюминиевые сплавы и армированные пластики, композитный материал (КМ). Приходилось делать проекты и из фанеры. Из стали малые катамараны получаются довольно тяже-

лыми и не проявляют в полной мере преимущества катамаранной схемы.

Алюминиевые катамараны длиной до 12...15 м обладают значительно худшими весовыми характеристиками по сравнению с судами из трехслойных КМ. Кроме того, катамаранам из КМ свойственна гораздо лучшая утилизация внутреннего объема, особенно внутри полукорпусов – за счет минимизации набора и отсутствия дополнительной изоляции.

Можно заметить, что для весовых характеристик конструкций характерен большой разброс (рис. 1), и зависимость от многих факторов, например от архитектуры судна – суда с развитыми надстройками и флайбридами получаются тяжелее. Большое значение имеют проектная скорость судна и высота волны; они определяют уровень расчетных ускорений при проектировании конструкций. Например, для судна из КМ длиной 15 м при увеличении расчетной скорости с 25 до 55 уз (что дает рост перегрузок с 2g до 5g) масса секции корпуса возрастает на 35%. Большое влияние оказывают применяемые правила и классификация – в первую очередь из-за различий

Рис. 2. Запись по времени вертикальных ускорений (синяя линия), (в 1g) и давлений на днище (в миллибарах) для катамарана длиной 12 м, при встречном волнении 3 балла, скорость 10 уз

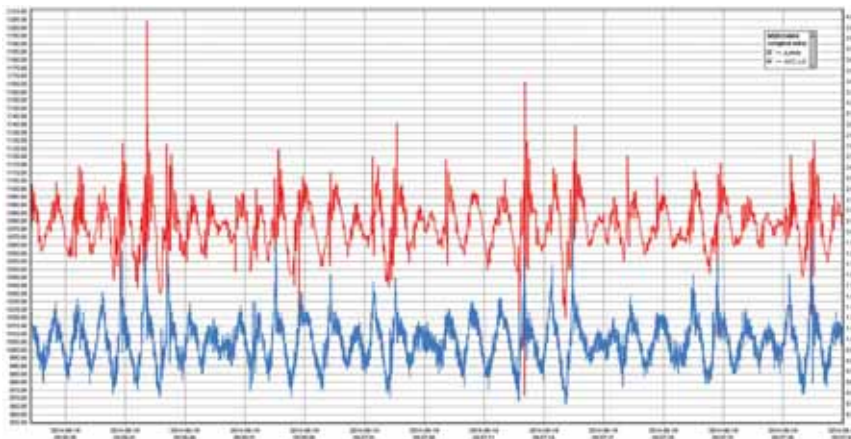


Табл. 1. Варианты схем армирования секций судна-катамарана из КМ

Длина корпуса - 10,0м; ширина - 3,3м; водоизмещение полное - 5800 кг; расчетная скорость - 40 узлов
 ПОКАЗАНЫ ТОЛЬКО СЕКЦИЯ КОРПУСА И ПАЛУБЫ/РУБКИ

Вариант 1

стекломат (CSM)
 однослойная конструкция
 полиэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
CSM 450	CSM 450		
CSM 450	CSM 450		
CSM 450	CSM 450		
CSM 450	CSM 450		
CSM 450			
CSM 450			

Толщина 11 9 5 5
 ВЕС, кг 1970

Вариант 2

стекломат (CSM) и ролинг (WR)
 однослойная конструкция
 полиэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 450	CSM 450	CSM 300	CSM 300
WR 600	WR 600	WR 600	WR 600
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
WR 600	WR 600	WR 600	WR 600
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 450
WR 600	WR 600		
CSM 450	CSM 450		
WR 600	WR 600		
CSM 450	CSM 450		
WR 600			
CSM 450			

Толщина 10 8,2 4,2 4,2
 ВЕС, кг 1797

Вариант 3

стекломат (CSM) и ролинг (WR)
 днище и тоннель - однослойная конструкция, борта и палуба - сэндвич
 полиэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 300
WR 600	WR 600	CSM 450	CSM 300
CSM 450	CSM 450	Divinycell H60	Divinycell H60
WR 600	WR 600	CSM 300	CSM 300
CSM 450	CSM 450	CSM 300	CSM 300
WR 600	WR 600		
CSM 450	CSM 450		
WR 600	WR 600		
CSM 450	CSM 450		
WR 600			
CSM 450			

