

Опыт использования компьютерных технологий при создании композитных конструкций судовых энергетических комплексов

Одним из трендов в современном судостроении является неуклонное расширение использования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Растущий интерес к созданию из этих материалов как корпусных конструкций, так и элементов судовых энергетических комплексов обусловлен рядом полезных качеств ПКМ, к которым относятся высокие удельные характеристики прочности и жесткости, высокие диссипативные свойства и коррозионная стойкость, немагнитность и т.д. Перечисленные особенности и слоистость структуры, позволяющей сочетать различные материалы в едином пакете, обуславливают повышенную привлекательность использования ПКМ в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях динамического нагружения. Некоторые из таких конструкций, разработанных специалистами ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова» и внедренных на заказах, рассматриваются в данной статье.

Виброизолирующие соединительные муфты

Массовый переход на низкочастотную амортизацию корабельных энергетических установок послужил импульсом к проведению исследований по разработке виброизолирующих соединительных муфт (ВСМ), позволяющих наряду с передачей крутящего момента обеспечить компенсацию больших взаимных смещений соединяемых валов. Результатом этих исследований стало создание ВСМ из ПКМ, отличающихся от металлических и резинометаллических прототипов рядом преимуществ, к которым следует отнести низкую стоимость, малую массу и высокий уровень виброизоляции. Выбор ПКМ в качестве основного материала для изготовления ВСМ обусловлен их относительно малой жесткостью, а также возможностью управления деформативными свойствами за счет изменения структуры армирования и применения различных армирующих материалов. Именно отмеченные особенности конструкций из ПКМ и позволяют создавать ВСМ, удовлетворяющие основному предъявляемому к ним требованию, вытекающему из их функционального назначения, – максимальной деформативности во всех направлениях при обеспе-

чении передачи номинального крутящего момента. Приоритет создания ВСМ из ПКМ принадлежит фирме Geislinger, в 1993 году получившей первый патент на такую конструкцию. Начиная с 2002 года в интересах отечественного судостроения в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова также выполняются работы по созданию аналогичных изделий.

В отличие от ВСМ фирмы Geislinger отечественная виброизолирующая соединительная муфта из ПКМ представляет собой монолитную конструкцию, основными элементами которой являются мембраны, крепящиеся к металлическим контрфланцам, и промежуточный вал (рис. 1). Необходимость обеспечения безотказной работы в диапазоне температур от -20 до $+60^{\circ}\text{C}$ с допуском кратковременного перегрева до $+80^{\circ}\text{C}$ предопределила выбор основного материала – эпоксидного стеклопластика. В процессе проектирования основное внимание было сосредоточено на минимизации осевой, изгибной, сдвиговой и крутильной жесткостей ВСМ при безусловном обеспечении несущей способности конструкции в целом. Первые три жесткости связаны с деформативностью мембран, толщина которых переменна в радиальном направлении и ограничивается критериями предельного состояния по прочности и устойчивости. Крутильная жесткость ВСМ в целом определяется крутильной жесткостью промежуточного вала, размеры которого выбираются из условия обеспечения прочности при кручении.



Рис. 1. Конструкция ВСМ из ПКМ

Длительность срока эксплуатации (30 лет) и большое количество циклов нагружения ($N \sim 2 \cdot 10^9$) потребовали повышенного внимания к проблеме долговечности конструкции ВСМ, зависящей от воздействия среды эксплуатации (повышенная температура, старение ПКМ, стойкость к возможному попаданию нефтепродуктов) и циклического характера приложения нагрузки. Вопросы, связанные с обеспечением стойкости ПКМ к воздействию окружающей среды, решались путем исследования влияния перечисленных факторов на упругие и прочностные характеристики выбранного эпоксидного стеклопластика. Вторая часть проблемы долговечности, касающаяся учета влияния накопленных повреждений, возникающих в процессе циклического нагружения ВСМ, вследствие различия структур армирования мембран и промежуточного вала также потребовала проведения экспериментальных исследований. Совокупность полученных эмпирическим путем данных учитывалась при назначении норм допускаемых напряжений.



