

**Особенности поиска, выполняемого на основе
усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS,
оптимальных конструктивных параметров
каркасных элементов скоростных амфибийных машин
при движении по воде**

© И. Ван, В.Н. Зузов, В.В. Иваненков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Для того чтобы уменьшить массу каркасов скоростных амфибийных машин при обеспечении прочности и жесткости кузова, были проведены оценка и выбор нагрузочных режимов с целью последующей оптимизации кузова. Параметрическая оптимизация выполнена при нагрузке, рассчитанной для прямолинейного движения амфибии по воде с максимальной скоростью 50 км/ч. В ходе исследования изучено влияние таких конструктивных параметров, как форма сечения, материал стенок и наполнитель, на поведение каркасных элементов для нахождения наилучших вариантов из них с целью учета их при оптимизации. При поиске оптимального решения по расчетным параметрам в диапазоне возможного их изменения для сокращения машинного времени был использован метод параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS. Цель оптимизации — поиск параметров, которые позволили бы получить конструкции минимальной массы при обеспечении их необходимой прочности и жесткости. На основе многовариантных исследований выбраны типы сечений и материалы. По результатам исследования было установлено, что использование комбинированных материалов (алюминиевый сплав и композитный материал из углеродного волокна) для каркаса днища кузова с омегаобразным сечением дает наилучшие результаты по напряженно-деформированному состоянию и массе. При полученном оптимальном соотношении толщины алюминиевого сплава и углеродного волокна масса каркаса (днища) оказалась на 26 % меньше массы первоначальной конструкции, при этом напряженно-деформированное состояние и поведение конструкции в основном идентичны.

Ключевые слова: скоростная амфибийная машина, каркасные элементы, Star CCM+, взвешенный метод TOPSIS, комбинированный материал, омегаобразное сечение, соотношение толщины, уменьшение массы

Введение. При разработке амфибийных машин одна из главных задач — уменьшение массы кузова при обеспечении прочности и жесткости их конструкции [1]. Наряду с экстремальными режимами, такими как удар, опрокидывание и затопление, существует несколько основных режимов эксплуатации амфибийных машин: вход в воду, прямолинейное движение и повороты по спокойной воде, движение против и поперек волны, вывешивание колеса, движение по дорогам с синусоидальным и другими заданными профилями, а также по дороге со случайным профилем. По типу действия внешние нагрузки,

возникающие при эксплуатации, можно подразделить на давление на корпус и на нагрузки, вызывающие его кручение, изгиб и вибрацию. Рама в основном подвержена воздействию кручения, изгиба и вибраций, а панели кузова испытывают давление (изгиб) [2].

Оценка и создание оптимальных конструкций амфибийных машин с использованием объективных критериев — одна из сложнейших проблем в области оптимизации, так как для ее разрешения необходимо учитывать множество экстремальных режимов нагружения. Задача оптимизации заключается в том, чтобы уменьшить массу каркасов и панелей скоростных амфибийных машин, сохранив такие же прочность и жесткость кузова, как у исходной конструкции. Эта задача решается в два этапа: первый — поиск оптимальной силовой схемы, второй — оптимизация конструктивных параметров.

На первом этапе дискретны и относительно многочисленны такие параметры, как тип и материал панелей кузова, топология и материал каркаса, тип соединения каркаса с панелями, материал наполнителя, тип заполнения полостей и т. д. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) при выбранных внешних нагрузках проводится с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

На втором этапе варьируются разные параметры, в том числе соотношение толщины обшивки и сердцевины панелей кузова, параметры сечения каркаса, плотность материала наполнителя и т. д. Перед оптимизацией необходимо найти такие параметры, которые оказывают наибольшее влияние на НДС и массу конструкции. Как известно, процесс оптимизации является итерационным, поэтому он достаточно продолжительный. Кроме того, в задачах многокритериальной оптимизации скорость оптимизации и объективность критериев оценки зачастую вступают в противоречие. В связи с этим является актуальной разработка эффективных и объективных методов многокритериальной оптимизации.

Таким образом, одна из важнейших задач — обоснованный выбор рациональных параметров конечно-элементных моделей (КЭМ) объекта, обеспечивающих получение требуемой точности решения при минимальных затратах машинного времени.

Цель работы — поиск наилучших вариантов топологии каркасных элементов днища кузова скоростных амфибийных машин и снижение массы каркасов при сохранении таких же прочности и жесткости кузова, как у исходной конструкции на базе параметрической оптимизации.

Постановка задачи при воздействии давления. Основываясь на доступных данных скоростных амфибийных машин, полученных в результате проведенных исследований, в качестве прототипа была выбрана скоростная амфибийная машина Humdinga (рис. 1), имеющая

кузов длиной 7,012 м, шириной 2,304 м и массой 3200 кг. Каркас кузова изготовлен из алюминиевого сплава 5052, сэндвич-панели выполнены из пены ПВХ (Diab Divinycell H100), обшивка сделана из композитного материала — углеродного волокна CFRP (Epoch Carbon UD (230 GPa) Prepreg).

