

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.202>

Стеклопластики как альтернатива металлам в судоремонте

Е.Г. Бурмистров¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>

Т.А. Михеева¹

¹*Волжский государственный университет водного транспорта
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье приводятся промежуточные результаты исследования, выполняемого с целью определения перспектив снижения металлоёмкости судоремонта. Областью исследования является судоремонт, в частности, ремонт корпусов и надстроек металлических судов, а объектом – применяемые при ремонте стеклопластики, их прочность и долговечность. Исследования выполнялись с применением известных методов – самопроизвольного отслаивания, среза, предельных состояний. Полученные результаты позволили установить, что применение стеклопластиков позволяет снизить металлоёмкость ремонта судов в три раза. Кроме того, в статье излагается методика расчёта толщины стеклопластикового покрытия, равноценного по прочности металлическому дублёру, а также приводятся выражения для оценки расчётного сопротивления покрытия, определяющего его долговечность. В заключение сделан вывод о необходимости расширения зоны исследования применимости стеклопластиков при ремонте судов, не ограничивая её только такими очевидными объектами ремонта как корпус, надстройка, трубопроводы.

Ключевые слова: судоремонт, металлоёмкость, стеклопластик, адгезия, когезия, прочность клеевого соединения.

Fiberglass as an alternative to metals in ship repair

Evgeniy G. Burmistrov¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>

Tatiana A. Mikheeva¹

¹*Volga State University of Water Transport, Russia*

Abstract. The article presents the intermediate results of a research carried out to determine the prospects for reducing the metal consumption of ship repair. The area of research is ship repair, in particular, the repair of hulls and superstructures of metal ships, and the object is fiberglass used in the repair, in particular, their strength and durability. The studies were carried out using well-known methods - spontaneous peeling, shearing, limiting states. The results obtained made it possible to establish that the use of fiberglass plastics can reduce the metal consumption of ship repairs by three times. In addition, the article describes the method for calculating the thickness of a fiberglass coating, which is equivalent in strength to a metal backup, and also provides expressions for evaluating the calculated resistance of the coating, which determines its durability. In conclusion, it was concluded that it is necessary

to expand the study area of the applicability of fiberglass during the repair of ships, not limiting it only to such obvious objects of repair as the hull, superstructure, and pipelines.

Keywords: ship repair; metal consumption; fiberglass; adhesion; cohesion; strength of adhesive joint

Введение

В процессе эксплуатации речные и морские суда получают различные повреждения. Это может происходить при погрузо-разгрузочных работах, швартовных операциях, посадке на мель, усталости металла при длительном сроке эксплуатации и т.п. [1]. При этом повреждения получает не только металлический корпус судна, но и стенки надстроек, рубок, элементы движительно-рулевого комплекса (ДРК), трубопроводы, детали и узлы различных механизмов.

В настоящее время на судоремонтных предприятиях восстановление повреждённых при эксплуатации корпусов и иных элементов судов в основном осуществляется с применением металла (сталь, сплавы на основе алюминия). Значительно реже используются альтернативные материалы: древесина, железобетон, пластмассы. Однако в связи со значительным подорожанием на мировых рынках металла, а также в связи с высокой материалоемкостью судоремонта, в мире активизировались поиски более дешёвых и в то же время сопоставимых по характеристикам прочности, надёжности, долговечности заменителей. В качестве одного из таких заменителей рассматриваются стеклопластики, которые представляют собой самостоятельную группу полимеров сложной композиции (смола с различными добавками и армирующий материал). Благодаря ряду характерных только для стеклопластиков свойств, в частности возможности варьирования в широком диапазоне соотношения клеевой композиции и наполнителя, можно получать значительно различающиеся по техническим характеристикам материалы и создавать изделия под конкретные задачи [2, 3]. Именно это свойство делает стеклопластики весьма перспективными для применения в судоремонте.

Стеклопластиковые дублёры характеризуются: отличными антикоррозионными свойствами, хорошей стойкостью против химических, электрохимических и биологических разрушений; инертностью к воздействию ультрафиолетовых лучей, высокой влажности, атмосферным осадкам. Кроме того, стеклопластики имеют значительно меньшую плотность и массу и при этом прочность на уровне высококачественных конструкционных сталей. Коридор температур эксплуатации составляет от -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Уникальные физические свойства, как то: электроизолирующая способность, низкие влагопоглощение, коэффициент теплового расширения, теплоёмкость и теплопроводность, относительная низкая, по сравнению со сталью, стоимость производства, делают стеклопластики достойной альтернативой металлам. Несмотря на наличие некоторых недостатков (низкий модуль упругости, слабая износостойкость, снижение прочности со временем и возникновение деформаций), в настоящее время стеклопластик можно считать материалом, в котором хорошо сочетаются высокие технологические и прочностные качества и доступная цена [4].

