

Исследования технического состояния корпусов судов из композиционных материалов в процессе эксплуатации

мировой опыт,
современное состояние в России,
проблемы,
перспективы развития

Францев М. Э., к.т.н.
gepard629@yandex.ru
АХТО-ПЛАСТ-ЭКСПЕРТ

Во второй половине декабря 2023 года в Санкт-Петербургском морском техническом университете прошла традиционная Всероссийская научно-техническая конференция по строительной механике корабля. В этот раз она была посвящена памяти академиков — кораблестроителей А. Н. Крылова и Ю. А. Шиманского и, одновременно, 160-летию академика АН СССР Алексея Николаевича Крылова (1863-1945) и 140-летию академика АН СССР Юлиана Александровича Шиманского (1883-1962). В рамках конференции был сделан доклад, посвященный одной из самых молодых областей морской науки — исследованиям технического состояния корпусов судов из композиционных материалов в процессе эксплуатации. На основании данного доклада написана эта статья.



Рис. 1. Автор статьи старший эксперт Московского филиала Российского Речного Регистра к.т.н. Францев М. Э. производит исследование корпуса судна из композитов

Корпус судна из композиционных материалов, по сути, является «вещью в себе», так как он не разъемный и не может быть разделен на части, чтобы специалисты — исследователи технического состояния могли бы увидеть, что у него внутри. Производители всего мира зачастую скрывают конструкцию корпуса судна из композитов, примененные материалы и технологию его изготовления. Это приводит к тому, что для исследований корпусов судов из композитов требуются различные методы неразрушающего контроля (рис. 1).

Исследования технического состояния корпусов судов из композитов в процессе эксплуатации сочетают визуальные и инструментальные методы. Целями исследования, как правило, могут являться:

- текущая оценка технического состояния корпуса судна;
- определение фактического объема износа, а также фактических повреждений / разрушений судовых конструкций из композитов;
- верификация проектно-технологических решений по созданию корпуса судна из композитов.

Мировой опыт исследований технического состояния корпусов судов из композитов в эксплуатации

У истоков этой области морской науки стоял Дэвид Паско (1947–2018), морской сюрвейер из Соединенных Штатов Америки. Он провел более 5000 исследований, как прогулочных, так и коммерческих судов. После урагана «Катрина» в Новом Орлеане в 2005 году Дэвид Паско получил возможность обследовать огромное количество разрушенных корпусов судов из композитов и сделать выводы об их конструкции и технологиях их изготовления. В ряде случаев он квалифицировал изготовление этих корпусов, как некачественное. Дэвид Паско является автором четырех книг, рассматривающих конструкции различных судов из композитов, а также автором многочисленных журнальных статей, посвященных результатам его исследований корпусов судов из композитов. Дэвид Паско был приглашенным лектором в Международном университете Флориды по морским исследованиям [1].

Второй значимой фигурой в этой области является Эрик Грин. Он получил степень бакалавра военно-морской архитектуры и морской инженерии в Массачусетском технологическом институте в 1979 году. В 1988 году он основал компанию Eric Greene Associates, Inc., специализирующуюся на исследованиях композиционных материалов для морских конструкций. Эрик Грин является одним из авторов проекта по неразрушающей оценке морских композитов Комитета по конструкции судов, выполняемому по контракту с Отделением структурной целостности надводных кораблей NAVSEA / SEA 05 P21. Он специализируется в области разработки современных композиционных материалов для морских конструкций, в том числе, огнестойких композитов. Эрик Грин также много занимается вопросами образования в области морских композитов. Кроме того, он является автором известной книги «Marine Composites» («Морские композиты»), получившей широкое признание и содержащей, в том числе, результаты его исследований [2].