Толщина 10 8,2 18,1 17,8
 ВЕС, кг 1720

Вариант 4

стекломат (CSM) и ролинг (WR)
 днище и тоннель - конструкция с корематом, борта и палуба - сэндвич
 полиэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 450	CSM 450	CSM 450	CSM 300
WR 600	WR 600	CSM 450	CSM 300
CSM 450	CSM 450	Nidaplast	Nidaplast
Coremat	Nidaplast	CSM 300	CSM 300
Coremat	CSM 300	CSM 300	CSM 300
CSM 450	Nidaplast		
WR 600	CSM 450		
CSM 450	CSM 300		

Толщина 15,1 46,0 24,2 23,9
 ВЕС, кг 1521

Вариант 5

квадраксиальная (QX) и биаксиальная (BX) ткань
 днище, тоннель, борта и палуба - сэндвич
 полиэфирная/винилэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 300	CSM 300	CSM 300	CSM 300
QX 1000	QX 1000	BX 400	BX 400
QX 1000	QX 1000	BX 400	BX 400
Divinycell H130	Divinycell H130	Divinycell H60	Divinycell H60
QX 1000	QX 1000	BX 400	BX 400
QX 1000	QX 1000	BX 400	BX 400

Толщина 30,5 30,5 17,7 17,7
 ВЕС, кг 1361

Вариант 6

биаксиальная (BX) ткань, биаксиальная (BX) ткань с Kevlar-ом
 днище, тоннель, борта и палуба - сэндвич
 винилэфирная смола

Днище	Тоннель	Борт	Палуба
CSM 300	CSM 300	CSM 300	CSM 300
BX1200 KE	BX1200 KE	BX 400	BX 400
BX 400	BX 400	BX 400	BX 400
Divinycell H130	Divinycell H130	Divinycell H60	Divinycell H60
BX 400	BX 400	BX 400	BX 400
BX1200 KE	BX1200 KE	BX 400	BX 400

Толщина 28,4 28,4 17,7 17,7
 ВЕС, кг 1230

Используемые материалы:

CSM 300	стекломат, 300 г/м ²
CSM 450	стекломат, 450 г/м ²
WR 600	ролинг (жгутая ткань), 600 г/м ²
BX 400	биаксиальная ткань, 400 г/м ²
BX1200 KE	биаксиальная ткань, E-стекло/Kevlar, 1200 г/м ²
QX 1000	квадраксиальная ткань, 1000 г/м ²

Divinycell H60	пенопласт, 60 кг/м ³ , t=15mm
Divinycell H130	пенопласт, 140 кг/м ³ , t=25mm
Nidaplast	сотовый наполнитель, 80 кг/м ³ , t=20mm
Coremat	коремат t=4мм

Примечания:

Вес указан с учетом гелькоута, конструкционных слоев, а также набора
 Толщина указана только для конструкционных слоев

коэффициентах запаса и критериях прочности. Кроме того, для судов из КМ много значит выбор материалов и технологий постройки – при их разнообразии масса одного и того же судна может меняться в значительных пределах. В качестве примера в табл. 1 приводится оценка массы конструкции секции корпуса

и палубы/рубки для ряда вариантов схем армирования.

Прочность – расчетные нагрузки

Сразу скажем, что в международной практике катамараны (как и большинство малых судов) по от-

носительной скорости попадают в группу так называемых «скоростных судов». Согласно кодексу IMO High Speed Craft Code, таковыми считаются все суда, чья скорость (в м/с) более величины $3.7 \times V^{0.1667}$, где V – объемное водоизмещение в м³. Получаемая абсолютная скорость для малых судов невелика, но большин-