Методы

Исследование применимости стеклопластиков в судоремонте проводится на базе кафедры проектирования и технологии постройки судов с конца 1980-х гг. по настоящее время. За этот период накоплена обширная статистическая база не только по объектам ремонта на судах с применением стеклопластиков, но и по работоспособности в различных эксплуатационных условиях (то есть надёжности и долговечности). Поскольку в судоремонте в указанный период использовались в

основном стеклопластики на основе многокомпонентных клеевых составов советского, а затем и российского производства серии «Спрут» со стандартными техническими характеристиками, соответствующими патенту SU 668334 и РД 39-30-968-83, полученная статистика характеризует эту группу стеклопластиков как наиболее востребованную.

Целью исследований является оценка перспектив снижения металлоёмкости судоремонта за счёт расширения применения стеклопластиков для восстановления характеристик и свойств объектов ремонта на современных судах (корпус, надстройки, ДРК, трубопроводы и т.д.).

В исследовании задействованы различные теоретические и экспериментальные методы. В частности, адгезионная прочность стеклопластиковых композиций определялась методом самопроизвольного отслаивания и методом среза с учётом результатов исследований межфазной прочности композитов, выполненных Б. Махато, В. Бабаринде, С. Абаимова и др. [5-7], а также по методу предельных состояний. С целью сравнения в табл. 1 представлены основные характеристики альтернативных материалов, применяемых в судоремонте.

Таблица 1

Характеристики материалов для судоремонта

Наименование характеристики	Армированный стеклопластик	Пластмассы	Углеродистая сталь	Алюминиево-магние-вые сплавы	Материалы на основе древесины
Плотность, т/м ³	1,6...2,0	1,4	7,8	2,7	0,5...0,6
Предел прочности при изгибе, МН/м ²	690...1240	80...110	400	275	48,5...68,0
Разрушающее напряжение (изгиб), МПа	690...1240	80...110	400	275	48,5...68,0
Разрушающее напряжение (растяжении/сжатие), МПа	410...1180	41...48	410...480	80...430	20,8...87,8
Модуль упругости, ГПа	21...41	2,8	210	70	8,7...10,3
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,30...0,35	0,3	46	140...190	0,26...0,28
Коэффициент расширения, 10 ⁻⁶ м С ⁻¹	5...14	57...75	11...14	2,2...2,3	29,7...31,3

Плотность и масса стеклопластикового композита определяется объёмом армирования и применяемым для этого материалом. В среднем она составляет 1,6...2,0 т/м³. Анализ табл. 1 показывает, что стеклопластик примерно в 5 раз легче стали и примерно в 2 раза легче алюминиевых сплавов. При этом предел его прочности существенно ниже, чем у стали, но и удельная прочность заметно выше. То есть, известный из работ [1-8] и исследований других авторов тезис о превосходстве современных композиционных материалов над традиционными конструкционными по многим параметрам, находит своё подтверждение.

В условиях серьёзной конкуренции на мировом рынке судоремонтных услуг весьма остро стоит вопрос о сокращении сроков ремонта судов. Как показывают исследования авторов, а также результаты, представленные в работе [9], применение стеклопластиков может способствовать решению и этой задачи. То есть, в конечном счёте, повысить экономическую эффективность судоремонта.

Одной из важнейших проблем при эксплуатации судов является повышенный коррозионный износ конструкций их корпусов и надстроек, так как они непрерывно подвергаются повышенному агрессивному воздействию окружающей среды. Возникновение и интенсивность коррозии обусловлены многими факторами и хорошо описаны, например, в работе [10]. В практике судоремонта выделяют

несколько видов коррозии (см. рис. 1). Обычно коррозия на связях корпуса распределена более или менее равномерно по всей поверхности связи. Однако часто встречаются и случаи коррозии пятнами или в виде язв.

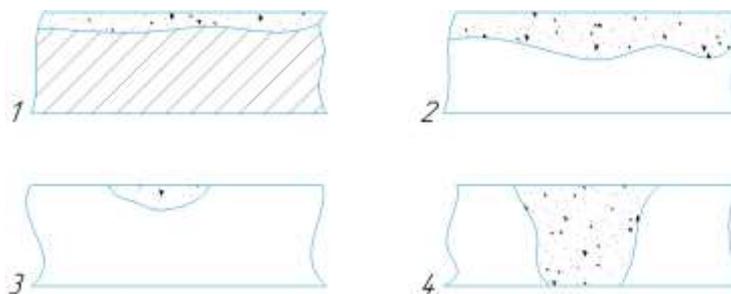


Рис. 1. Виды коррозии: 1 – равномерная; 2 – неравномерная; 3 – пятнами; 4 – сквозная

