

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МАТРИЦЕ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ НА МАЛЫХ СУДАХ

М. Э. Францев, директор АОЗТ «Нептун—Судомонтаж»

УДК 624.016-419.8:629.526

При проектировании современных малых судов важной задачей, наряду с обеспечением высоких мореходных качеств, ходкости и управляемости, является повышение полезной нагрузки, улучшение обитаемости, снижение шума и вибрации. Не менее важно уменьшение загрязнения окружающей среды путем создания полноценных санитарно-бытовых условий для экипажа и размещения на судне оборудования для утилизации отходов.

Для улучшения обитаемости помещений необходимо увеличивать их объем. Однако это ведет к повышению надводного борта и развитию надстроек, рубок и других надпалубных элементов. В то же время для обеспечения мореходных качеств судна следует стремиться к возможно более низкому расположению его центра масс. Решить эту задачу можно путем применения современных материалов и технологий, в частности, многослойных оболочек.

Под оболочкой в данном случае понимается тонкостенная конструкция, прочность которой обеспечивается за счет формы поверхности, а не традиционными элементами — шпангоутами, карлингсами, стрингерами. Оболочка может состоять из одного или нескольких слоев, которые могут быть выполнены из разных материалов и иметь различные механические характеристики, в том числе в разных направлениях. Это позволяет существенно повысить механические характеристики конструкции, ее устойчивость и прочность на изгиб благодаря увеличению момента инерции сечения. Применение оболочек, кроме обеспечения прочности, тепло- и звукоизоляции, позволяет также использовать ее наружный слой в качестве элемента внутреннего интерьера помещения, существенно сократив соответствующие статьи расходов. Многослойная оболочка на матрице из легких сплавов дает значительное снижение массы конструкции по сравнению с стеклопластиком, в котором используется полимерная матрица, при сопоставимых механических характеристиках. Кроме того, она лучше воспринимает знакопеременные нагрузки, более стойка к усталостным разрушениям.

Существует несколько причин, сдерживающих широкое применение таких конст-

рукций в малом судостроении: 1) отсутствие методического обеспечения выбора исходных материалов для создания композита; 2) сложность прочностных расчетов многослойных конструкций из разнородных материалов; 3) отсутствие доступных технологий их изготовления. При проектировании оболочковых конструкций возникает множество методических вопросов, связанных с необходимостью анализа их работы при одновременном воздействии различных факторов в процессе эксплуатации.

При создании любого композиционного материала одновременно решаются три разные задачи: выбор или синтез отдельных компонентов; разработка способа применения композита в виде законченной конструкции; создание технологии изготовления изделия. Сумма затрат на решение этих задач определяет стоимость того или иного композиционного материала.

При изготовлении композиционных материалов для пространственных несущих конструкций в малом судостроении в качестве матрицы могут применяться алюминиевые сплавы. Их достоинства — малая плотность, высокий уровень механических свойств и технологическая пластичность.

Получение полуфабрикатов композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов возможно твердо- и жидкофазным способами. Первым способом могут быть изготовлены композиты для корпусных конструкций: сэндвичевые и пакеты из монослоев; второй способ позволяет получать алюмопенокомпозиты, которые используются для среднего слоя.

Сэндвичевые конструкции состоят из двух прочных облицовочных пластин, наполнителя и двух адгезионных слоев. Материалом несущих пластин могут служить алюминиевые сплавы. Основное назначение наполнителя — обеспечение устойчивости пластин и передача сдвиговых нагрузок по толщине композита. Для успешного выполнения этих функций наполнитель должен быть легким и жестким. В качестве наполнителя могут использоваться древесина, пенонаполненные структуры или соты из металла, армидных или крафт-бумаг. Сотовые структуры выпускаются с применением главным образом двух технологических процессов: растяже-

ния пакета и сборки пакета из профилей. При использовании алюминиевых сплавов эффективная плотность сотового заполнителя, полученного по технологии растяжения пакета, составляет 32—192 кг/м<sup>3</sup>, а заполнителя, полученного методом профилировки, 128—880 кг/м<sup>3</sup>. Сотовый заполнитель повышает изгибную жесткость конструкции. Проиллюстрировать это можно следующим примером: при относительном повышении плотности заполнителя на 6% жесткость конструкции возрастает примерно в 39 раз [1].