Среди ученых, занимающихся исследованиями технического состояния корпусов судов из композиционных материалов, необходимо упомянуть Вольдемара Свицерского, профессора Военного института технологии вооружения (Польша). Он является автором более 95 научно-технических работ в области неразрушающего контроля различных композиционных материалов, в том числе, композитов судового корпуса. Вольдемар Свицерский занимается обнаружением дефектов в композитах, армированных арамидным волокном, с помощью методов неразрушающего контроля. Он изучает эволюцию обнаружения дефектов в композитах методами неразрушающего контроля и ряд других вопросов. Последние работы Вольдемара Свицерского посвящены возможности обнаружения повреждений от осмоса стеклопластиковых композитов, используемых в морских целях методами неразрушающего контроля.

В настоящее время, для исследований технического состояния корпусов судов из композиционных материалов в процессе эксплуатации за рубежом применяются: ультразвуковой метод, термография, шерография, метод свободных колебаний, а также некоторые другие методы неразрушающего контроля.

Эрик Грин в своем обзоре методов неразрушающего контроля на SSC Ship Structure Symposium в 2014 году сформулировал тезис, что средства инструментального неразрушающего контроля, применяемые в аэрокосмической промышленности, для исследования корпусов судов в чистом виде непригодны, то есть они должны быть доработаны под эти задачи [3].

Вольдемар Свицерский в своей работе, опубликованной в 2023 году считает, что наиболее перспективны для исследований корпусов судов из композитов акустические методы неразрушающего контроля [4].

Весьма большое значение в западной практике придается исследованиям осмоса композитных корпусов судов. Это связано с тем, что композитные корпуса там проводят в воде (зачастую в теплой воде) очень много времени, и осмос в них развивается быстро.

Для исследований в этом направлении за рубежом разработано и применяется семейство приборов (влагомеров), позволяющих определить избыточное содержание влаги в корпусных конструкциях из композитов, что может указывать на вероятное развитие осмоса.

В представлении зарубежных исследователей в корпусах судов из композитов в процессе эксплуатации могут возникать следующие дефекты. Это, во-первых, наружные дефекты: повреждения декоративного слоя, отслоение декоративного слоя, трещины в декоративном слое. Во-вторых, это внутренние дефекты: воздушные включения, пористость армирующего материала, пористость матрицы, трещины в матричной фазе и расслоения. Видно, что перечисленные дефекты перекликаются с хорошо известными технологическими дефектами, обнаруживаемыми во вновь изготовленных корпусах.

Современное состояние исследований технического состояния корпусов судов из композитов в эксплуатации в России

В России на сегодняшний день командой специалистов под руководством к.т.н. Францева М.Э.) исследовано более 150 корпусов судов из композиционных материалов, произведенных в различных странах мира. Эти суда имеют возраст от 5 до 36 лет и длину от 3 до 27 метров. В число исследованных судов входят аварийные и восстановленные после пожара, суда, а также суда на подводных крыльях и амфибийные суда на воздушной подушке.

Результатами отечественных исследований технического состояния корпусов судов из композитов в процессе эксплуатации являются:

- Методика и Технологическая инструкция исследования корпуса судна из композитов методами



Рис. 2. Патент на изобретение Способа определения технического состояния корпусов судов из композитов

неразрушающего контроля, согласованные с Российским Речным Регистром;

- Способ определения технического состояния корпусов судов из композитов, находящихся в эксплуатации, базирующийся на комбинации нескольких методов неразрушающего контроля, реализованной под руководством Ю.В. Ланге (1925–2022) при создании дефектоскопа ДАМИ-С [5–8];
- Определение эксплуатационных факторов, способствующих возникновению дефектов в корпусе судна из композитов;
- Систематизация эксплуатационных дефектов, выявляемых в процессе исследования [9];
- Обобщенная схема расположения дефектов эксплуатационной природы на корпусе судна из композитов;
- Описание эксплуатационного поведения корпусов судов из композитов [10];
- Базовая физическая модель, а также описание механизма возникновения и развития внутренних дефектов типа расслоения на погруженной части корпуса;
- Способ определения степени утраты прочностных свойств композита в районе внутреннего дефекта типа расслоения эксплуатационной природы [11–13];
- Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композитов, а также повышению характеристик его долговечности для учета при новом проектировании [14–15];
- Более 25 опубликованных научно-технических работ, в том числе, 12 докладов на международных и всероссийских конференциях на русском и английском языках, содержащих результаты исследований;
- Две монографии, в которых отражены результаты исследований;
- 1 патент на изобретение, см. рис. 2 [16];
- Внедрение результатов исследований в четырех НИОКР, в том числе, в двух НИОКР, выполненных по Федеральным целевым программам;

