

В. Н. Половинкин
« 06 » мая 2020 г.

- 2.9. Проектирование и оптимизация конструкций кораблей, судов и средств океанотехники с заданными свойствами прочности и надёжности при снижении материалоемкости.

Диссертация Филатова Антона Романовича посвящена актуальной теме рационального проектирования судовых конструкций. Эффективное решение задачи создания лёгкого и одновременно прочного корпуса получить сложно, и здесь весьма важным вопросом является конструктивно-силовое оформление корпусных конструкций, которое задаёт тон всему последующему процессу проектирования. Следующим за ним вопросом является назначение прочных размеров элементов конструкций, обеспечивающих их предельную прочность и устойчивость. После этого возникает вопрос снижения уровня концентрации напряжений в узлах конструкций, обеспечивающего рациональное соотношение между усталостной прочностью и трудоёмкостью изготовления конструкций. Каждый проектант сталкивается с тремя перечисленными проблемами и чаще всего решает их с привлечением накопленного конструкторского опыта, выраженного, например, в альбомах типовых узлов и конструкций. При создании нового проекта конструктор, как правило, ориентируется на ближайший прототип и выполняет его переработку под заданные в проекте функциональные и технические характеристики. Очевидно, что при таком подходе вновь получаемые конструкции являются в некоторой степени повторением уже имеющихся аналогов и большинство отличий носят точечный, крайне локальный характер, то есть имеет место эволюционный процесс развития конструкторской мысли. Плюсы традиционного подхода заключаются в надёжности получаемых конструкторских решений, имеющих основание на многолетнем накопленном опыте проектирования и эксплуатации. Что же касается минусов, то они состоят, во-первых, в необходимости иметь тот самый накопленный опыт, что невозможно при создании принципиально новых изделий, и, во-вторых, в низкой вероятности появления прорывных конструкторских решений, которая больше всего зависит от творческих способностей самого конструктора. Работа направлена на создание метода проектирования судовых конструкций, стимулирующего разработку новых прорывных технических решений.

В диссертации:

1. Разработан метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы. Этот метод помимо проверки правильности принятых решений обеспечивает системное решение трёх задач проектирования: определение конструктивно-силового оформления изделия за счёт выполнения ТО; определения прочных размеров конструкций путём выполнения ПО; обеспечения усталостной прочности с помощью выполнения ОФ. Отличительной чертой, составляющей научную новизну разработанного метода, является совместное выполнение трёх видов оптимизации. Данный метод позволяет в короткие сроки создавать принципиально новые рациональные конструкции, отличающиеся от традиционных низкой материалоемкостью и высоким ресурсом, и стимулирует разработку новых прорывных конструктивных решений.
2. Разработан новый метод проверки усталостной прочности, включающий алгоритмы проверки как многоциклового, так и малоциклового усталости. Учёт в разработанном методе трёхосности напряжённо-деформированного

состояния позволяет говорить о повышении точности расчётов. Разработана новая математическая модель малоциклового усталости. Получены аналитические выражения расчётных напряжений при анализе усталостной прочности в случае плоского напряжённого состояния и в случае пропорционального нагружения. Предложена модификация метода Синса.

3. Предложены формулы для определения истинных напряжений и деформаций на участке после образования пластической шейки, а также выражения для касательного модуля в линейных моделях пластического упрочнения, что позволяет более точно определять напряжённо-деформированное состояние при больших пластических деформациях. Разработан алгоритм проверки предельной прочности.
4. Разработан алгоритм проверки нелинейной устойчивости, учитывающий эффекты нелинейной теории упругости и теории пластичности.

Выполнена апробация предложенного метода оптимального проектирования судовых конструкций и на его основе разработаны:

- узел стыкового соединения алюминиевых панелей в составе корпуса высокоскоростного судна, отличающийся от рекомендованного Правилами РМРС в 2 раза меньшей массой и в 3 раза большим ресурсом;
- запатентованная конструкция крышки люкового закрытия сухогрузного судна, отличающиеся от используемой на сухогрузе проекта RSD59 на 30 % меньшей массой и в 5 раз большим ресурсом;
- конструкция перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы, отличающаяся от прототипа на 60 % большей жёсткостью и почти в 2 раза большей несущей способностью при одинаковой массе.