Рис. 2. Экспериментальное определение характеристик ВСМ из ПКМ

Численные исследования влияния основных геометрических параметров ВСМ (длины, диаметров и толщин мембран и промежуточного вала) на ее прочность и жесткостные характеристики выполнялись на основе метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS. Эти исследования позволили выбрать рациональные структуры армирования основных элементов ВСМ. В частности, было показано, что для мембран наиболее рационально применять веерную структуру армирования, а для промежуточного вала – диагональную. На базе проведенных исследований была разработана методика проектирования ВСМ из ПКМ и технология их формования, что обеспечило возможность серийного изготовления муфт. Каждая серийно изготовленная муфта подвергается приемо-сдаточным испытаниям, в процессе которых проверяется ее прочность путем нагружения крутящим моментом и определяются значения осевой, радиальной, изгибной и крутильной жесткостей (рис. 2). Хорошее соответствие экспериментальных

и расчетных величин (расхождения, как правило, не превышают 10 %) свидетельствует о высокой достоверности данного подхода к проектированию ВСМ.

В настоящее время апробированы ВСМ, обеспечивающие передачу номинального крутящего момента до максимальной величины $M_T^{\max} = 400 \text{ кНм}$ при значениях взаимных смещений соединяемых валов до $\Delta^{\max} = 20 \text{ мм}$.

Промежуточная рама с повышенным вибропоглощением

Известно, что одним из наиболее эффективных способов снижения вибрации судового энергетического оборудования является применение двухкаскадной амортизации с промежуточными вибропоглощающими конструкциями. Подавляющее большинство средств вибропоглощения позволяет значительно снизить уровни вибрации в области средних и высоких звуковых частот. В области же низких звуковых частот, соответствующих балочным модам колебаний, номенклатура эффективных способов демпфирования, по существу, ограничивается применением составных слоистых металлополимерных структур. Рассеяние энергии в элементах таких конструкций осуществляется за счет циклического сдвигового деформирования тонкого слоя вязкоупругого эластомера, находящегося между двумя жесткими несущими слоями. Максимальная демпфирующая способность в случае изгибных и (при выполнении некоторых требований к симметрии) крутильных мод колебаний достигается при равенстве изгибных и крутильных жесткостей несущих слоев. Продольные моды колебаний при этом не демпфируются. Кроме того, обеспечение

прочности металлополимерных структур требует установки дополнительных связей между жесткими несущими слоями, что влечет за собой ужесточение конструкции и, следовательно, снижает ее виброакустическую эффективность для низших собственных форм колебаний.

Одним из возможных путей устранения указанных недостатков является применение вибропоглощающих конструкций из ПКМ, отличающихся от металлов и сплавов более высокими диссипативными свойствами, величина которых может быть дополнительно увеличена за счет введения в состав слоистой структуры жестких вибропоглощающих полимеров, работающих совместно с несущими слоями из волокнистых ПКМ. Слоистые неоднородные конструкции из ПКМ создаются в едином технологическом процессе и поэтому свободны от такого недостатка их металлополимерного аналога, как наличие связей, необходимых для соединения жестких несущих слоев. Бесспорным достоинством вибропоглощающих конструкций из ПКМ является также возможность получения близких



Рис. 3. Рама под энергетическое оборудование

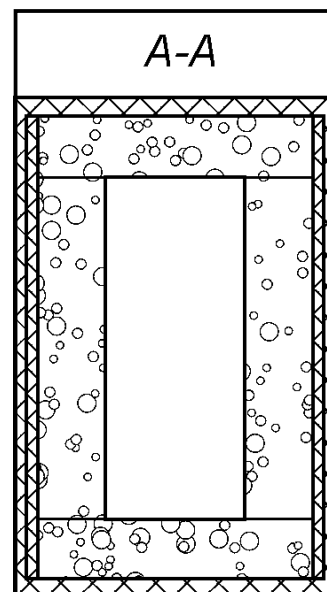


Рис. 4. Поперечное сечение коробчатой балки

по величине коэффициентов механических потерь, соответствующих различным видам колебаний (изгибных, крутильных, продольных). Использование указанных достоинств позволило создать монолитную вибропоглощающую композитную промежуточную раму под судовой дизель-редукторный агрегат.

Рама (рис. 3) образована совокупностью пересекающихся продольных и поперечных коробчатых балок. Профили поперечного сечения балок (рис. 4) состоят из внутреннего слоя жесткого вибропоглощающего полимера, стенок из эпоксидного стеклопластика и наружного слоя из того же материала. Наружный слой облицовывает профиль по всему периметру, непрерывно переходя от одной балки к другой и обеспечивая монолитное соединение пересекающихся балок в единую конструкцию. Балки внутри подкреплены бракетами, часть из которых является продолжением стенок. В местах приложения локальных нагрузок, связанных с креплением амортизаторов и энергетического оборудования, устанавливаются дополнительные бракеты.