Важен опыт изготовления многослойных панелей, разработанных ЦНИИ КМ «Прометей» по заданию ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова, в качестве корпусных конструкций для формирования обшивки или полотнища переборки. Эти панели включают в себя пластины внешнего и внутреннего слоя и расположены между ними продольно ориентированную гофрированную мембрану, касающуюся их верхушками гофров. В данной панели, в отличие от традиционных трехслойных, полимерный заполнитель не выполняет механических функций по обеспечению необходимого расстояния между внешней и внутренней пластинами. Для этого служит продольно ориентированная мембрана. Полимерный заполнитель является термозвукоизоляцией и препятствует поступлению воды или воздуха во внутренние полости панели при ее повреждении.

Весьма перспективно применение пакетов из монослоев. К этой группе композитов относятся листовые материалы, получаемые путем склеивания или совместной прокатки разнородных листов. В результате получают многослойные листы, состоящие из последовательно чередующихся слоев алюминиевых сплавов или алюминиевых сплавов и полимеров. Последние получили в отечественной практике название алор. Толщина таких пакетов может составлять от 1,3 до 2,3 мм.

Слоистые листы менее, чем обычные, чувствительны к концентраторам напряжений в виде отверстий. Испытания на малоцикловую уста-

лость выявили повышение долговечности клееных листов по отношению к обычным на 20—30% и примерно в два раза у слоистых листов, полученных прокаткой [2—4].

Еще более привлекательные механические характеристики демонстрируют алоры. Из-за различия механических и теплофизических свойств армирующего наполнителя и матрицы между компонентами материала возникают уравновешенные остаточные напряжения, которые тем больше, чем выше температура технологического процесса получения композиционного материала. Эти остаточные напряжения играют роль компенсатора при определенных нагрузках. Поэтому существует понятие направленности алора, и в конструкции он располагается наиболее оптимальным образом.

Растяжка металлокомпозита с переходом алюминиевой матрицы в пластическую область, в свою очередь, изменяет величину и знак остаточных напряжений, что обуславливает значительное увеличение долговечности при испытаниях на малоцикловую усталость.

По результатам испытаний установлено, что применение алоров вдвое повышает долговечность обшивки по сравнению с листами алюминиевого сплава аналогичной толщины. Конструкционные образцы, имитирующие продольный стык обшивки, по долговечности более чем в три раза превосходят аналогичные конструкции из алюминиевого листа [2]. Имеется опыт изготовления из алора деталей крыльев и фюзеляжей летательных аппаратов.

Для создания композиционного материала, получаемого непосредственно на стапеле в процессе изготовления конструкции, можно применять листовые и профильные алюминиевые полуфабрикаты.

Отдельный класс современных материалов составляют так называемые пенометаллы. Они представляют собой легкие пористые материалы с металлическими стенками ячеек. Плотность пенометаллов мала и составляет 0,05—1,0 г/см<sup>3</sup>. Некоторые из них (с закрытыми порами) способны плавать в воде. Ярким представителем пенометаллов являются алюмопенокомпозиты (АПКМ).

Благодаря ячеистому строению, АПКМ обладают высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, способностью гасить акустические и электромагнитные колебания, а также поглощать энергию удара. Малая плотность АПКМ позволяет изготавливать из них крупногабаритные панели сверхмалой массы. АПКМ — коррозионно- и износостойкие экологически чистые материалы. Технологические особенности производства АПКМ и относительно низкая стоимость сырья позволяют применять композиты такого типа практически во всех отраслях промышленного производства, в том числе и в малом судостроении. Немаловажно и то, что цены на АПКМ соизмеримы с ценами на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов [5].

Большую роль в обеспечении прочности многослойной оболочковой конструкции играют клеевые соединения. Их прочность определяется в первую очередь адгезионными взаимодействиями на границе раздела двух веществ. При этом всегда происходит взаимодействие между адгезивом и субстратом, поэтому адгезионная прочность зависит от их химического состава и строения. При разработке клеевого соединения существуют две взаимосвязанные задачи. Это возможность регулирования и направленного изменения интенсивности адгезионных взаимодействий и стабилизация достигнутой адгезионной прочности при действии на систему «адгезив—субстрат» воды, повышенной температуры, механиче-