2 Связь темы с планом основных научных работ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Тема диссертационной работы непосредственно связана с повышением уровня цифровизации судостроительной науки.

Данная область исследований связана с созданием научно-технического задела в области цифрового научного центра судостроения.

3 Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов и степень достоверности проведенных исследований

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

В ходе работы над диссертацией автор лично:

- разработал основные блоки алгоритма рационального проектирования судовых конструкций и дал рекомендации по его выполнению;
- проанализировал методы топологической оптимизации, параметрической оптимизации и оптимизации формы;
- сопоставил между собой различные варианты методов топологической оптимизации и дал рекомендации по рациональным областям их применения в разработанном методе оптимального проектирования;
- предложил модификацию метода последовательного квадратичного программирования;

- разработал алгоритм проведения многоцелевой оптимизации при наличии нескольких расчётных случаев и дал рекомендации по его выполнению;
- продемонстрировал влияние сочетания нескольких нагрузок на получающиеся оптимальные конструкции;
- предложил формулы для определения истинных напряжений и деформаций на участке после образования пластической шейки для стандартного образца при разрыве;
- проанализировал критерии прочности и модели пластического упрочнения, где предложил выражения для касательного модуля в линейных моделях;
- разработал алгоритм проверки предельной прочности и дал рекомендации по его выполнению;
- разработал алгоритм проверки нелинейной устойчивости и дал рекомендации по его выполнению;
- проанализировал методы сведения сложного напряжённого состояния к простому в расчётах усталостной прочности и дал рекомендации по их использованию как для многоциклового, так и малоциклового усталости;
- для усталостной прочности получил выражения расчётных напряжений через главное напряжение и коэффициент двуосности в случае плоского напряжённого состояния, а также выражения расчётных напряжений в случае пропорционального нагружения;
- предложил знаковую модификацию метода Синса;
- разработал новый метод расчёта усталостной прочности, учитывающий трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах и особенности проверки как многоциклового, так и малоциклового усталости;
- выполнил апробацию предложенного метода оптимального проектирования судовых конструкций.

Таким образом, представленная к защите диссертация является самостоятельной творческой работой автора.

Достоверность предложенных методов и моделей предельной и усталостной прочности обеспечена использованием в их основании классических результатов механики деформируемого твёрдого тела, теории упругости (в том числе нелинейной), теории пластичности и механики разрушения.

Достоверность полученных результатов параметрической оптимизации, выполненной в программном комплексе ANSYS Workbench, подтверждена:

- аналитически на примере решения тестовой задачи минимизации массы свободно опертой балки, нагруженной равномерно распределённой поперечной нагрузкой;
- путём демонстрации совпадения расчётных и экспериментальных результатов на примере решения задачи максимизации несущей способности перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы.

4 Новизна и практическая значимость результатов исследований

Новизна полученных автором научных результатов состоит в том, что:

- впервые разработан метод проектирования судовых конструкций, основанный на комплексном использовании трёх видов оптимизации: топологии, размеров и формы, что позволяет проектировать рациональные конструкции, удовлетворяющие критериям как предельной, так и

усталостной прочности, а также жёсткости, устойчивости и отстройке от резонансных частот;

- разработан новый метод расчёта многоциклового и малоциклового усталости судовых конструкций, содержащий алгоритмы, учитывающие трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах;
- валидация полученного оптимального проектного решения на основе новых методов оценки статической и усталостной прочности, учитывающих трёхосность напряжённо-деформированного состояния и его усреднение в пределах структурного элемента, что повышает точность расчётов и позволяет отказаться от экспериментальной проверки.