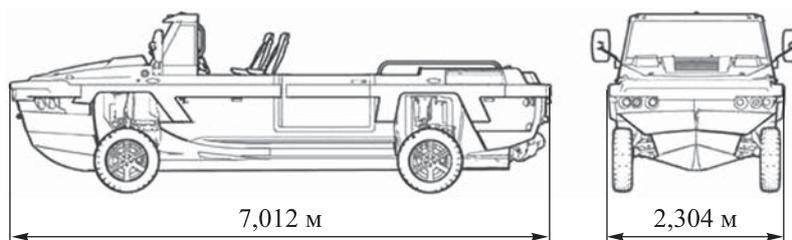


Рис. 1. Общий вид скоростной амфибийной машины Humdinga

В качестве объекта исследования было выбрано днище кузова как наиболее нагруженная часть конструкции при движении по воде на предельной скорости. По результатам предварительного исследования среди всех эксплуатационных режимов экстремальными для днища кузова являются вывешивание колеса (колес) и прямолинейное движение по спокойной воде. Из нагрузочных режимов, действующих на корпус, выбран как один из наиболее тяжелых — прямолинейное движение по воде с максимальной скоростью 50 км/ч. С помощью программного обеспечения для гидромеханического анализа Star CCM+ были получены значение и распределение внешних нагрузок на кузов. Положение кузова и распределение внешней нагрузки показаны на рис. 2. При этом определен угол наклона, составляющий около $5,5^\circ$. Внешние нагрузки в основном действуют на среднюю и заднюю части днища кузова, а также на подкрылки задних колес. Максимальное давление на днище кузова — 7885 Па, а на подкрылки задних колес — 80 521 Па.

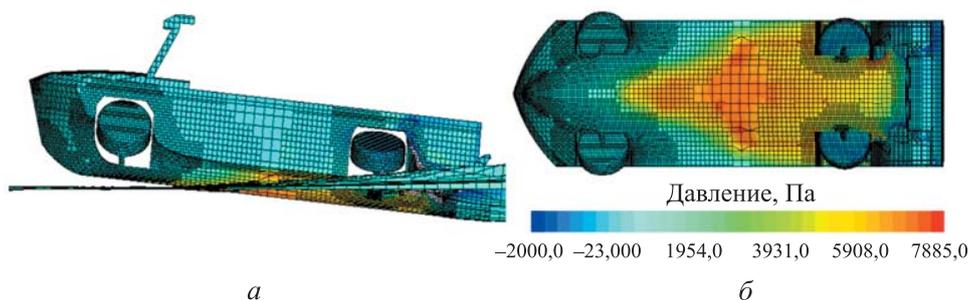


Рис. 2. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при прямолинейном движении со скоростью 50 км/ч

По результатам предварительного исследования при прямолинейном установившемся движении по спокойной воде нагрузки на корпус можно рассматривать как квазистатические. В программе статического анализа ANSYS панели, нижние и боковые элементы каркаса кузова моделируются двумерными конечными элементами (Shell181) с размерами сторон 20 мм. Остальные элементы каркаса моделируются одномерными конечными элементами (Beam188) длиной 10 мм. Конечные элементы 1D и 2D «соединены» контактом Bonded. На основе проведенного анализа были сформулированы два этапа получения оптимальной конструкции:

– исследование влияния конструктивных параметров на свойства каркаса с целью поиска рационального варианта и выявления факторов, наиболее существенно воздействующих на поведение конструкции;

– проведение поиска оптимального решения по расчетным параметрам в диапазоне их допустимых изменений для получения минимальной массы конструкции.

Постановка задачи поиска рациональных вариантов сечений каркасных элементов. Форма сечения, материал каркаса, распределение силовых (каркасных) элементов по корпусу и наполнитель — важные параметры, влияющие на прочность кузова. Основной задачей является объективная оценка НДС днища кузова с различными видами сечений каркасов на основе опыта проектирования и результатов предварительных исследований с целью выбора наилучших параметров. Были рассмотрены конструкции при разных видах формы сечения, материала каркаса и наполнителя.

Форма сечения. Одним из важных параметров каркаса кузова, которые влияют на жесткость и прочность конструкции, является форма сечения. Каркас обычно соединяется с панелями и остальными каркасными элементами сваркой, склеиванием, болтами и другими способами. По технологии соединения, будь то соединение между одним и тем же материалом (AL-AL, CFRP-CFRP) или соединение между различными материалами (AL-CFRP), соединительная часть обычно представляет собой плоскость для обеспечения прочности соединения. Поэтому существует относительно немного альтернативных форм поперечного сечения, включая Т-образное, двутавровое, Ω-образное, С-образное, Z-образное и L-образное [3]. Их выбор зависит от достигаемого максимального момента инерции изгиба, технологии и компоновки.

Для исследования выбраны формы сечений с учетом НДС днища кузова при прямолинейном движении амфибии с максимальной скоростью по спокойной воде. Формы сечений представлены на рис. 3, а их параметры приведены в табл. 1.