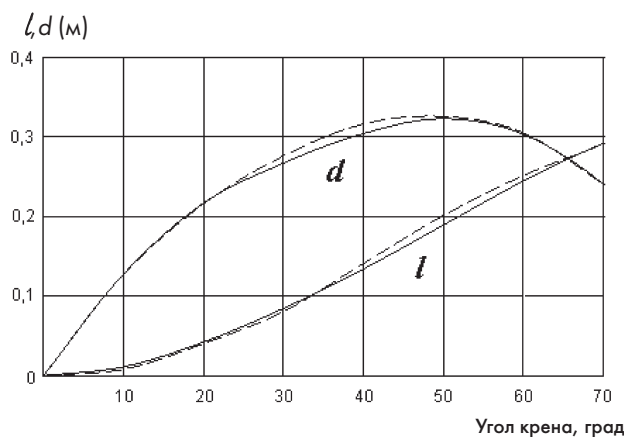


Рис. 1. Сравнительный анализ диаграммы статической и динамической остойчивости катеров в состоянии порожнем: — пр. 82340; - - - - пр. 371У



Рис. 2. Катер пр. 82340 с многослойной оболочковой надстройкой

ских нагрузок и других факторов. Решение этих задач тесно связано с установлением характера взаимодействия адгезива с субстратом.

Смачивание твердого субстрата жидким адгезивом — необходимое, но недостаточное условие высокой адгезионной прочности. Оно становится достаточным в том случае, когда обусловлено химическим составом поверхностного слоя твердого субстрата, а не адсорбированными на его поверхности молекулами.

Второй задачей является выбор путей стабилизации адгезионной прочности соединения. Важно не только получить клеевое соединение, но и добиться его высокой прочности в процессе эксплуатации. Снижение исходной адгезионной прочности при действии воды или ее паров связано с диффузией внутрь материала сравнительно небольших молекул воды, под воздействием которых могут разрываться связи на границе раздела «адгезив—субстрат». При этом молекулы воды вступают в конкуренцию с различными группами макромолекул адгезива, взаимодействующими с активными центрами твердого субстрата, занимая их места. Особенно легко разрыв адгезионных связей, сопровождающийся обменной адсорбцией и резким ухудшением адгезионной прочности, происходит в тех случаях, когда взаимодействие фаз обусловлено физическими силами. Ослабление этого нежелательного эффекта возможно при образовании между адгезивом и субстратом более прочных и гидrolитически устойчивых адгезионных связей [6—8].

Состояние границы раздела «полимер—твердое тело» в большой степени определяет свойства таких систем, как клеевое соединение. Наличие различных дефектов в граничном слое сказывается на прочности, проницаемости и других свойствах соединений. С улучшением структуры этого слоя значительно повышаются свойства клеевых соединений, особенно их стабильность в условиях длительной эксплуатации.

Проведенные исследования выявили непосредственную связь между возникновением дефектов в пограничном слое (рыхлость, пузыри, свищи) и наличием в клее летучих растворителей. При толщине клеевого слоя 0,03 мм внутри этих дефектов скапливаются пары воды и других коррозионно-активных сред, что приводит к последующим коррозионным повреждениям соединяемых конструкций, усиливающимся в морской атмосфере.

Исследования позволяют сделать вывод о необходимости предварительной защиты деталей соединения антикоррозионными составами непосредственно перед нанесением клея. Кроме того, выявлена меньшая подверженность дефектам зоны пограничного слоя для клеев холодного отверждения с длительной жизнеспособностью.

Для получения клеевого соединения с оптимизированными свойствами рекомендуется использовать клеи холодного отверждения с подслоем из феноло-каучуковых клеев, имеющих высокую эластичность и деформативную способность. При этом дефекты в подслое, вызванные

удалением из клея летучих растворителей, заполняются клеем холодного отверждения. При таком сочетании клеев не требуется использования высоких температур и больших давлений для отверждения; удастся получить соединение с удовлетворительной прочностью, эластичностью, водо-, атмосферо- и тропикостойкостью, а также термостабильностью. В этом случае подслоя феноло-каучукового клея выполняет роль антикоррозионной защиты поверхности раздела [6—8].

Для расчета на прочность надстройки из многослойной оболочки может быть предложен следующий способ. Вся поверхность надстройки делится на суперэлементы в зависимости от воздействия нагрузок одного характера (осевая; нагрузка, направленная нормально к поверхности; распределенная нагрузка или изгибающий момент на ограниченной площади, направленные нормально к поверхности). Суперэлементы, в свою очередь, делятся на элементы второго порядка в зависимости от геометрических очертаний (плоская трехслойная пластина, цилиндрическая или коническая трехслойная оболочка). Такое деление позволяет отнести каждый из элементов к одному из основных типов многослойных оболочек, по каждой из которых существует своя методика расчета [9].

Все элементы оболочки считаются свободно опертыми по границам раздела. В случае невозможности расчета какого-либо из элементов по существующим методикам, необходимо использовать методы вычислительной математики, в частности метод конечных элементов.