Практическая значимость создания метода проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы заключается в появлении нового рабочего инструмента проектирования, позволяющего в короткие сроки создавать принципиально новые рациональные конструкции, отличающиеся от традиционных низкой материалоемкостью и высоким ресурсом, и стимулирующего разработку новых прорывных конструктивных решений. Результаты работы использованы:

- в расчётах малоциклового усталости трёхслойных алюминиевых панелей в рамках НИР «Разработка технологии рационального конструирования, обеспечения прочности и эксплуатационной безопасности нового поколения корпусов скоростных и высокоскоростных судов малого водоизмещения с ограниченными районами плавания на основе металлических материалов с заполнителем», шифр «Альтернатива»;
- при создании программы автоматизированной проверки предельной и усталостной прочности корпусов навалочных и наливных судов на основе единых правил МАКО в рамках ОКР «Разработка концептуального проекта универсального навалочника-контейнеровоза дедвейтом 70 тыс. тонн, отвечающего унифицированным требованиям МАКО», шифр «Навалочник-контейнеровоз»;
- при разработке перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы в рамках СЧ ОКР «Проектирование, изготовление и испытание маломасштабных моделей и полунатурных конструкций перекрытий ледового пояса морских ледостойких платформ, а также разработка рекомендуемых конструктивных схем ледового пояса и методических рекомендаций по расчётно-экспериментальному определению локальных ледовых нагрузок на конструкции инженерных сооружений», шифр «Платформы-лёд-конструкция»;
- при расчёте усталостной долговечности опор СПБУ "Арктическая" в рамках НИР «Расчет усталостной долговечности опор СПБУ "Арктическая" при её предстоящей длительной транспортировке на судне-носителе из Сингапура в Мурманск»;
- при проектировании алюминиевой крышки люкового закрытия в рамках НИР «Расчёт по обоснованию эффективности скандий-содержащего сплава в конструкциях морской техники»;
- при разработке новой редакции Правил классификации и постройки высокоскоростных судов в рамках НИР «Разработка проекта новой редакции части II "Корпус" Правил классификации и постройки высокоскоростных

судов с учетом требований современных международных нормативных документов, отраслевых стандартов и правил классификационных обществ».

5 Ценность научных работ соискателя ученой степени

Ценность научных работ соискателя заключается в том, что в них поставлены и решены научные проблемы, во-первых, рационального проектирования судовых конструкций и, во-вторых, проверки их несущей способности и усталостного ресурса с учётом трёхосности напряжённо-деформированного состояния, нелинейной теории упругости, пластического течения материала и современных представлений механики разрушения на основе интегральных критериев, что повышает точность расчётов в разы по сравнению с имеющимися в нормативных документах и позволяет отказаться от выполнения экспериментальной проверки конструкций.

Научные работы соискателя развивают и дополняют существующие подходы к оптимизации судовых конструкций на различных этапах проектирования. Использование результатов, полученных автором, может помочь конструкторам при проектировании принципиально новых изделий морской техники, работающих в условиях сложного нагружения, а также проверке их предельной и усталостной прочности и устойчивости.

Предложенные автором разработки и рекомендации, такие как:

- метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы;
- алгоритм проведения многоцелевой оптимизации;
- алгоритм проверки предельной прочности;
- алгоритм проверки нелинейной устойчивости;
- метод расчёта усталостной прочности, учитывающий трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах и содержащий алгоритмы проверки как многоцикловой, так и малоцикловой усталости;

определяют перспективы их практического использования в конструкторских бюро, научно-исследовательских институтах и научных центрах.

Основные положения диссертационного исследования и авторские разработки служат средством рационального проектирования судовых конструкций и объектов морской техники, снижения их материалоёмкости и повышения ресурса, что обуславливает повышение экономической эффективности.

6 Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Наиболее существенные положения и результаты диссертационного исследования нашли отражение в 11 научных публикациях (доля авторства составляет не менее 80 %) общим объемом 101 печ. лист, в т.ч. 9 статей опубликованы в изданиях, включенных в Перечень, определенный ВАК для публикации результатов научных исследований.

Соискатель имеет следующие публикации в рецензируемых изданиях:

- 1) Кудрин М.А., Маслич Е.А., Платонов В.В., Филатов А.Р. Автоматизация расчётной проверки предельной и усталостной прочности корпусов навалочных и наливных судов на основе единых правил МАКО // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. № 82(366). С. 17–20.