Fig. 1. Types of corrosion: 1 - uniform; 2 - uneven; 3 - spots; 4 – through

Показательными в этом отношении являются результаты обследования корпусов пассажирских теплоходов «Денис Давыдов», «Александр Невский», «Лев Толстой» (пр. 508), «Пётр Андрианов» (пр. 80) и др. Данные дефектации показали, что корпусные конструкции, в частности, открытые палубы указанных теплоходов, характеризуются всеми возможными видами коррозионных разрушений [10]. Для металлических палуб этих судов, при непосредственном участии авторов, была разработана технология их ремонта с помощью стеклопластика на основе клеевой композиции «Спрут-9М». Технология, в целом, предполагает выполнение традиционных технологических операций от специальной подготовки поверхности до финишной обработки. Принципиально важным здесь является толщина наносимого клеевого слоя. При равномерном износе она должна быть не более 1 мм. В других случаях толщина клеевого слоя от 1,5 до 5 раз больше, особенно во впадинах. При коррозионном износе 5...10% по слою клея прикатывается слой стеклоткани (см. рис. 2). В местах сквозной коррозии, а также при наличии коррозии 10...25 % по слоям клея прикатываются два и более слоя стеклоткани, в зависимости от степени повреждения (см. рис. 3). На участки со сквозной коррозией на стеклотканевый дублёр по прошествии суток имеет смысл нанесение специального шпатлёвочного состава (пасты) на основе той же клеевой композиции «Спрут-9М».

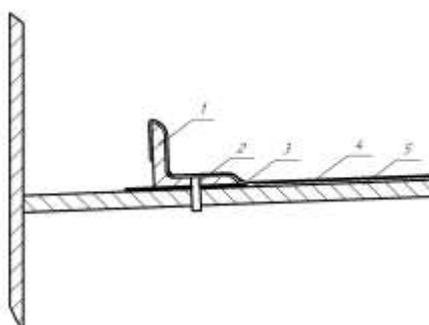


Рис. 2. Схема ремонта палубы (износ 5-10%) в районе ватервейса с одинарным слоем стеклоткани: 1 – ватервейс в виде угольника; 2 – крепёжный винт; 3 – клеевой слой; 4 – слой стеклоткани; 5 – палуба

Fig. 2. Deck repair scheme (5-10% wear) in the waterway area with a single layer of fiberglass:
1 - waterway in the form of a square; 2 - fixing screw; 3 - adhesive layer; 4 - a layer of fiberglass; 5 – deck



Рис. 3. Схема ремонта палубы с двойным слоем стеклоткани при сквозной коррозии между ватервейсом и стенкой надстройки:

1 – ватервейс в виде полосы; 2 – слои стеклоткани; 3 – дублирующая тонколистовая металлическая накладка; 4 – шпатлёвка; 5 – палуба

Fig. 3. Scheme of the deck repair with a double layer of glass panes in case of through corrosion between the waterway and the superstructure wall: 1 - waterway in the form of a strip; 2 - layers of fiberglass; 3 - duplicating thin-sheet metal plate; 4 - putty; 5 - deck

Для расчёта толщины стеклотканевого дублёра использовали формулу:

$$\delta_n = \frac{m}{S \cdot \rho_{ст} \cdot k_{пр}}, \quad \text{м}, \quad (1)$$

Где m – масса клеевой композиции, кг;

S – площадь ремонтируемого участка (площадь стеклопластикового дублёра), м^2 ;

$\rho_{ст}$ – плотность армирующего материала (стеклоткани), $\text{кг}/\text{м}^3$;

$k_{пр}$ – коэффициент пропитки армирующего материала клеевой композицией ($k_{пр}=0,8...1,0$).

Причём $\delta_n \geq \delta_{ст}$, где $\delta_{ст}$ – толщина армирующего материала.

Перепуск накладки от границы сквозной коррозии должен быть более 70...75 мм.

Для расчёта толщины накладки (дублёра) (δ_d) использовали выражение:

$$\delta_d = k_{проч} \cdot (h - h'), \quad \text{м}, \quad (2)$$

Где $k_{проч}$ – коэффициент прочности, определённый эмпирическим путём ($k_{проч}=1,0...1,3$);

h – проектная толщина ремонтируемой связи, мм;

h' – минимально допустимая остаточная толщина связи, мм.

Проведённые авторами сравнительные испытания клеестеклотканевого и клеёметаллического экспериментальных соединений показали: а) прочностные характеристики обоих вариантов достаточны для сохранения прочности отремонтированной локальной поверхности корпусных конструкций; б) толщины стеклотканевого покрытия и металлического дублёра, рассчитанные по формулам (1) и (2), адекватны требованиям обеспечения локальной прочности; в) клеевые композиции, использованные в обоих вариантах, могут отличаться неоднородностью, что может сказываться на их свойствах, в частности, на образовании дефектов. Последнее, по-видимому, обусловлено тем, что многокомпонентные клеевые составы представляют собой гетерогенные системы, свойства компонентов в которых существенно различны [11].