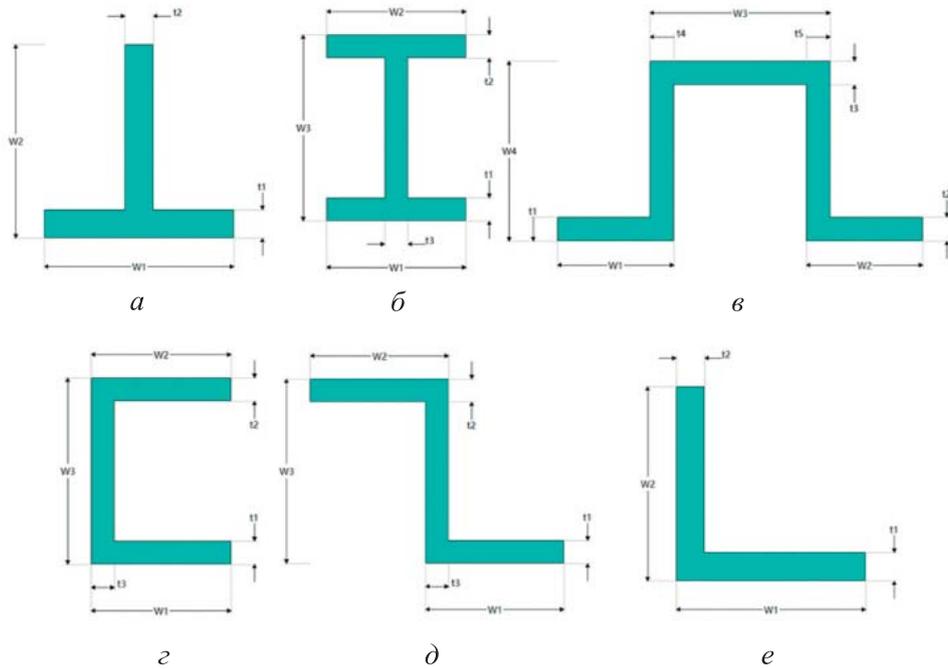


Рис. 3. Формы сечений

Таблица 1

Параметры сечений (см. рис. 3)

Форма сечения	Параметры
Т-образное (а)	$W_1 = 40$ мм, $W_2 = 41$ мм, $t_1 = t_2 = 6$ мм
Двутавровое (б)	$W_1 = W_2 = 30$ мм, $W_3 = 40$ мм, $t_1 = t_2 = 5$ мм
Ω-образное (в)	$W_1 = W_2 = 19,25$ мм, $W_3 = W_4 = 30$ мм, $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = 5$ мм
С-образное (г)	$W_1 = W_2 = 30$ мм, $W_3 = 40$ мм, $t_1 = t_2 = 5$ мм
З-образное (д)	$W_1 = W_2 = 30$ мм, $W_3 = 40$ мм, $t_1 = t_2 = 5$ мм
Л-образное (е)	$W_1 = W_2 = 30$ мм, $W_3 = 40$ мм, $t_1 = t_2 = 5$ мм

Основные параметры НДС днища кузова при давлении воды на скорости 50 км/ч даны в табл. 2, картина деформированного состояния днища кузова показана на рис. 4. Из анализа результатов следует, что НДС днища кузова с каркасом при неизменной топологии при Ω-образных сечениях меньше, чем при сечениях других видов, так как при данных размерах момент инерции сечения изгиба наибольший. Поэтому в дальнейшем будем применять именно Ω-образное сечение для каркасных элементов днища кузова при воздействии давления воды.

Основные параметры НДС днища кузова при движении по спокойной воде

Форма сечения (см. рис. 3)	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности
Т-образное (а)	1,0914	0,4280	3,1003	162,21
Двутавровое (б)	1,0937	0,4302	3,0686	162,13
Ω-образное (в)	1,0778	0,4226	3,0951	163,88
С-образное (г)	1,1042	0,4318	3,0751	162,12
Z-образное (д)	1,1032	0,4332	3,0903	161,20
L-образное (е)	1,0931	0,4274	3,1027	162,48

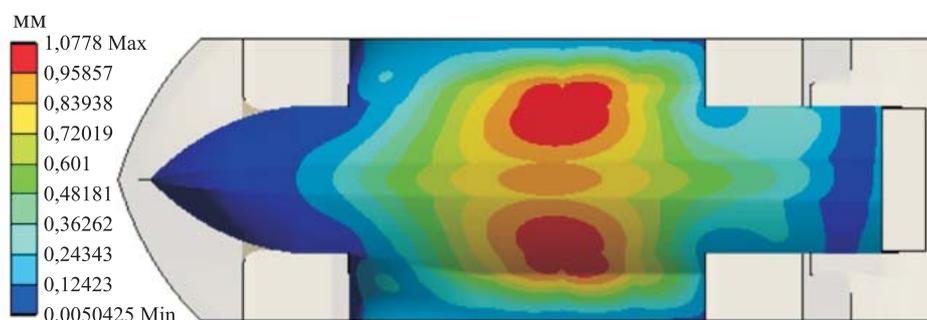


Рис. 4. Картина деформированного состояния днища кузова с Ω-образным сечением каркасных элементов

Материал каркаса. Алюминиевый сплав — один из наиболее распространенных материалов для изготовления каркаса кузова. Алюминиевые сплавы обладают высокой удельной прочностью и хорошей коррозионной стойкостью, и поэтому они с 1990-х годов широко используются в таких каркасных конструкциях, как рамы, бамперы и т. п. [4]. Со снижением стоимости композитного материала из углеродного волокна (CFRP) его стали считать одним из потенциально лучших для изготовления кузовов благодаря хорошей обрабатываемости, низкой плотности, высоким жесткости и прочности при статических и динамических нагрузках, а также устойчивости к суровым условиям эксплуатации. В XXI веке CFRP стали применять в конструкциях кузовов скоростных амфибийных машин, в частности, Hydra Spyder [5], Gibbs Quadski [6] и «Черный дрозд» [7], причем его доля в каркасных конструкциях постепенно возрастает.