При практическом расчете оболочек реальная анизотропная структура может быть заменена эквивалентной по механическим свойствам ортотропной, имеющей одинаковые с первой нормальные модули упругости и коэффициенты Пуассона в различных направлениях, а также прочностные свойства материала. Такой метод позволяет с достаточной для практических целей точностью решить целый ряд инженерных задач. На этапе проектных исследований он представляется целесообразным, так как дает сравнительно простые зависимости и оправдывается хорошим согласованием теоретических результатов с экспериментами. При этом не

отвергаются более точные решения, позволяющие оценивать слоистость материала, свойства исходных компонентов, качество адгезии и т. п. Это дает возможность количественной оценки влияния каждого из перечисленных факторов.

Расчет многослойных оболочек из материалов с различными упругими характеристиками конструктивных слоев, в том числе в разных направлениях, требует вычисления жесткости каждого слоя. При проектировании оболочки из ортотропных или изотропных материалов суть преобразований приведенных величин жесткости состоит в том, что для общего случая конструктивно многослойных оболочек с ортотропными слоями, отличающимися геометрическими размерами и материалами, упругие свойства приводятся к условному изотропному материалу внутреннего слоя. Параметры жесткости конструкции приводятся к срединной поверхности оболочки. При расчете оболочек без каркасированного среднего слоя при выводе формул пренебрегают влиянием сближения внешних и внутренних слоев, что позволяет принять модуль упругости заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности равным бесконечности. Принимается равным нулю нормальный модуль упругости заполнителя, т. е. в выражение изгибной жесткости трехслойной конструкции вводятся данные только несущих слоев. При каркасировании среднего слоя дополнительно рассматриваются взаимодействие отдельных элементов сечения и распределение напряжений внутри сечения. При вертикальной ориентации ячеек каркаса представляется правомерным в качестве одного из вариантов расчетной схемы принять бесконечно широкую трехслойную пластину, нагруженную в одном направлении распределенной сжимающей нагрузкой, со средним слоем в виде сотового заполнителя или пологую цилиндрическую оболочку такой же конструкции [10].

На основании вышеизложенного была предложена конструкция надстройки в виде многослойной оболочки на матрице из легкого сплава. В отличие от существующих конструкций, получаемых путем формирования поверхностей из готовых панелей определенной формы, эта