Одним из наиболее характерных для стеклопластиков дефектов являются трещины. Авторами установлено, что трещина, начиная с момента зарождения, может либо расти с постоянной скоростью, либо увеличиваться с ускорением, либо её рост может замедляться вплоть до полной остановки даже при стабильной нагрузке. Из источников [9, 11] известно, что прочность клеевого соединения определяется адгезионными и когезионными связями. Разрушения классифицируются, соответственно, как адгезионные (в клеевой композиции) и когезионные (в материале основы) и их соотношение в соединении будет определять вид разрушения [12].

Практика показывает, что разрушение стеклопластикового дублёра, как правило, начинается с пограничного слоя. Поэтому при анализе качества этих соединений необходимо учитывать так называемые «взаимосвязи Бикермана». В целом они описываются зависимостью следующего вида:

$$K = (\alpha \cdot f + \sigma_{\text{вн}}) \cdot \beta, \quad \text{МПа}, \quad (3)$$

где K – когезия (когезионная прочность соединения);

f – молекулярная прочность соединения, МПа;

$\delta_{\text{вн}}$ – внутренние (разрушающие) напряжения, МПа;

α – коэффициент разности механических свойств клея и материала основы (субстрата);

β – коэффициент структурной неоднородности клеевой композиции.

Как показывают результаты исследований авторов, данное уравнение не учитывает изменение структуры клеевой композиции в процессе её полимеризации. А именно это, на наш взгляд, определяет появление в ней внутренних напряжений. С учётом этого обстоятельства зависимость (3) корректнее представить следующим образом:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{K}{\beta} - \sigma_{\text{п}} \right), \quad \text{МПа}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – потенциальные напряжения, МПа:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{E(\delta_0 - \delta_1)}{\delta_0} \cdot k, \quad \text{МПа}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости клея, МПа;

k – коэффициент разнотолщинности слоя клея.

Формулы (4) и (5) проверены авторами экспериментально. Опыты проводились с разрушением образцов на: 1) сдвиг; 2) равномерный и 3) неравномерный отрыв. В основу опытов было положено предположение, что повышение температуры полимеризации, а также факторы, ослабляющие внутренние напряжения в стеклопластике, приводят к увеличению его прочности.

Наиболее интересные результаты получились в опытах на сдвиг соединений из пластин внахлест и нормальный отрыв с образцами, взятыми с теплохода «Денис Давыдов». Эти образцы отличались наличием характерных концентроров напряжений.

Модуль сдвига шва рассчитали как:

$$\sigma_{\text{к}} = \tau \cdot \gamma \cdot k_{\text{шер}}, \quad \text{МПа}, \quad (6)$$

где τ – средние напряжения в шве:

$$\tau = \frac{P}{F}, \quad \text{МПа}, \quad (7)$$

где P – усилие разрушающее, МПа;

F – площадь для нанесения дублёра, мм²;

$k_{\text{шер}}$ – коэффициент шероховатости поверхности образца ($k_{\text{шер}}=1,0...1,5$);

γ –сдвиг относительный:

$$\gamma = \frac{\Delta l}{\delta_{ш}}, \quad \text{мм}, \quad (8)$$

Где Δl – смещение клеевого шва:

$$\Delta l = l - l_1, \quad \text{мм}, \quad (9)$$

где l – начальная длина клеевого шва, мм;

l_1 – длина клеевого шва после испытаний на сдвиг, мм;

$\delta_{ш}$ – толщина клеевого шва (мм), где с учётом формулы (5) $\delta_{ш}=\delta l$:

$$\delta_{ш} = \frac{\sigma_k \cdot \Delta l \cdot k_{шер}}{\tau}, \quad \text{мм}. \quad (10)$$

Расчёт σ_k позволил рассчитать толщину клеевого соединения, при котором $\tau \rightarrow \max$.

Кроме того, выполненные эксперименты показали, что в нахлесточных соединениях имеет место концентрация напряжений, как при сдвиге, так и при отрыве. Анализ результатов экспериментов с нахлесточными соединениями показывает, что и чисто стеклопластиковые дублёры, и стеклопластиковые дублёры с металлическими накладками обеспечивают запас прочности 25...35% (см. табл. 2). То есть, и стеклопластиковый дублёр и стеклопластиковый дублёр с металлическими накладками могут рассматриваться как слой материала, приклеенного к основе [13]. Поэтому, для расчёта клеевого соединения можно предложить следующую формулу:

$$n \cdot r \cdot Q \leq m \cdot R \cdot S, \quad (11)$$

где $n=1,5$ – коэффициент концентрации напряжений;

$r=1,1$ – коэффициент, учитывающий возможное превышение нормативной нагрузки;

Q – нормативная нагрузка, кг;

m – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации);

R – расчётное сопротивление;

S – площадь склеиваемых поверхностей, см²

Таблица 2

Данные испытаний натуральных образцов стеклопластиков на прочность

Описание образца	Вид покрытия	Площадь образца, см ²	Разрушающая нагрузка, МПа	Характер разрушения
Металл с равномерным коррозионным износом	Металл без покрытия	105	1,52	Разрыв по основному металлу
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой по клею «Спрут-9М»	105	1,87	
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой с дублирующей металлической накладкой по клею «Спрут-9М»	105	2,16	
Металл с неравномерным коррозионным износом	Металл без покрытия	105	1,48	
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой по клею «Спрут-9М»	105	1,77	