Известно, что применение покрытий из жестких вибропоглощающих полимеров для демпфирования колебаний стальных конструкций не позволяет достичь эффекта для балочных мод колебаний, а для пластинчатых мод эффективная толщина покрытия должна в 2–3 раза превышать толщину стальной пластины. Однако, учитывая, что инерционно-жесткостные характеристики конструкций из ПКМ существенно отличаются от металлических прототипов, вопрос об эффективности применения жестких вибропоглощающих полимеров для демпфирования композитных конструкций требует дополнительного исследования. С этой целью были выполнены расчеты собственных частот и коэффициентов механических потерь для первых трех тонов затухающих колебаний прямоугольных слоистых пластин, моделирующих стенку коробчатой балки, состоящей из слоя стеклопластика толщиной

h_1 и слоя жесткого вибропоглощающего полимера толщиной h_2 . Анализ полученных результатов позволил установить, что для демпфирования пластинчатых форм колебаний промежуточной рамы из эпоксидного стеклопластика эффективная относительная толщина слоя жесткого вибропоглощающего полимера не должна превышать величину $h_2/h_1 \leq 0,75 - 1,00$. В то же время демпфирование балочных форм колебаний требует существенно больших величин h_2/h_1 и, по существу, ограничивается конструктивными требованиями (например, требованием по максимальной массе конструкции). Поэтому в данной работе было принято соотношение $h_2/h_1 = 3$.

Расчетное обоснование выбранных конструктивных решений и определение напряженно-деформированного состояния и амплитудно-частотных характеристик рамы из ПКМ выполнялось методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ANSYS. При построении конечно-элементной модели рамы учитывалась анизотропия и слоистость структуры элементов рамы, переменность толщин слоев, наличие накладок, металлических планок и других крепящих элементов. Установка рамы в корпусе на амортизаторы моделировалась введением упругих опор соответствующей жесткости в местах их расположения. Величина нагрузки назначалась исходя из массы установленных на раме двигателей и редукторов с учетом инерционных составляющих, возникающих в процессе эксплуатации судна. Амплитудно-частотные характеристики рамы определялись при различных вариантах действия возбуждающих сил (противофазное, синфазное возбуждение и т.п.) в диапазоне частот 7,5–60 Гц. При этом предполагалось, что двигатели и редукторы являются абсолютно твердыми недеформируемыми телами.

Проведенные МКЭ-расчеты амплитудно-частотных характеристик позволили оценить виброакустическую эффективность разработанной композитной

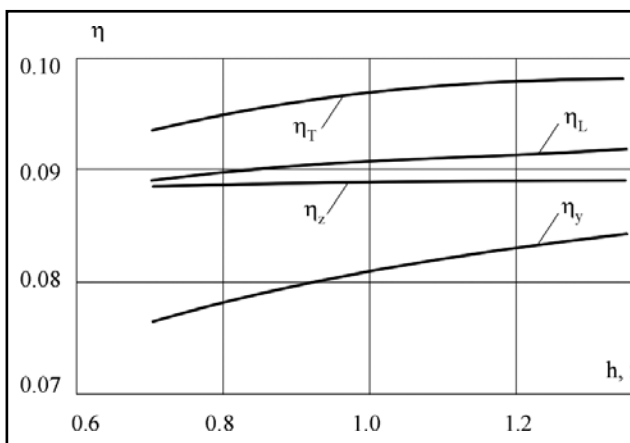


Рис. 5. Зависимость диссипативных свойств коробчатого стержня от высоты поперечного сечения