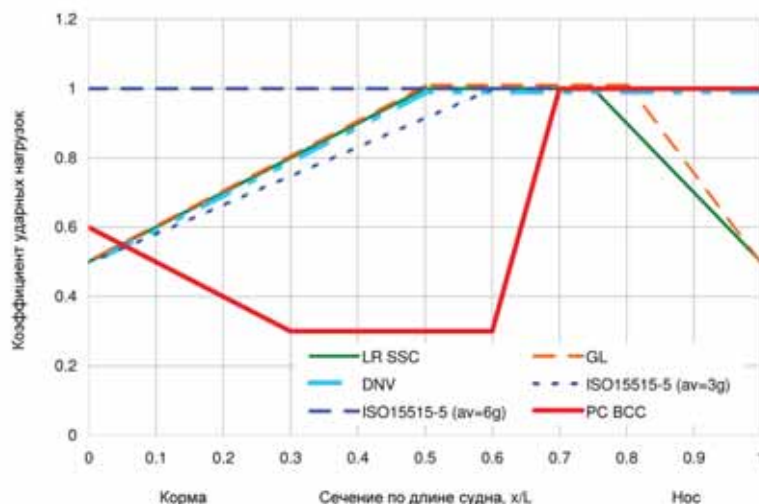


Рис. 3. Ударные нагрузки на днище катамаранов. Справа – катамаран проекта AT620 Cabin на ходу; очевидно, что при прыжках на волне ударам подвергается все днище. Выше – распределение нагрузок на днище по длине катамарана по правилам разных КО. Обратим внимание, что по стандарту ISO с ростом расчетных ускорений давление на днище принимается распределенным равномерно – это как раз случай возможного прыжка на волнении. Также заметим, что требования Российского морского регистра (PC BCC) находятся «в противофазе» ко всем остальным, что неудивительно, поскольку, по словам разработчиков раздела, эти методы были изначально предназначены для водоизещающих катамаранов



ство классификационных обществ рассматривают катамараны по правилам для высокоскоростных судов, хотя они для малых судов специально не предназначены – по крайней мере в области прочности.

Напомним, что в судостроении принято рассматривать местную прочность (т.е. прочность отдельных пластин обшивки и балок набора) и общую прочность, когда корпус проверяется и рассматривается как единая составная балка.

Для катамаранов в настоящее время принята классификация расчетных нагрузок по следующим группам:

- местная прочность днища, бортов, палуб, надстроек, переборок определяемая с использованием методов для однокорпусных судов;
- местная прочность тоннеля, определяемая по условию действия специфических для катамаранов слеминговых нагрузок;

- общая прочность катамаранов, в первую очередь поперечный изгиб, поперечный сдвиг и кручение относительно продольной оси;

- прочность отдельных элементов, таких как фундаменты двигателя, мачты, подкрепления под оборудование и т.д. – расчет ведется на эксплуатационные нагрузки или инерционные нагрузки при столкновении.

Для судов, не относящихся к гоночным и экспериментальным, нагрузки и методы расчета прочности задаются стандартными правилами. Замечу, что главный принцип проектанта – выбирать правила под конкретику проекта, в частности, выбрать то классификационное общество (КО), которое имеет опыт работы с рассматриваемым типом судов и материалом корпуса. Поэтому российские правила для катамаранов, тем более из КМ, мы не используем – о них речь будет ниже. Для расчетов прочности катамаранов в нашей практике чаще всего используются:

- международные стандарты группы ISO 12215 (для судов длиной до 24 м). Соответствие этим стандар-

там требуется для прогулочных судов в странах Евросоюза, а также допускается для малых коммерческих судов в ряде других стран;

- Правила Регистра Ллойда для специальных судов (LR SSC);

- пока еще действующие – до 2016 года – Правила Германского Ллойда для скоростных судов (GL HSC); по применяемым методам расчетов и разумности подходов это лучшие правила в области высокотехнологичных композитов.

Правила для высокоскоростных судов, и катамаранов в частности, есть сейчас у всех КО – членов МАКО, но здесь перечислены наиболее «популярные», если можно так выразиться.

Однако есть и проблемы, о которых нужно предупредить сразу. Например, правила GL HSC применительно к малым скоростным судам занижают вертикальные ускорения a , что не соответствует практике (как мы помним, это не специальные правила для малых судов, а общие правила для скоростных «больших» судов HSC); мы эти ускорения искусственно увеличиваем по согласованию с КО, чтобы в реальной эксплуатации судно «не развалилось».