Кроме того, результаты исследований, проведенных в последние годы, показали, что комбинированный материал (AL/CFRP) также следует считать перспективным. По сравнению с трубами из алюминия и углеродного волокна трубы равной массы из комбинированного

материала способны выдерживать большие нагрузки на изгиб [8]. Кроме того, при ударе скорость поглощения энергии комбинированными трубами выше, чем алюминиевыми и выполненными из углеродного волокна. Важно и то, что за счет оптимизации угла наклона углеродного волокна прочность трубы из комбинированного материала может быть дополнительно повышена [9]. Однако исследования этого материала еще продолжаются и пока их результаты не внедрены в реальные конструкции.

Следует отметить, что были проведены исследования каркасов не только с Ω -образным сечением, но и выполненных из алюминиевого сплава с коробчатым сечением, чтобы оценить влияние алюминиевой стенки. Сечения каркасов из материалов четырех типов показаны на рис. 5, толщина и состав стенки приведены в табл. 3. Масса каркасов из всех этих материалов одинакова.

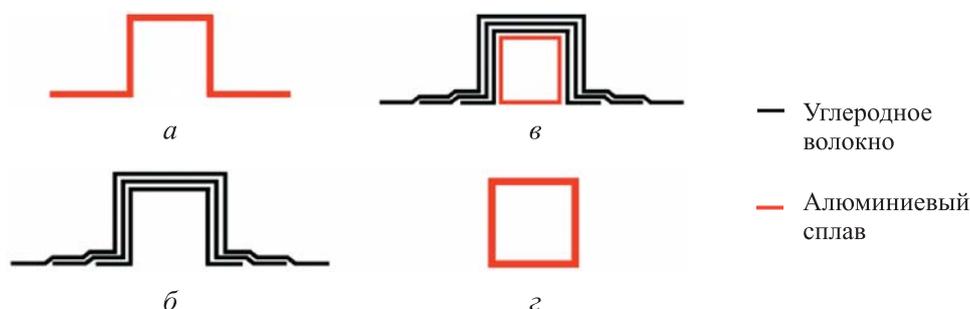


Рис. 5. Каркасы для днища кузова, изготовленные из алюминиевого сплава (Ω -образное сечение) (а), углеродного волокна (б), комбинированных материалов (в), алюминиевого сплава (коробчатое сечение) (г)

Таблица 3

Материал, состав и толщина стенки каркаса (см. рис. 5)

Материал (вид сечения)	Состав	Толщина, мм
AL (Ω -образное) (а)	Пластина из алюминиевого сплава толщиной 1 мм	1
Carbon (б)	3 слоя препрега из углеродного волокна, каждый толщиной 0,6 мм	1,8
AL/CFRP (в)	3 слоя препрега из углеродного волокна, каждый толщиной 0,3 мм и квадратная труба из алюминиевого сплава толщиной 0,625 мм	1,525
AL (коробчатое) (г)	Пластина из алюминиевого сплава толщиной 1,25 мм	1,25

При расчетном давлении воды основные параметры НДС днища кузова с каркасами из разных материалов и различных сечений приведены в табл. 4, а картина деформированного состояния днища

кузова представлена на рис. 6. Анализ полученных результатов решений привел к следующим выводам:

– комбинированный материал оказался лучшим для изготовления каркаса днища кузова, причем прочность такого каркаса при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч на 3 % выше, чем у каркаса из монолитного материала;

– преимущества комбинированных материалов в основном связаны с взаимодополняющими свойствами нескольких материалов.

Таблица 4

Основные параметры НДС каркаса днища кузова при движении по спокойной воде

Материал (сечение) (см. рис. 5)	Деформация, мм		Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности
	максимальная	средняя		
AL (Ω -образное) (а)	1,1540	0,4515	3,1102	111,53
Carbon (б)	1,1485	0,4475	3,0835	112,83
AL/CFRP (в)	1,1225	0,4380	3,0589	114,02
AL (коробчатое) (г)	1,1440	0,4471	3,0784	111,44

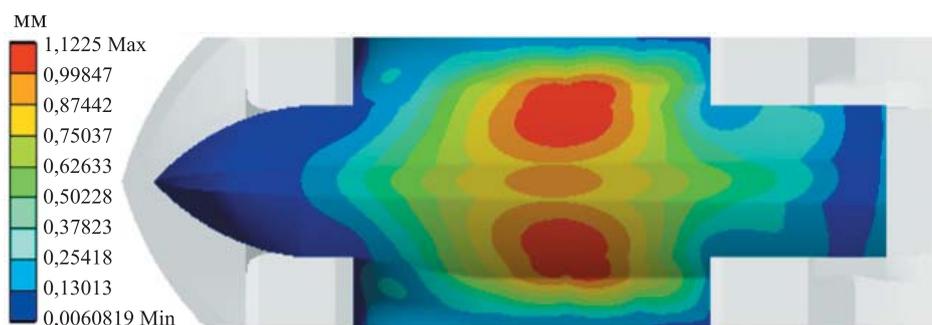


Рис. 6. Картина деформированного состояния днища кузова с каркасом из комбинированного материала

Наполнитель каркаса. Было также оценено влияние разных наполнителей на НДС днища кузова, потому что в случае применения элементов из композитных материалов зачастую используется наполнитель внутри замкнутых полостей каркаса. При этом возникают три главные проблемы: материал наполнителя, тип заполнения и необходимость заполнения. Для композитов из углеродного волокна наиболее распространенным наполнителем является пена ПВХ [10], а для алюминиевых сплавов — пеноалюминий [11]. Оба эти наполнителя — пористые материалы, у которых размер и плотность пор непосредственно влияют на свойства материала. В работах [10, 12] плотность пены ПВХ варьировалась от 45 до 250 кг/м³, а плотность пеноалюминия — от 50 до 800 кг/м³.