- 2) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование процессов упругопластического деформирования перекрытия ледового пояса морской ледостойкой платформы // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. № 86(370). С. 125–132.
- 3) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Модель упругопластического деформирования алюминиевых сплавов и критерии малоциклового усталости конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. выпуск 2. С. 85–95.
- 4) Александров А.В., Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р., Рыбалко Т.Р. Расчетный анализ усталостной долговечности и скорости выработки ресурса на различных стадиях жизненного цикла СПБУ // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 1. С. 137–145.
- 5) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Учет многоосности нагружения узлов соединения конструкций морской техники при расчетах их усталостной прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 1. С. 153–161.
- 6) Филатов А.Р. Различные способы учета трехосности напряженного состояния при расчетах усталостной прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 2. С. 132–142.
- 7) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 95–108.
- 8) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Конструктивное оформление узлов судовых конструкций с использованием программ топологической и параметрической оптимизации // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Спец. выпуск 1. С. 67–72.
- 9) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-3(47). С. 58–65.

В публикациях полностью отражены основные научные и практические результаты, полученные лично автором.

Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на различных научно-технических конференциях, в числе которых:

- 1) 11-ая ежегодная конференция молодых учёных и специалистов «Новые материалы и технологии» (Санкт-Петербург, 2012);
- 2) Научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая памяти акад. Ю.А. Шиманского (Санкт-Петербург, 2013);
- 3) Научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая памяти проф. И.Г. Бубнова и 110-летию со дня образования кафедры строительной механики корабля СПбГМТУ (Санкт-Петербург, 2014);
- 4) Международная конференция «Современные технологии математической подготовки студентов инженерных специальностей – MetaMath» (Санкт-Петербург, 2017);
- 5) IX международная конференция «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN'2017 (Санкт-Петербург, 2017);
- 6) IV научно-техническая конференция «Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы» (Москва, 2017);

- 7) Научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая памяти проф. В.А. Постнова (Санкт-Петербург, 2017);
- 8) Научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая 125-летию основания Крыловского государственного научного центра (Санкт-Петербург, 2018);
- 9) Всероссийская молодежная конференция «НТРС-2019» (Санкт-Петербург, 2019);
- 10) Научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая памяти проф. О.М. Паля (Санкт-Петербург, 2019).

В соавторстве (50 %) получен 1 патент на изобретение «Крышка люкового закрытия сухогрузного судна» № 2724042 от 18.06.2020.

7 Рекомендации по использованию полученных результатов и выводов

Результаты и выводы диссертационной работы могут найти дальнейшее применение:

- 1) в конструкторских бюро при оптимизации существующих типовых узлов и конструкций, а также при проектировании с использованием альтернативных методов расчётов, предусмотренных Правилами РМРС;
- 2) в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и других научных центрах при разработке принципиально новых проектов судов и их концептуальном проектировании.

8 Отсутствие заимствований без ссылок на автора и (или) источник заимствования материалов или отдельных результатов

Использованные результаты других авторов приведены с соответствующими ссылками. Заимствования без ссылок отсутствуют.

Выводы

1. Диссертационная работа соискателя учёной степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке эффективного метода проектирования судовых конструкций и объектов морской техники, имеющей значение для развития судостроения.
2. Диссертационная работа написана ясным и грамотным языком, имеет внутреннее единство. Суть исследования изложена логично и аргументировано. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика» в части:
 - 1.9. Математическое описание параметров напряжённо-деформированного состояния конструкций корпуса корабля или другого морского инженерного сооружения, прогнозирование этих параметров в реальных условиях эксплуатации; разработка и развитие численных методов исследования прочности и надёжности конструкций;
 - 2.7. Прочность корабля и морских сооружений – вопросы о способах обеспечения прочности и надёжности корпуса и отдельных конструкций в условиях строительства, эксплуатации, ремонта, вывода из строя и утилизации;

- 2.9. Проектирование и оптимизация конструкций кораблей, судов и средств океанотехники с заданными свойствами прочности и надёжности при снижении материалоемкости.
- 3. Диссертация соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, ред. от 01.10.2018).
- 4. Диссертация «Метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы» Филатова Антона Романовича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика».

Заключение принято на заседании 3 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр» 05 ноября 2020 г. На заседании присутствовали 10 человек, из них докторов наук – 3, кандидатов наук – 4. Результаты голосования: «за» – 10, «против» – 0, «воздержались» – 0.

Председатель заседания
начальник 3 отделения, канд. тех. наук

В.М. Шапошников