Далее, в настоящее время разработка стандарта ISO12215-7, задающего специфические нагрузки для многокорпусных судов, приостановлена, поэтому нагрузки на мост и общие нагрузки при скручивании принято принимать по предварительной версии этого стандарта. Все остальное определяется по стандарту 12215-5, задающему нагрузки на однокорпусные суда.

Следует отметить, что несмотря на единообразие подходов перечисленных правил КО и ISO, все-таки имеется разброс нагрузок – по разным правилам их значения на днище отличаются на 20...30%; расчетные нагрузки на конструкциях моста могут вообще отличаться втрое для одного и того же судна.

Обычно для малых судов определяющими являются расчеты местной прочности; расчеты общей прочности носят проверочный характер и актуальны только судов с нетипо-

выми соотношениями размерений и многокорпусных судов (проверяются продольная прочность и поперечная соответственно).

Местная прочность

Здесь мы, конечно же, не будем полностью пересказывать правила, а дадим лишь общие их принципы. В предыдущей части статьи речь уже шла о вертикальных перегрузках a , которые испытывает скоростное судно при движении на волнении. Вертикальное ускорение и является основой при анализе прочности скоростных судов, и катамаранов в частности.

В правилах большинства КО для оценки величины a используется формула Савицкого-Брауна в различных модификациях. Надо заметить, что для прочностных расчетов применяется ускорение обеспеченности $1/100$, т.е. берется среднее значение пиков 1% самых высоких пиков (рис. 2). Напомним, что для оценки комфорта используются ускорения уровня $1/10$; вероятность возникновения ускорений для скоростных судов по данным Д. Савицкого подчиняются экспоненциальному распределению. Типичные значения a в расчетах прочности составляют: для крупных моторных яхт и пассажирских судов – $1...2g$ (по $GL \leq 1g$); для прогулочных – $2...3g$, для специальных судов и RIB – $6...8g$.

Нагрузку для расчета местной прочности принято представлять в виде расчетного давления p , действующего на пластину или балку набора. Это давление включает гидростатические давления при статическом погружении корпуса в воду, нагрузку от стоящих на палубе людей и грузов, но самое главное – динамические слеминговые нагрузки. Определяющими при расчете местной прочности высокоскоростных судов являются расчетные давления на днище при ударе p , для оценки которых в зарубежных правилах используются результаты исследований Хеллера-Джаспера и Аллена-Джонса, основанные на рассмотрении падения судна весовым водоизмещением с вертикальным ускорением a на ха-

рактерную площадь A , обычно соотносимую с площадью днища судна:

$$p = \frac{a \times \Delta}{A} \times \text{набор коэффициентов},$$

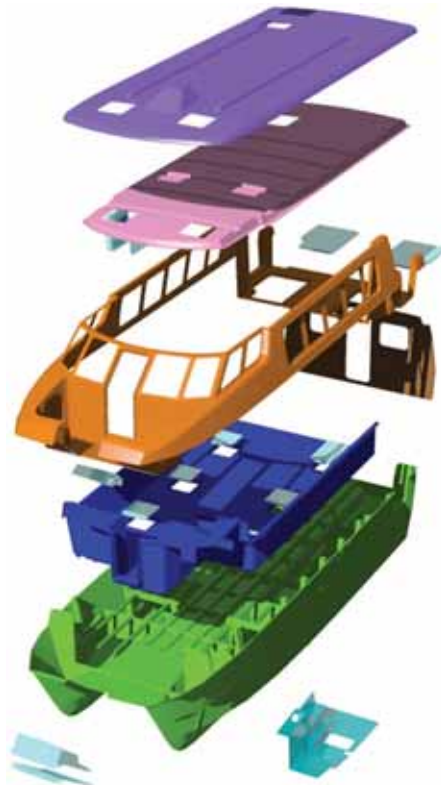


Рис. 4. Пример конструкции «катамарана – водного такси» из КМ, показана разбивка на секции. Судно спроектировано для серийной постройки в постоянных матрицах