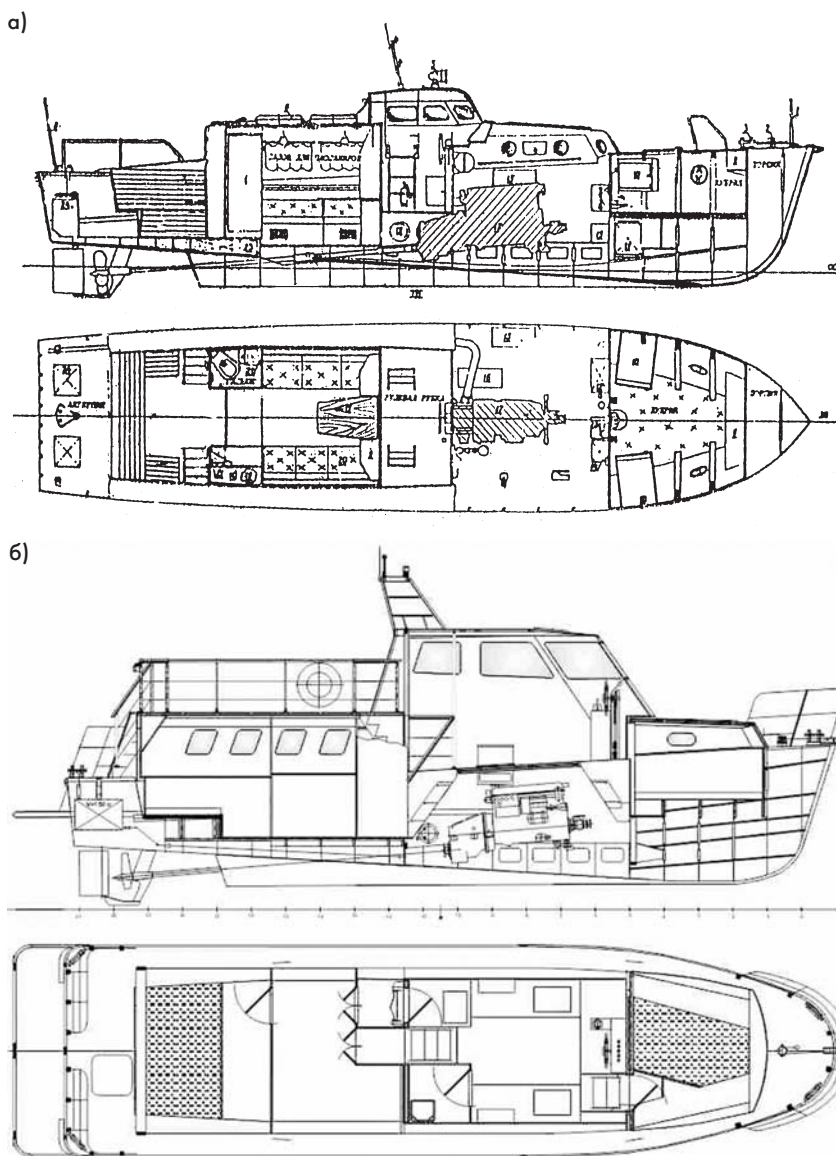


Рис. 3. Сравнение полезного объема катеров пр. 371У (а) и пр. 82340 (б), имеющих одинаковые корпус, энергетическую установку и движительно-рулевой комплекс

конструкция предполагает послойное формирование надстройки. Оболочка включает в себя внешний и внутренний слои, состоящие из поверхностей, разворачивающихся на плоскость, а также среднего слоя из вспененного полимера, каркасированного алюминиевым профилем. При оптимальном разбиении поверхности на сборочные единицы могут быть реализованы достаточно сложные дизайнерские решения, в частности поверхности с двойной кривизной больших радиусов.

В процессе проектирования многослойных оболочек были рассмотрены вопросы конструктивного снижения монтажных напряжений, возникающих при послойном формировании изделия. Были определены

мероприятия по снижению напряжений и деформаций на стыках поверхностей и в узле соединения с корпусом, разработана последовательность формирования надстройки из блоков и секций. Особое внимание уделялось формированию среднего слоя и возникновению в нем температурных напряжений. Был сделан вывод о необходимости дополнения «сэндвича» клетчатым каркасом профиля из легкого сплава.

В итоге был разработан и скомпонован комплекс технологических процессов, мероприятий по технике безопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии, достаточный для изготовления надстройки многослойной оболочковой конструкции на предприятии, облада-

ющем необходимым набором оборудования и персоналом определенной квалификации. Все технологические процессы разрабатывались на основании отраслевых стандартов. Определены методы контроля, перечень контролируемых параметров и способы устранения недостатков, а также методы испытаний изготовленных конструкций.

В соответствии с вышеизложенными принципами был создан опытный образец малого водоизмещающего катера пр. 82340 с многослойной алюминиево-полимерной надстройкой. В проекте катера, согласованном с Российским речным регистром, использованы элементы пр. 371У: корпус, механическая установка и движительно-рулевой комплекс; сохранено расположение водонепроницаемых переборок. С целью улучшения обитаемости особое внимание уделялось сохранению мореходных качеств прототипа.

В сентябре—октябре 2004 г. были проведены испытания, которые включали взвешивание судна, опыт кренования, швартовные и ходовые испытания, а также замеры уровня шума в пассажирских помещениях и ходовой рубке. Полученные данные показали, что применение надпалубных многослойных оболочковых конструкций на алюминиевой матрице позволяет при существенном увеличении объема внутренних помещений получить близкие к прототипу

значения массы, координат центра масс катера и, соответственно, близкие характеристики остойчивости, ходкости и управляемости (рис. 1). Не зафиксировано повышенного влияния ветра на остойчивость на курсе и управляемость катера по сравнению с прототипом. Не исключено, что это связано с большой энерговооруженностью обоих катеров и довольно высокой их скоростью (на полном ходу  $F_g = 0,65$ ). Удалось добиться существенного снижения уровня шума в помещениях, расположенных в непосредственной близости от главного двигателя.

При сравнении катеров пр. 371У и пр. 82340 необходимо выделить следующие преимущества последнего при практически полном сохранении мореходных качеств:

архитектурно-конструктивный тип катера изменился с полуоткрытого на закрытый, что более рационально в условиях климата нашей страны; появилась возможность перемещения от носа до кормы без выхода на открытую палубу, что повысило безопасность экипажа (рис. 2);

объем пассажирских помещений увеличился примерно в 2,5 раза, появилась полноценная прогулочная палуба, улучшились естественное освещение и обзор из иллюминаторов (рис. 3);

улучшились условия на рабочем месте судоводителя;

надстройка катера стала долговечной, не требующей сложного ухода.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение многослойных оболочек на матрице из легких сплавов для надстройки, рубки и других надпалубных элементов существенно улучшает эксплуатационные качества малого судна.