	клею «Спрут-9М»		
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой с дублирующей металлической накладкой по клею «Спрут-9М»	105	2,03
Металл с коррозионным износом пятнами	Металл без покрытия	105	1,41
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой по клею «Спрут-9М»	105	1,76
	Полимеркомпозит, армированный стеклотканью в 1 слой с дублирующей металлической накладкой по клею «Спрут-9М»	105	2,01

Для удобства использования формулу (11) лучше представить следующим образом:

$$n \cdot r \cdot Q \leq m \cdot k_o \cdot k_{д.с.} \cdot R \cdot S, \quad (12)$$

где k_o – коэффициент однородности;

$k_{д.с.}$ – коэффициент длительного сопротивления для полиэфирных клеев.

Подставляя в формулу числовые значения коэффициентов, получим:

$$1,5 \cdot 1,1 \cdot Q < (0,6 \dots 0,8)(0,35 \dots 0,70)(0,50 \dots 0,55)R_H \cdot S, \quad (13)$$

где R_H – нормативное сопротивление, МПа.

В целях обеспечения равных условий при оценке прочности стеклопластиковых дублёров и стеклопластиковых дублёров с металлической накладкой в обоих случаях применялся метод предельных состояний [13]. В ходе расчётов определялся коэффициент нормативного сопротивления R_H , связывающий между собой коэффициент длительного сопротивления нагрузкам и предел прочности при кратковременном нагружении. В результате определили диапазон значений коэффициента $k_{д.с.}$, входящего в формулу (12), и значений коэффициента k_o , входящего в ту же формулу. При оптимальных режимах склеивания $k_{д.с.}=0,50\dots0,55$ и $k_o=0,35\dots0,70$. Конкретные значения этих коэффициентов определяются условиями эксплуатации [14].

Произведение R_H на k_o даёт величину расчётного сопротивления:

$$R = k_o R_H, \quad \text{МПа.} \quad (14)$$

На основе анализа и обобщения изложенного авторами получена формула для расчёта R при кратковременном нагружении образцов

$$R = k_o \cdot k_{д.с.} R_H, \quad \text{МПа,} \quad (15)$$

Так как распределение напряжений в клеевом соединении под нагрузкой неравномерно, очевидно, что полученные результаты можно считать условными, а для повышения их достоверности необходимо учитывать наличие концентраторов напряжений, действующие усилия и т.д. Тогда для соединения внахлёт имеем:

$$n \cdot N \leq m \cdot R \cdot l \cdot b, \quad (16)$$

где N – усилие, на которое рассчитывается соединение, кг:

$$N = r \cdot Q, \quad \text{МПа.} \quad (17)$$

l и b – длина и ширина клеевого шва, см.

Коэффициент r в формуле (17) принимает следующие значения: $r=1,1$ – в расчёте на собственный вес; $r=1,4$ – с учётом снеговой нагрузки; $r=1,2$ – с учётом ветровой нагрузки.

Для учёта условий эксплуатации соединения целесообразно использовать коэффициент m (входит в формулу (11)), который зависит не только от свойств клеевой композиции, но и от свойств соединяемых материалов. При нормальных условиях $m=0,6...0,8$. При повышенной (+60...+80 °C) температуре $m=0,1...0,2$.

Коэффициентом n (так же входит в формулу (11)) можно достаточно адекватно учесть неравномерность сдвигающих усилий в соединения. Этот коэффициент в основном зависит от геометрии ремонтируемой поверхности и свойств клеевой композиции [15-18]. При толщине клеевой прослойки 0,1 толщины соединяемых элементов $n=1,5$.

Результаты

По результатам уже выполненной части исследования, основные положения которого изложены в настоящей статье (само исследование продолжается), может быть создана методика расчёта прочности стеклопластиковых дублёров (в том числе, с металлическими накладками) для ремонта корпусов и надстроек металлических судов, трубопроводов различных судовых систем, а также методика прогнозирования долговечности таких соединений. Суть такой методики уместно проиллюстрировать следующим примером.

Допустим, что локальная зона палубы, которая рассчитана на нагрузку $Q=1000$ кг имеет площадь $S=1,0$ м². Она отремонтирована стеклопластиковым композитом на основе многокомпонентного клеевого состава «Спрут-9М» и одного слоя стеклоткани. Подставляя эти данные в расчётное выражение (16) имеем:

$$1,5 \cdot 1,1 \cdot 1000 < 0,6 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 8,86 \cdot 1000 \cdot 1650 \text{ кг} < 9303 \text{ кг.}$$

Из полученного результата следует, что при действии статических нагрузок прочность данного отремонтированного участка палубы достаточна.