где группа коэффициентов учитывает категорию судна, положение рассчитываемого элемента по длине судна, размер пластины и соотношение ее сторон и т.д. Например, коэффициенты распределения ударных нагрузок по длине представлены на рис. 3. Расчетные местные нагрузки на конструкцию моста определяются аналогичным образом. Далее по расчетным нагрузкам расчет прочности

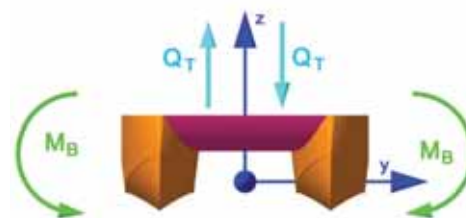


Рис. 5. Схема моментов и сил, являющихся расчетными случаями для поперечной прочности катамаранов

выполняется согласно общепринятым методам сопромата, точнее – строительной механики корабля, а для КМ – с учетом теории анизотропных материалов.

Нашим КБ выполнена серия экспериментов по замеру ударных нагрузок на днище катамаранов на волнении, которые выполнялись датчиками давлений, синхронизированными с датчиками ускорений (рис. 2). Эти результаты могут быть использованы и используются для проектирования более совершенных конструкций, чем предписывают правила (иностраные КО такой подход допускают).

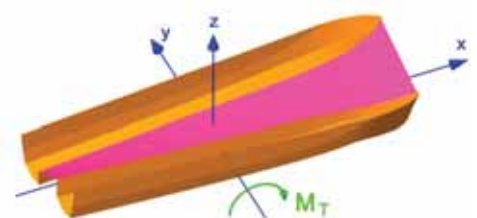
Общая прочность

Опыт проектирования конструкций катамаранов и расчетов их прочности убедительно показывает, что общая продольная прочность корпуса длиной до 30...40 м всегда обеспечивается с большим запасом, если обеспечена местная прочность. То есть продольный изгиб судна для большинства малых судов не является расчетным случаем.

Подходы к оценке общей поперечной прочности катамаранов ведущих КО и ISO подразумевают расчет конструкций при действии простых нагрузок и ускорения a , без неоправданного усложнения формул учетом изгибающих моментов на тихой воде (это важно, т.к. в российских правилах такие усложнения есть!).

Нагрузки в этом случае таковы:

- поперечного изгибающего момента M_B ;
 - поперечного скручивающего момента M_T ;
 - перерезывающей силы в поперечной плоскости Q_T ;
- $$Q_T = k_1 \Delta a; M_B = k_1 \Delta B_{CB} a; M_T = k_2 \Delta L a,$$



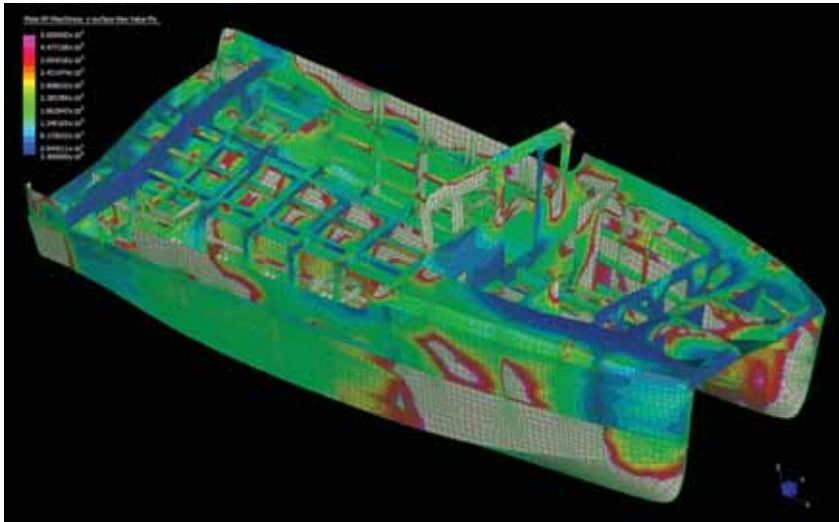


Рис. 6. Пример расчета катамарана длиной 12 м из КМ на скручивание относительно поперечной оси. Приведено распределение коэффициента запаса по тензорному критерию напряжений; белые зоны соответствуют областям с очень высоким коэффициентом запаса, синие – с минимальным