#### Литература

1. Киреев В. А., Толстобров Е. П. Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых панелей при поперечном изгибе. М., 1977.
2. Загребалов А. А., Душин А. М., Сенаторова О. Г. Применение высокопрочных алюминиевых сплавов в металлополимерных композитах//Авиационные материалы. М., 1990.
3. Загребалов А. А., Кишкина С. И. Остаточные напряжения и выносливость композиционных материалов//Авиационные материалы. М., 1990.
4. Кадобнова Н. В. и др. Прочность слоистых алюминиевых листов//Авиационные материалы. М., 1984.
5. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы. Новосибирск: НГТУ, 2002.
6. Богданов А. С., Михалев И. И. Применение сочетаний клеев для конструктивных соединений//Авиационные материалы. М., 1988.
7. Гаранина С. Д. и др. Структура и свойства тонкого слоя полимера вблизи твердой поверхности//Авиационные материалы. М., 1986.
8. Фейгин Л. Л. Некоторые особенности клееварных соединений//Авиационные материалы. М., 1988.
9. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003.
10. Александров А. Я., Наумова М. И. Об определении оптимальных параметров элементов авиационных конструкций типа трехслойных пластин и пологих оболочек с сотовым наполнителем. Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машиностроение, 1984.

## БЛИЦ-НОВОСТИ

✓ В конце 2004 г. ФГУП ПО «Севмаш» заключило контракт с компанией «Юлесбург» с Виргинских островов на постройку мегаяхты длиной около 70 м. Компания планирует построить серию яхт VIP-класса.

✓ ОАО «Невский судостроительно-судоремонтный завод» приступил к постройке плавучего развлекательного комплекса РК-2005 для Москва-реки. Заказчиком является холдинг, в который входят фирмы «Ривер» (Москва) и «Вулкан» (Санкт-Петербург). Судно сможет принять на борт 700 гостей, к услугам которых — казино, танцевальные залы и т. д.

✓ 7 января 2005 г. ОАО «Новошип» приняло в эксплуатацию головной танкер класса «Афромакс» дедевитом 105 000 т, построенный южнокорейской верфью Hyundai Heavy Industries. В 2005 г. компания планирует получить еще три «Афромакса» из Южной Кореи и два танкера-продуктовоза дедевитом 47 400 т из Хорватии. В прошлом году ОАО «Новошип» подписало контракты на постройку восьми «Афромаксов» и четырех танкеров-продуктовозов на сумму более 550 млн дол.

✓ 29 декабря 2004 г. на хорватской верфи Uljanik Shipyard состоялся спуск на воду первого из четырех железнодорожных паромов дедевитом 5000 т (10 269 комп. рег. т) для Каспийского моря. В реализации этого проекта принимают

участие московская группа «Промышленные инвесторы» и Махачкалинский морской торговый порт. Каждый паром стоимостью 20 млн дол. может перевезти 52 вагона. Схема финансирования: 70% контрактной цены — кредиты иностранных банков, остальное — платежи участников проекта.

✓ Две петербургские яхтенные верфи ООО «Морозов яхтс» и ЗАО «Компан марин» решили объединить свои усилия для постройки 11-метровой гоночно-круизной яхты пр. А38, в которой будут сочетаться высокая скорость и комфортные условия для экипажа.

✓ Судоремонтные заводы Приморского края отремонтировали 503 судна в 2004 г. Объем выполненных работ — 1560 млн руб. (+5,7% к 2003 г.). Наивысшие показатели у ОАО «Славянский СРЗ» (470 млн руб.) и ОАО «Находкинский СРЗ» (406 млн руб.).

✓ Жигаловский судостроительный завод планирует в 2005 г. построить патрульное судно для Байкала (заказчик — Байкало-Ангарское бассейновое управление), три обстановочных теплохода (Якутское водно-бассейновое управление) и яхту стоимостью 10 млн руб. для ООО «Сиболпторг».

✓ 27 декабря 2004 г. на стапеле ОАО «Окская судостроительная верфь» заложен очередной сухогруз «Русич-7» пр. 00101. В 2005 г. планируется сдать два судна этого типа — «Русич-5» и «Русич-6», готовность которых к концу января была соответственно 53,4% и 24,2%.