Дальнейшее сопоставление предельных углов изгиба получившегося «сэндвича» стеклопластик-металл с аналогичными углами изгиба продольных связей корпуса судна подтверждает, что гибкость «сэндвича» лежит в допустимом диапазоне. Результаты расчёта толщины слоя стеклоткани ($\delta_{ар}$) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Толщины полимеркомпозита при ремонте судовых корпусных конструкций

Разность между нормативным и фактическим износом, $\Delta\delta$, мм	Толщина связи корпуса судна, δ_0											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Толщина стеклопластикового полимеркомпозита, $\delta_{ар}$											
0,5	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	3,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5
1,0	-	2,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,0	5,5	6,0	6,0	6,5	6,5
1,5	-	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,0
2,0	-	-	4,0	5,0	5,5	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
2,5	-	-	5,0	5,0	6,0	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0	10,0
3,0	-	-	-	6,0	6,5	7,0	8,0	8,5	9,5	10,0	-	-
3,5	-	-	-	7,5	7,0	7,5	8,5	9,0	10,0	-	-	-
4,0	-	-	-	-	7,5	8,0	8,5	9,5	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-	10,5	8,5	9,0	10,0	-	-	-	-
5,0	-	-	-	-	-	10,0	9,5	10,0	-	-	-	-

Обсуждение

Выполненное исследование применения стеклопластиков в судоремонте позволяет предположить их высокую перспективность для снижения металлоёмкости

судоремонта. Из анализа табл. 1 следует, что металлоёмкость ремонта локальных поверхностей ремонтируемых объектов на судне может быть снижена более чем в три раза. При этом результаты исследования позволяют констатировать, что во многих случаях возможно полное восстановление утраченных характеристик и свойств широкого спектра объектов ремонта (корпус, надстройки, трубопроводы, ДРК и т.д.), о чём свидетельствует обширная статистика. То есть, стеклопластики сегодня – значительно более дешёвая и в то же время сопоставимая по прочности, надёжности, долговечности альтернатива металлам.

В ходе исследований применялись: метод самопроизвольного отслаивания, метод среза и метод предельных состояний – известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы исследования прочности полимерных покрытий. Их использование подтверждает достоверность полученных результатов. На основе этих методов, а также с использованием известных формул (1) и (2), в частности, рассчитаны толщины стеклопластикового покрытия, равноценного по прочности металлическому дублёру, и получены формулы (14) и (15) для определения расчётного сопротивления R покрытия (необходима для оценки долговечности покрытия). Результаты данной части исследований позволили получить практические данные испытаний натуральных образцов на прочность (табл. 2), а также толщины армирующего слоя стеклопластика при ремонте судовых корпусных металлоконструкций (табл. 3). Кроме того, экспериментально были установлены диапазоны изменения коэффициента длительного сопротивления соединений ($k_{д.с.}$) и коэффициента однородности (k_0), входящих в формулу (12) для расчёта клевого соединения.

То есть, в целом, поставленная авторами цель и задачи выполнены, хотя за пределами рассмотрения остался ряд весьма важных аспектов применения стеклопластиков (и полимеркомпозитов в целом) в судоремонте. Все эти аспекты требуют отдельного рассмотрения, поскольку каждому из них присущи весьма специфические особенности.

Заключение

Результаты исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

- 1) применение стеклопластиков позволяет снизить металлоёмкость ремонта локальных зон ремонтируемых объектов на судне более чем в 3 раза;
- 2) при правильном определении толщины стеклопластиковых дублёров возможно полное восстановление утраченных характеристик и свойств широкого спектра объектов ремонта. Эффект усиливается при дополнительном использовании тонколистовых металлических дублёров (там, где это возможно);
- 3) использованные в исследовании методы позволили рассчитать толщины стеклопластикового покрытия, равноценного по прочности металлическому дублёру, а также получить расчётные выражения (14) и (15) для определения расчётного сопротивления R покрытия, во многом определяющего его долговечность;
- 4) экспериментально установлены диапазоны изменения коэффициента длительного сопротивления соединения ($k_{д.с.}$) и коэффициента однородности (k_0), входящих в формулу (12) для расчёта клевого соединения. Они составляют соответственно: для $k_0=0,35...0,70$; для $k_{д.с.}=0,50...0,55$;
- 5) необходимо расширять зону исследования применимости стеклопластиков (и полимеркомпозитов в целом) при ремонте судов, не ограничивая её только наиболее очевидными объектами ремонта (корпус, надстройка, трубопроводы), но и распространяя их на другие элементы судов (элементы судовых механизмов, ДРК; различные судовые устройства и проч.);
- 6) необходимо продолжать комплексные исследования прочности и долговечности полимерных покрытий на судах, в том числе не только при действии статических напряжений и постоянной температуре, но и при циклических

напряжениях и температуре знакопеременной, так как именно они характерны для реальных условий эксплуатации судов.