Поскольку плотность наполнителя может быть разной, были рассмотрены два варианта: полость каркаса полностью заполнена, полость частично заполнена (каркасный элемент с двойными стенками), как показано на рис. 7. Масса каркаса при этих двух вариантах одинакова, примеры их использования применительно к задачам оптимизации бампера легкового автомобиля приведены в [13].

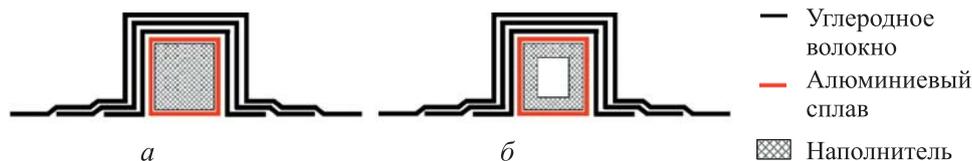


Рис. 7. Каркас полностью заполненный (а) и частично заполненный (б)

Для того чтобы исследовать необходимость использования наполнителя, были добавлены две дополнительные схемы. Толщина каркаса и высота сечения были увеличены, чтобы масса каркаса без наполнителя соответствовала массе каркаса с наполнителем. Свойства материала наполнителя приведены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства материала наполнителей

Название	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , МПа	Предел прочности σ_T , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Пена ПВХ (Н100) [10]	100	130	3,5	0,4
Пена ПВХ (Н250) [10]	250	320	9,2	0,4
Пеноалюминий Alporas 100 [12]	100	824	1,9	0,34
Пеноалюминий Alporas 250 [12]	250	1000	1,9	0,34

Для движения по воде на максимальной скорости основные параметры НДС днища кузова даны в табл. 6, картины деформированного состояния днища кузова с каркасом с увеличенной толщиной и с каркасом с сечением большего размера представлены на рис. 8. Анализ результатов расчетов для прямолинейного движения амфибии по воде со скоростью 50 км/ч выявил следующее:

– увеличение толщины каркаса повышает прочность днища кузова в среднем до 2,6 %, при этом деформация днища кузова снижается в среднем на 2,6 %, напряжение уменьшается на 2 %, запас прочности увеличивается на 2,1 % по сравнению с соответствующими параметрами конструкции без наполнителя;

– увеличение высоты сечения каркаса повышает прочность днища кузова в среднем на 12 %, а также деформация днища кузова

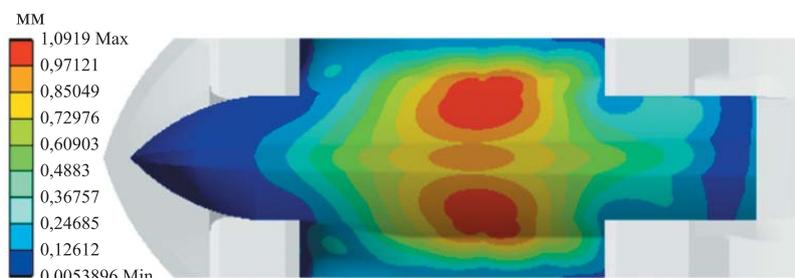
снижается в среднем на 12 %, напряжение уменьшается на 8,5 % и запас прочности увеличивается на 9,5 % по сравнению с соответствующими параметрами конструкции без наполнителя;

– использование наполнителя в рассматриваемом случае нецелесообразно, так как увеличение толщины каркаса и изменение размера его сечения являются более эффективными, удобными и дешевыми способами повышения прочности конструкции.

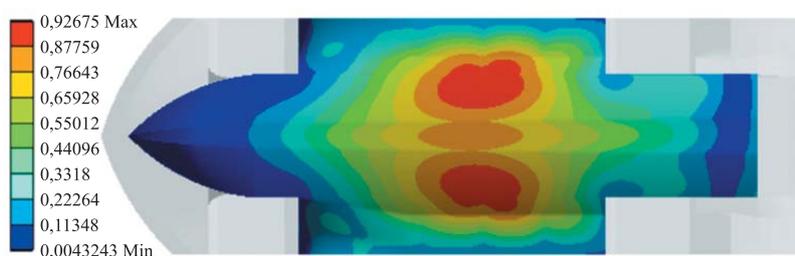
Таблица 6

Основные параметры НДС днища кузова при движении по спокойной воде

Материал наполнителя	Тип заполнения	Материал каркаса	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности
Нет	Нет	AL/CFRP	1,1225	0,4380	3,0589	114,02
ПВХ (Н100)	Полностью	AL/CFRP	1,1160	0,4355	3,0447	114,47
ПВХ (Н250)	Частично	AL/CFRP	1,1176	0,4364	3,0488	114,29
Пеноалюминий (Alporas100)	Полностью	AL/CFRP	1,1010	0,4297	3,0135	115,68
Пеноалюминий (Alporas250)	Частично	AL/CFRP	1,1122	0,4344	3,0372	114,74
Нет	Нет	AL/CFRP (с увеличенной толщиной)	1,0940	0,4277	2,9975	116,36
Нет	Нет	AL/CFRP (с большим размером сечения)	0,9868	0,3904	2,7977	124,80