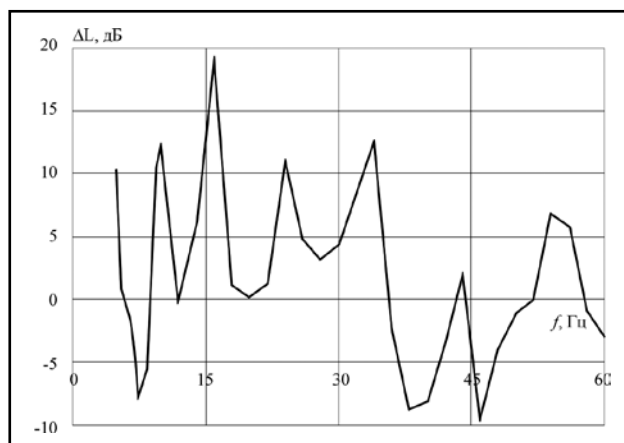


Рис. 6. Виброакустическая эффективность рамы из ПКМ

промежуточной рамы переменной высоты поперечного сечения h и, следовательно, переменных жесткостных характеристик ее основных несущих элементов. В то же время значения коэффициентов механических потерь мало изменяются во всем диапазоне изменения h (от 0,7 до 1,35 м) и остаются практически постоянными ($\eta \geq 0,08$) (рис. 5). Результаты натурных экспериментов, выполненных на раме из ПКМ, позволили установить, что в диапазоне частот f от 12 до 360 Гц среднее значение коэффициента механических потерь $\eta_{cp}^{эксн} = 0,10$, что подтверждает достоверность результатов расчета.

Обоснование виброакустической эффективности рамы из ПКМ проводилось путем сопоставления уровней динамических сил, передаваемых на корпус рамой из ПКМ и рамой из стали равной массы. По-

следняя представляет собой сварную конструкцию, основные элементы которой также выполнены в виде коробчатых стержней, полки и стенки которых имеют толщину 14 мм. Значения коэффициентов механических потерь для рамы из ПКМ принималось равным $\eta = 0,10$, а для стальной рамы $\eta = 0,033$. Сравнение виброакустической эффективности стальной и композитной конструкций (рис. 6) показало, что применение рамы из ПКМ, характеризующейся высокими диссипативными характеристиками, позволяет на резонансных частотах получать дополнительный виброакустический эффект ($\Delta L = 6 - 19$ дБ) по сравнению с металлическим аналогом той же массы.

Н. Н. Федонюк, Б. А. Ярцев,
ФГУП «ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова»

НОВОСТИ

Открытие Центра компетенции ANSYS

Компании ANSYS Inc., CADFEM CIS и Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ) объявили об открытии в СПбГМТУ Центра компетенции в области расчетного моделирования морских инженерных сооружений. Основной деятельностью центра станет

развитие и распространение компетенции расчетного моделирования для решения научных и инженерных задач, возникающих при разработке современной наукоемкой техники. Для обеспечения работы Центра компетенции компания CADFEM CIS, авторизованный дистрибьютор программных продуктов ANSYS, предоставляет СПбГМТУ учебные лицензии на программные продукты ANSYS, информационные, технические и иллюстративные материалы. СПбГМТУ намеревается способствовать продвижению методов расчетного мо-

делирования в исследованиях и проектах предприятий судостроительной промышленности.

Как отметил ректор СПбГМТУ К. П. Борисенко: «Сотрудничество с CADFEM CIS помогает нам не только готовить квалифицированных морских инженеров, но и быть на передовом рубеже науки, что, несомненно, способствует росту авторитета «Корабелки» и ее выпускников».

По словам генерального директора CADFEM CIS В. Д. Локтева: «Для нас важно сотрудничество с университетами, это не только расширяет круг наших интересов, но и дает верное направление развитию компании. Общение наших инженеров и ученых и преподавателей университетов

взаимно обогащает стороны и дает сильный стимул к внедрению расчетного математического моделирования в учебный и производственный процесс».

Ответственный менеджер ANSYS Inc. по Восточной Европе Томас Виллкоммен: «Создание центров компетенции на базе сотрудничества университетов и высокотехнологических компаний, их поддержка и развитие – важная особенность и даже необходимость развития наукоемкой индустрии, к которой, безусловно, относится судостроение. Компания ANSYS поддерживает своих партнеров в их стремлении увеличить долю наукоемкого труда в проектировании и создании новой высокотехнологичной техники».



Вручение сертификата Центра компетенции

ARBYTE рекомендует
подлинное программное обеспечение Microsoft®



- ✓ профессиональные средства визуализации и 3D-навигации
- ✓ уникальные технологии снижения акустического шума
- ✓ оптимизация под профессиональные приложения САПР



Непревзойденный результат!

ARBYTE®

Москва ARBYTE
+7 (495) 223-4322
www.arbyte.ru