Список литературы

1. Нелюб В.А. Применение полимерных композиционных материалов в судостроении для ремонта корабельных надстроек//Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 5. С. 21-24.
2. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композитных материалов в судостроении/ Н.С. Гуменюк, С.С. Грушин // Современные наукоемкие технологии. 2013. №8. С. 116-117.
3. Мишкин, С.И. Полимерные композиционные материалы в судостроении / С.И. Мишкин, М.С. Дориомедов, А.И. Кучеровский // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2017 – Вып. 1 (25) – с. 60-70.
4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы -основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64-67.
5. B. Mahato, V. Babarinde, S. Abaimov, S. Lomov, I. Akhatov, Interface strength of glass fibres in polypropylene: dependence on the cooling rate and the degree of crystallinity John Wiley & Sons Inc. (United States), № 41, p. 1310-1322 doi:1002/pc.25456.
6. Sanjay K. Nayak, Smita Mohanty, Sushanta K. Samal, The effect of interfacial adhesion on the structural-mechanical behavior of hybrid composites January 2009 polymer composites 31(7):1247 – 1257 doi:10.1002/pc.20914.
7. N. Sugihara, F. R. Jones, Improving The Adhesion Of High-Performance Polymer Fibers Using Functional Plasma-Polymer Coatings March 2009 Polymer Composites 30 (3): 318 – 327 doi:10.1002/pc.20603.
8. Alexandre Wahrhaftig, Henrique Ribeiro, Ademar Nogueira. A structural composite for marine boat constructions. Marine Composites // Woodhead Publishing Series in Composites. Design and Performance. Science and Engineering 2019, Pages 301-314. DOI 10.1016/B978-0-08-102264-1.00010-8.
9. Anoshkin A.N., Vil'deman V.E, Lobanov D.S., Chikhachev A.I. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials // Mechanics of Composite Materials. – 2014. – Vol. 50. – No. 3, – pp.311-316. – DOI 10.1007/s11029-014-9416-0.
10. Тихомиров, А.В. Научные основы технологий получения полимерных изделий и покрытий в судостроении и в судоремонте : монография / А.В. Тихомиров. – Москва : РУСАЙНС, 2017. – 248 с. ISBN 978-5-4365-1885-5.
11. Cao J., Cheng H.S., Lee W., Padvoiskis J., Peng X.Q., Akkerman R., Graaf E.F.De., Boisse P., Hivet G., Launay J., Luycker E.De., Morestin F., Chen J., Gorczyca J.L., Liu L., Sherwood J., Harrison P., Long A., Wiggers J., Lomov S.V. et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and Benchmark results // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2008. – Т. 39. – № 6. – P. 1037-1053.
12. G. Sorkin, C.H. Pohler, A.B. Stavovy, F.F. Borriello. An overview of fatigue and fracture for design and certification of advanced high performance ships // Engineering Fracture Mechanics Volume 5, Issue 2, June 1973, Pages 307-352. DOI 10.1016/0013-7944(73)90025-8.
13. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Е., Бабин А.Д., Гринев М.А. Экспериментальные исследования влияния внешних воздействий и загрязняющих сред на работоспособность волокнисто-армированных полимерных композиционных материалов // Механика композитных материалов. – 2015, Вып. 51. – №1 – с. 69-76.
14. Мацевич, Т.А. Анализ влияния химического состава и концентрации компонентов смеси полимер-растворитель на ее предел принудительной упругости и вязкость / Т.А. Мацевич, А.А. Аскадский, О. Коврига, А. Мацевич // Международная полимерная наука и технология. – 2017 – Т. 44, №. 7 – С. 27–32. DOI: 10.1177/0307174X1704401005.
15. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov S.V., Verpoest I. The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2014. – Volume 56. – pp. 272-279.
16. Helbling C., Karbhari V.M., Durability. Assesment of Combined Enviromental Epo-sur and Bending /In.: Proc. of 7-th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. Concrete Structures (FRPRCS-7). New Orlean, Loisiaana, USA. – 2005. – pp. 1379-1418.
17. Бабушкин, А.В. Экспериментальное исследование и моделирование свойств композиционных материалов в условиях сложных термомеханических воздействий / А.В. Бабушкин, Д.С.

Лобанов // *Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2011, № 4 (5), с. 1984-1986.

18. Болотин, В.В. Трещиностойкость композитных материалов на полимерных связующих при повышенных температурах / А.Е. Ефимов, Н.С. Мезенцев, И.В. Шебунин, В.Н. Щугорев // *Механика композитных материалов*. – 1988. – №5. – С.839-844.