а



б

Рис. 8. Картины деформированного состояния днища кузова с каркасами (а) увеличенной толщины и (б) большего размера

Постановка задачи оптимизации. Для снижения массы каркаса необходимо сначала определить его оптимальные параметры (топология, форма и размеры сечения, материал), а затем снизить массу путем уменьшения толщины. Из анализа приведенных ранее результатов исследований выбраны два основных параметра: соотношение толщины AL/CFRP комбинированного материала и соотношение высоты и ширины сечения каркаса (рис. 9). На данном этапе работы рассматривается только оптимизация соотношения толщины AL/CFRP. В дальнейшем также будет выполнена оптимизация топологии, соотношений высоты и ширины сечений каркаса и др.

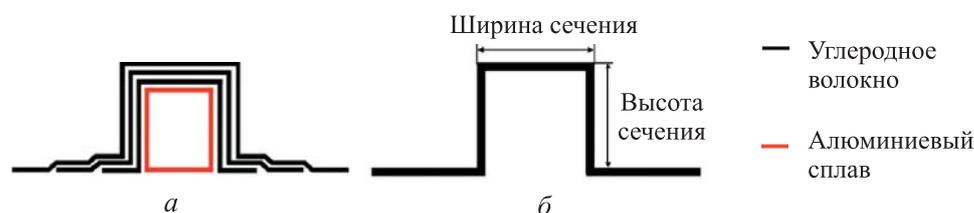


Рис. 9. Параметры оптимизации:

a — соотношение AL/CFRP (толщины AL и толщины углеродного волокна, равной толщине трех слоев этого волокна); *б* — соотношение высоты и ширины сечения каркаса

Для выполнения поставленной задачи проведен предварительный анализ корреляции между НДС и соотношением толщины AL/CFRP. В соответствии с современной технологией изготовления композитных материалов из углеродного волокна минимальная толщина препрега составляет около 0,1...0,2 мм [14]. Исходя из технологических ограничений толщины самого тонкого препрега из углеродного волокна, который только можно изготовить, диапазон соотношения толщины AL/CFRP составляет 0–2. Корреляция между НДС и соотношением толщины AL/CFRP в этом диапазоне представлена на рис. 10.

По результатам расчетов можно сделать такие выводы:

– зависимость НДС от соотношения толщины CFRP/AL нелинейная;

– экстремальные значения НДС соответствуют разным соотношениям толщины: максимальная деформация кузова достигает наименьшего значения при соотношении толщины, равном 0,59, средняя — при соотношении толщины, равном 0,55; среднее напряжение кузова имеет минимальное значение при соотношении толщины, равном 0,65; средний запас прочности кузова достигает максимального значения при соотношении толщины, равном 0,37.

Следует отметить, что необходимо комплексно учитывать влияние множества показателей и находить оптимальное решение по объективным критериям оценки, что накладывает дополнительные требования к параметрам оптимизации. В настоящее время распространенными методами многокритериальной оптимизации являются прямой метод и

метод поверхности отклика (оба реализованы в ANSYS). Однако машинное время при их использовании достаточно велико, а объективность и достоверность результатов нередко невысоки при многоцелевой функции. Кроме того, эффективными и надежными являются многокритериальные методы принятия решений (ММПП), среди которых ведущее место занимает взвешенный метод TOPSIS [15]. С целью сокращения машинного времени при обеспечении точности результатов был разработан подход, позволивший усовершенствовать этот метод TOPSIS оптимизации параметров [16].

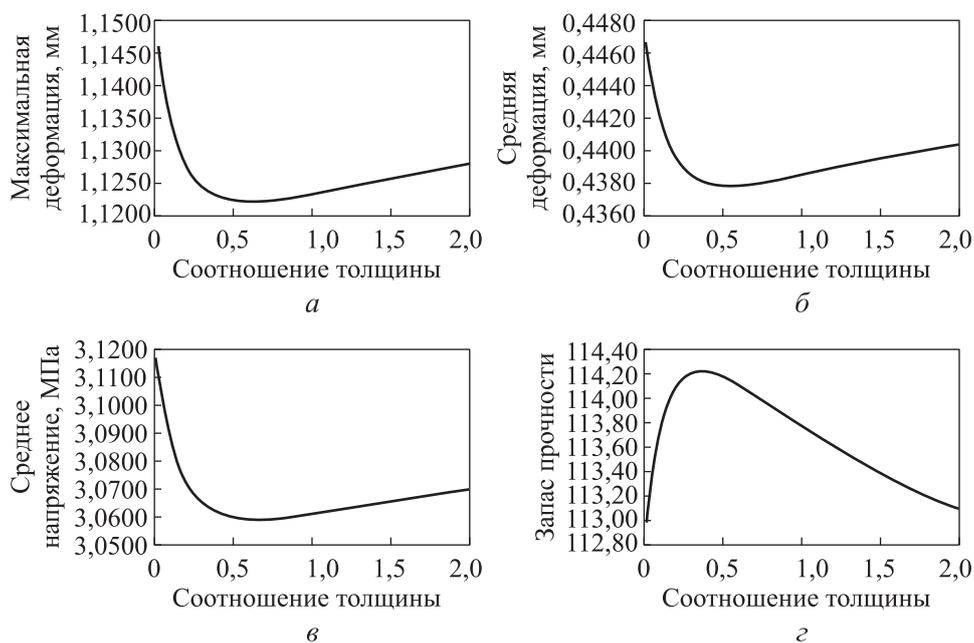


Рис. 10. Графики зависимости между максимальной (а), средней (б) деформациями, средним напряжением (в), запасом прочности (г) и соотношением толщин AL/CFRP