где L – длина; B_{CB} – ширина между ЦВ корпусов; k_1, k_2 – коэффициенты, зависящие от категории судна и т.д., равны 2.5 и 1.25 соответственно по ISO, но могут быть ниже у КО. Наименее высокие значения коэффициентов достигаются для случая полного выхода одного из корпусов из воды; в случае, если эксплуатация полагается более «спокойной» и оба корпуса поддерживаются в разной мере гидростатическими силами, то коэффициенты принимаются ниже. Говоря простым языком, например, для случая скручивания катамаран как бы ставится на две опоры, расположенные в носу одного корпуса и корме другого соответственно.

Расчеты общей поперечной прочности обычно выполняются методом конечных элементов (рис. 6). Из опыта, для большинства катамаранов длиной до 12 м общая поперечная прочность обеспечивается «автоматически»; для более крупных судов необходимо выполнять проверку, в частности для рабочих катамаранов с компоновкой «пикап» с открытой кормой и без развитых поперечных переборок.

Результатом расчетов прочности скоростного судна (кроме судов прогулочного назначения) является так называемый design envelope – график эксплуатационных диапазонов судна. Ведь невозможно спроектировать скоростной катамаран, да и во-

обще любое судно на все возможные условия; скорость движения при усилении волнения, как правило, приходится ограничивать.

Нормы прочности катамаранов в России

Проблема с российскими реалиями в том, что создатели правил в связи со «сложностью вопроса» (сложность, видимо, для пишущих правила и рассматривающих проекты; свидетельствующая скорее об отсутствии у них необходимого опыта) требуют «особого рассмотрения» прочности катамаранов, что означает на практике бесконечный процесс общения с Регистром и «отсылки в ЦНИИ», после чего теряет всякий финансовый смысл сама работа над проектом малого судна. Правила Морского Регистра для высокоскоростных судов (РС ВСС) в разделе для катамаранов содержат по четыре ошибки в одной формуле, и более того – в русском и английском вариантах правил формулы отличаются, но никто не спешит их исправлять. Правила Речного Регистра (РРР) вообще предназначены скорее для стальных тихоходных катамаранных барж, чем для малых/скоростных судов катамаранного типа. Содержательная часть правил вызывает много недоуменных вопросов: например, в РРР при расчете прочности вообще не учитыва-

ются динамические перегрузки, а в РС ВСС почему-то нагрузки для проверки местной прочности определяются через продольный изгибающий момент...

Видимо, при проектировании малых катамаранов (и скоростных судов вообще) в ближайшее время российским судостроителям придется пользоваться стандартами ISO и правилами иностранных КО. Проблема в том, что за последние 10–15 лет отечественное нормотворчество в области малого судостроения ничего толкового так и не создало – последний проект правил для «маломерки», разработанный ЦНИИМФ – лишнее тому подтверждение.

Особенности технологии постройки катамаранов из КМ

Необходимо сказать несколько слов о постройке катамаранов из КМ. Бытует спорное мнение, что постройка судна из КМ требует дорогостоящей оснастки и матриц, а в случае катамаранов – очень больших матриц, оправданных только для больших серий. Но помимо традиционных методов контактного формования или инфузии в постоянных матрицах широко применяются эффективные методы постройки для единичного и мелкосерийного производства – во временных матрицах, сборка из листов сэндвича и стрип-планкинг с последующей оклейкой. Конструктор и строитель могут их обоснованно применять в соответствии с планируемой серийностью.

Катамараны, особенно малые и скоростные, представляют собой сравнительно новый тип судов для российских судостроителей, в связи с чем накопление и обобщение опыта по построенным за рубежом судам имеет больше значение. Подходы к прочности, на сегодняшний день используемые в российских правилах, недостаточно достоверно отражают физические принципы движения судов катамаранного типа, существенно отличаются от общепринятой мировой практики и нуждаются в доработке ✘