References

1. Nelyub V. A. The use of polymer composite materials in shipbuilding for the repair of ship superstructures//Repair, restoration, modernization. 2013. No. 5, pp. 21-24. (in Russ)
2. Gumenyuk N. S., Grushin S. S. Application of composite materials in shipbuilding / N. S. Gumenyuk, S. S. Grushin // *Modern high-tech technologies*. 2013. No. 8. С. 116-117. (in Russ)
3. Mishkin, S. I. Polymer composite materials in shipbuilding / S. I. Mishkin, M. S. Doriomedov, A. I. Kucherovsky // *News of Materials Science. Science and Technology*. - 2017-Issue 1 (25) - pp. 60-70. (in Russ)
4. Kablov E. N. Structural and functional materials -the basis of economic and scientific-technical development of Russia // *Questions of materials science*. 2006. No. 1. S. 64-67. (in Russ)
5. B. Mahato, V. Babarinde, S. Abaimov, S. Lomov, I. Akhatov, Interface strength of glass fibres in polypropylene: dependence on the cooling rate and the degree of crystallinity John Wiley & Sons Inc. (United States), No. 41, p. 1310-1322 doi:1002/pc.25456.
6. Sanjay K. Nayak, Smita Mohanty, Sushanta K. Samal, The effect of interfacial adhesion on the structural-mechanical behavior of hybrid composites January 2009 *polymer composites* 31(7):1247 – 1257 doi:10.1002/pc.20914.
7. N. Sugihara, F. R. Jones, Improving The Adhesion Of High-Performance Polymer Fibers Using Functional Plasma-Polymer Coatings March 2009 *Polymer Composites* 30 (3): 318 – 327 doi:10.1002/pc.20603.
8. Alexandre Wahrhaftig, Henrique Ribeiro, Ademar Nogueira. A structural composite for marine boat constructions. *Marine Composites // Woodhead Publishing Series in Composites. Design and Performance. Science and Engineering* 2019, Pages 301-314. DOI 10.1016/B978-0-08-102264-1.00010-8.
9. Anoshkin A.N., Vil'deman V.E, Lobanov D.S., Chikhachev A.I. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials // *Mechanics of Composite Materials*. – 2014. – Vol. 50. – No. 3, – pp.311-316. – DOI 10.1007/s11029-014-9416-0.
10. Tikhomirov, A.V. Scientific bases of technologies for obtaining polymer products and coatings in shipbuilding and ship repair: monograph / A.V. Tikhomirov. - Moscow: RUSAINS, 2017. - 248 p. ISBN 978-5-4365-1885-5. (in Russ)
11. Cao J., Cheng H.S., Lee W., Padvoiskis J., Peng X.Q., Akkerman R., Graaf E.F.De., Boisse P., Hivet G., Launay J., Luycker E.De., Morestin F., Chen J., Gorczyca J.L., Liu L., Sherwood J., Harrison P., Long A., Wiggers J., Lomov S.V. et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and Benchmark results // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2008. - Vol. 39. - No. 6. - P. 1037-1053.
12. G. Sorkin, C.H. Pohler, A.B. Stavovy, F.F. Borriello. An overview of fatigue and fracture for design and certification of advanced high performance ships // *Engineering Fracture Mechanics* Volume 5, Issue 2, June 1973, Pages 307-352. DOI 10.1016/0013-7944(73)90025-8.
13. Lobanov D. S., Wildemann B. E., Babin, A. D., Greene, M. A., Experimental study of the effect of external influences and polluting environments on the performance of fiber-reinforced polymeric composite materials // *Mechanics of composite materials*.– 2015, Vol. 51. – №1 – p. 69 to 76.(in Russ)
14. Matseevich, T. A. Analysis of the influence of the chemical composition and concentration of components of the polymer-solvent mixture on its limit of forced elasticity and viscosity / T. A. Matseevich, A. A. Askadsky, O. Kovriga, A. Matseevich // *International Polymer Science and Technology*. - 2017-VOL. 44, no. 7-P. 27-32. DOI: 10.1177/0307174X1704401005. (in Russ)
15. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov S.V., Verpoest I. The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2014. – Volume 56. – pp. 272-279.
16. Helbling C., Karbhari V.M., Durability. Assesment of Combined Enviromental Epo-sur and Bending /In.: Proc. of 7-th Int. Symp. on Fiber Reinforsed Polym. Reinf. Concrete Structures (FRPRCS-7). New Orlean, Loisiaana, USA. – 2005. – pp. 1379-1418.

17. Babushkin, A.V. Experimental research and modeling of the properties of composite materials in the conditions of complex thermomechanical effects / A.V. Babushkin, D. S. Lobanov // Fundamental problems of theoretical and applied Mechanics. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.And. Lobachevsky, 2011, № 4 (5), pp. 1984-1986. (in Russ)
18. Bolotin, V. V. Fracture toughness of composite materials with polymer binder at elevated temperatures / A. E. Efimov, N. With. Mezentsev, I. V. Shabunin, V. N. Shchugorev // Mechanics of composite materials. – 1988. – No. 5. – P. 839-844. (in Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурмистров Евгений Геннадьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeniy G. Burmistrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Shipbuilding, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Михеева Татьяна Александровна, к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Shipbuilding, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2021; опубликована онлайн 15.09.2021
Received 08.06.2021; published online 15.09.2021