Оптимизация заключается в том, чтобы сначала найти оптимальное соотношение толщины AL/CFRP, а уже потом уменьшить массу каркаса при сохранении полученной пропорции. С целью сокращения машинного времени поиск оптимальных параметров осуществлен для нагрузки давлением при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч с помощью метода параметрической оптимизации на основе разработанного усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS. В этой работе соотношение толщины AL/CFRP варьировалось от 0 до 2 с точностью до 0,01. Затраченное машинное время на оптимизацию составило 3 ч. При оптимальном соотношении толщины масса каркаса снижается за счет уменьшения толщины стенки. НДС днища кузова должно быть в основном таким же, как и у исходной конструкции (не хуже). Результаты оптимизации приведены в табл. 7.

При поиске оптимального соотношения AL/CFRP целевые функции: минимальная деформация днища кузова, минимальное напряжение днища кузова, максимальный запас прочности днища кузова; **ограничения:** постоянная масса каркаса (днища).

При снижении массы каркаса днища целевая функция: минимальная масса каркаса (днища); **ограничения:** соотношение толщины AL/CFRP = 0,49; деформация $\Delta \leq \Delta_{\text{исходной}}$, напряжение $\sigma \leq \sigma_{\text{исходного}}$.

Таблица 7

Основные параметры НДС днища кузова при движении по спокойной воде

Толщина AL, мм	Толщина слоя CFRP, мм	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности	Масса каркаса (днище), кг
1	Нет	1,1540	0,4515	3,1102	111,53	16,04
0,3822	0,26	1,1541	0,4499	3,1282	111,35	11,85

По результатам расчетов были получены оптимальное соотношение толщины AL/CFRP, составляющее 0,49, масса каркаса (днища), равная 11,85 кг, что меньше массы первоначальной конструкции (16,04 кг) на 26 %, при этом НДС и поведение конструкции в основном идентичны.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали, что использование комбинированного материала для каркаса днища кузова при давлении воды при движении со скоростью 50 км/ч дает наилучшие результаты по НДС и массе. Кроме того, было установлено, что при поиске оптимального соотношения толщины AL/CFRP целесообразно применять метод параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, который позволяет избежать влияния количества целевых функций на объективность и достоверность результатов оптимизации при сокращении машинного времени. Следует также отметить, что полученная в результате параметрической оптимизации модель имеет массу на 26 % меньше, чем у исходной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Степанов А.П. *Проектирование амфибийных машин*. Москва, Изд-во Мегалион, 2007, 420 с.
- [2] Ван И., Зузов В.Н. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2023, № 4, с. 82–96.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82
- [3] Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. *Проектирование полноприводных колесных машин. В 3 т.* Полунгян А.А., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 432 с.

- [4] Roth R., Clark J., Kelkar A. Automobile bodies: can aluminum be an economical alternative to steel? *Jom*, 2001, vol. 53, pp. 28–32.
DOI: 10.1007/s11837-001-0131-7
- [5] *Hydra Spyder: A high speed & high-performance amphibious sports vehicle*. URL: <https://camille.com/hydraspyder> (дата обращения: 05.10.2023).
- [6] Goldsmith, P. *Serious Fun: The Life and Times of Alan Gibbs*. М., Penguin Random House New Zealand Limited, 2012, 358 с.
- [7] Черный дрозд: амфибия будущего на выставке Армия-2020. *Autoreview* URL: <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/chernyy-drozd-amfibiya-buduschego-na-vystavke-armiya-2020> (дата обращения: 27.01.2024).
- [8] Huang Z., Li Y., Zhang X., Chen W., Fang D. A comparative study on the energy absorption mechanism of aluminum/CFRP hybrid beams under quasi-static and dynamic bending. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 163, pp. 1–14.
DOI: 10.1016/j.tws.2021.107772
- [9] Lee S.H., Kim C.W., Choi N.S. Bending collapse behaviors and energy absorption characteristics of aluminum-GFRP hybrid tube beams. *Key engineering materials*, 2006, vol. 326, pp. 1825–1828.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.1825
- [10] *Divinycell H — Excellent mechanical properties to low weight*. URL: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (дата обращения: 01.12.2023).
- [11] Ashby M.F., Evans A., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., Delale F. Metal foams: a design guide. *Applied Mechanics Reviews*, 2001, vol. 54, pp. B105–B106. DOI: 10.1115/1.1421119
- [12] Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283.
DOI: 10.1016/S0022-5096(99)00082-4
- [13] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева*, 2018, № 3, с. 130–136.
- [14] High-end carbon fiber composite material solution provider. *Aosheng Technology* URL: <https://www.aosheng-china.com/product/224.html> (дата обращения: 27.01.2024).
- [15] Hwang C.L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 1981, pp. 58–191. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9_3
- [16] Ван И., Зузов В.Н. Метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 1.
DOI: 10.18698/2308-6033-2024-1-2329

Статья поступила в редакцию 26.02.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ван И., Зузов В.Н., Иваненков В.В. Особенности поиска, выполняемого на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, оптимальных конструктивных параметров каркасных элементов скоростных амфибийных машин при движении по воде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-3-2341>

Ван Ичжоу — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: scott_bah@hotmail.com

Зузов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области исследования несущих систем колесных машин. e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Иваненков Вячеслав Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 36 научных работ в области робототехники и электропривода. e-mail: robot@sm.bmstu.ru

Features of the search for optimal design parameters for the frame of high-speed amphibious vehicles when moving on water through parametric optimization based on the improved weighted TOPSIS method

© Y. Wang, V.N. Zuzov, V.V. Ivanenkov

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

The study aimed to decrease the mass of high-speed amphibious vehicle frames without compromising their strength and rigidity. The study performed evaluation and selection of loading modes to optimize subsequent parametric optimization. The load obtained during straight-line movement through the water at the maximum speed of 50 km/h was analyzed for parametric optimization. The research examined the influence of design parameters, such as section shape, frame material, and filler, on the frame's properties to identify a rational option and determine the factors with the greatest influence on structure behavior for subsequent optimization consideration. The optimization aimed to identify parameters that would minimize frame mass. The incorporation of hybrid material (AL/CFRP) with omega cross-section into the bottom frame produced superior structural response and mass outcomes. Through an optimization process involving the ratio of aluminum alloy thickness and carbon fiber, the mass of the bottom frame can be reduced 26% without compromising identical levels of deformation and stress. The present study provides a starting-point for further research in the optimal design parameters for the frame of high-speed amphibious vehicles. From a lightweight design perspective, the frame has been proven to help reduce weight while maintaining the strength and stiffness of the high-speed amphibious vehicle underbody.

Keywords: high-speed amphibious vehicle, frame, Star CCM+, weighted TOPSIS method, hybrid material, omega section, thickness ratio, mass reduction

REFERENCES

- [1] Stepanov A.P. *Proektirovanie amfibiynykh mashin* [Design of amphibious vehicles]. Moscow, Megalion Publ., 2007, 420 p.
- [2] Wang Y., Zuzov V.N. K voprosu o nakhozhdenii ekstremalnykh rezhimov nagruzheniy amfibiynykh mashin pri ekspluatatsii v vodnoy srede [Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2023, no. 4, pp. 82–96. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_82
- [3] Afanasyev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Design of all-wheel drive wheeled vehicles]. In 3 volumes. Polungyan A.A., ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 432 p.
- [4] Roth R., Clark J., Kelkar A. Automobile bodies: can aluminum be an economical alternative to steel? *Jom*, 2001, vol. 53, pp. 28–32. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0131-7>
- [5] *Hydra Spyder: A high speed & high-performance amphibious sports vehicle*. Available at: <https://camille.com/hydraspyder> (accessed October 5, 2023).
- [6] Goldsmith P. *Serious Fun: The Life and Times of Alan Gibbs*. M., Penguin Random House New Zealand Limited, 2012, 358 p.

- [7] Chernyy drozd: amfibiya budushego na vystavke Armiya 2020 [Blackbird: amphibian of the future at the Army 2020 exhibition]. *Autoreview* Available at: <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/chernyy-drozd-amfibiya-budushego-na-vystavke-armiya-2020> (accessed January 1, 2024).
- [8] Huang Z., Li Y., Zhang X., Chen W., Fang D. A comparative study on the energy absorption mechanism of aluminum/CFRP hybrid beams under quasi-static and dynamic bending. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 163, pp. 1–14. <https://10.1016/j.tws.2021.107772>
- [9] Lee S.H., Kim C.W., Choi N.S. Bending collapse behaviors and energy absorption characteristics of aluminum-GFRP hybrid tube beams. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 326. pp. 1825–1828. <https://10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.1825>
- [10] Divinycell H. *Excellent mechanical properties to low weight*. Available at: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (accessed January 12, 2023).
- [11] Ashby M.F., Evans A., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., Delale F. Metal foams: a design guide. *Applied Mechanics Reviews*, 2001, vol. 54, pp. B105–B106. <https://doi.org/10.1115/1.1421119>
- [12] Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283. [https://10.1016/S0022-5096\(99\)00082-4](https://10.1016/S0022-5096(99)00082-4)
- [13] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Problemy poiska optimalnykh konstruktivnykh parametrov bampera avtomobilya pri udarnom vozdeystvii s pozitsii passivnoy bezopasnosti [Crashworthiness design for foam-filled bumper beam]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2018, no. 3, pp. 130–136.
- [14] High-end carbon fiber composite material solution provider. *Aosheng Technology* Available at: <https://www.aosheng-china.com/product/224.html> (accessed January 27, 2024).
- [15] Hwang C.L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 1981, pp. 58–191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- [16] Wang Y., Zuzov V.N. Metod mnogokriterialnoy parametricheskoy optimizatsii na osnove usovershenstvovannogo vzveshennogo metoda TOPSIS primenitelno k karkasno-obolocheynym nesushchim konstruktsiyam [Multicriteria parametric optimization method for skinned-frame structures based on enhanced weighted TOPSIS method]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 1. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-1-2329>

Wang Yizhou, Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: scott_bah@hotmail.com

Zuzov V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 70 scientific papers in studying load-bearing systems of the wheeled vehicles. e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Ivanenkov V.V., Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University; author of 36 scientific papers in robotics and electric drives. e-mail: robot@sm.bmstu.ru