- Научно-техническая работа по дефектоскопии корпусов судов из композитов, опубликованная в «Russian Journal of Non-Destructive Testing», известна во всем мире и имеет более 1500 прочтений на ресурсе ResearchGate [17].

В России исследования корпусов судов из композитов во время эксплуатации выполняются при помощи импедансного метода неразрушающего контроля в комбинации режимов точечного и порогового контроля, а также метода свободных колебаний. Изображения внутренних дефектов типа расслоения получаются с помощью акустического сканера [18].

Установлено, что факторами, влияющими на возникновение дефектов в судовом корпусе из композитов в процессе эксплуатации, являются:

- воздействие гидродинамических нагрузок;
- воздействие воды, как органического растворителя;
- воздействие низких температур;
- воздействие высоких температур;
- воздействие солнечной радиации (ультрафиолет);
- аварийные повреждения.

В результате исследований обнаружены следующие дефекты, возникающие в процессе эксплуатации в корпусе судна в штатном режиме. Внешние дефекты: сколы, наружные трещины декоративного слоя, отслоение декоративного слоя, эрозионный износ декоративного слоя, поверхностный осмос, изменение структуры декоративного слоя. Внутренние дефекты: конструкционные трещины, расслоения 1-го рода без изменения химического состава композита, расслоения 2-го рода с изменением химического состава композита (осмотические), см. рис. 3 и 4.

Выполнена верификация методами неразрушающего контроля проектно-технологических решений при создании надстройки из композитов амфибийного судна на воздушной подушке типа «Нептун-23», а также надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях [19].

Проблемы исследований технического состояния корпусов судов из композиционных материалов в процессе эксплуатации в России и перспективы их развития

В то же время, несмотря на выполненные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в интересах Российского Речного Регистра (теперь Российское Классификационное общество), включая исследование более чем 113 корпусов судов из композитов при участии сотрудников этого Классификационного общества, результаты исследований не нашли отражения в новых редакциях Правил Российского Речного Регистра (РКО).

Одновременно, несмотря на выполненные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в интересах Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ результаты исследований не



ТЕХНОЛОГИЯ
ДЕЙСТВИЯ

СОБСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ПОЛИЭФИРНЫЕ СМОЛЫ

ГЕЛЬКОУТЫ

ПОЛУПОСТОЯННЫЕ
РАЗДЕЛИТЕЛИ

ОБОРУДОВАНИЕ МВП



Поливоск П
Серия полупостоянных
разделительных составов

Поливоск П-РС-23
Разделительный состав

Партия 000281
Дата производства 29.08.2023
Тара Банка
Нетто 2 кг
Гарантийный срок хранения 12 месяцев

ВАЖНО

- Температура хранения не выше +25°C
- Хранить в закрытом сухом помещении
- Не допускать попадания содержимого в руки и глаза



Полимер



Полимергель



Поливоск



Полипигмент



Полиактив



Полиадгезив



Оборудование МВП

ГЕЛЬКОУТЕРЫ
ЧОППЕРЫ
ИНЖЕКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ
ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ

г. Нижний Новгород,
ул. Нефтегазовская, 1А
тел.: +7 (831) 243-10-00
факс: +7 (831) 243-23-03

polymerprom-nn.ru
polymerprom@polymerprom-nn.ru

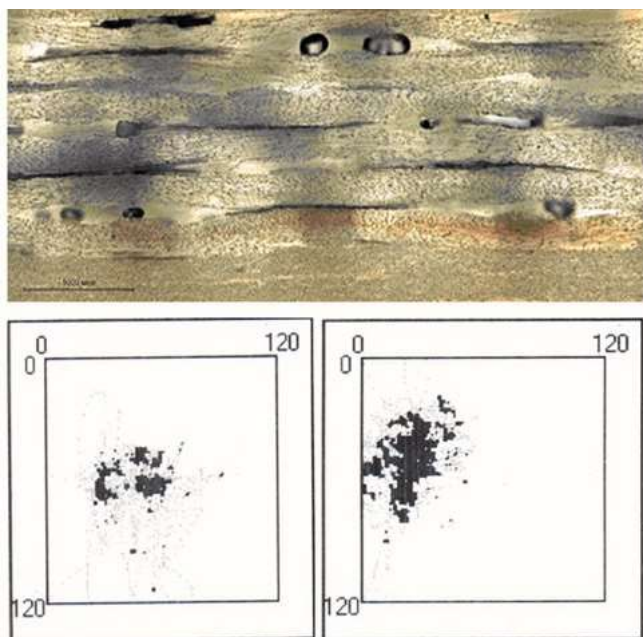


Рис. 3. Изображения внутренних дефектов типа расслоение, полученные при помощи электронного микроскопа (вверху) и акустическими низкочастотными методами (внизу)

нашли отражения в нормативных документах по маломерным судам Государственной инспекции по маломерным судам.

Несмотря на все усилия, структуры Министерства Обороны РФ не заинтересовались возможностью исследования технического состояния корпусов кораблей из композитов проектов 1258 «Корунд» и 10750 «Сапфир», находящихся в строю, и в ряде случаев они просто списываются. Это привело к тому, что при новом проектировании кораблей подобного класса и назначения проектировщики не располагают полноценной информацией об эксплуатационном поведении корпусов кораблей из композитов проектов 1258 «Корунд» и 10750 «Сапфир» [20].

Ликвидация производства дефектоскопа ДАМИ-С лишила исследователей возможности проводить точный, а главное высокоэффективный поиск внутренних дефектов типа расслоение в различных судовых корпусных конструкциях из композитов.

Отсутствие приборов неразрушающего контроля, оснащенных акустическими сканерами, лишает исследователей возможности получать С-scan изображения внутренних дефектов типа расслоение и точно измерять их площадь.

Это, к сожалению, далеко не все проблемы, с которыми сталкиваются исследователи технического состояния корпусов судов из композитов в процессе эксплуатации в России. При этом перспективы развития этой области морской науки в России есть.

Использование новой версии дефектоскопа ДАМИ-С09 с пусть существенно обрезанным функционалом по композиционным материалам и отсутствием акустического сканера, тем не менее, в сочетании с мерительным инструментом позволяет не только обнаруживать внутренние дефекты типа расслоение, но и пусть достаточно приблизительно, измерять их геометрические размеры и вычислять площадь. Также

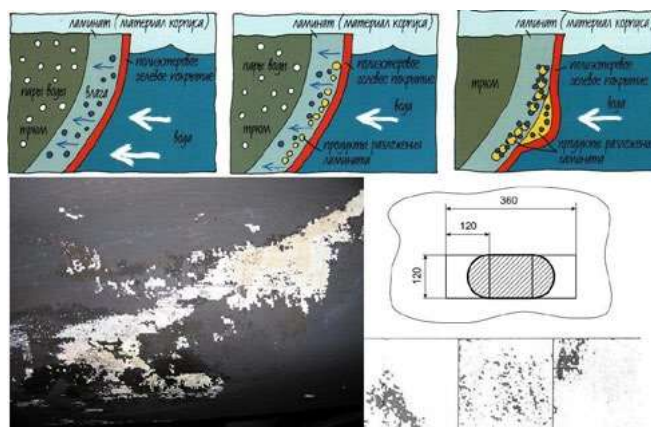


Рис. 4. Схема возникновения внутренних дефектов типа расслоение 2 рода (осмотических) вверху и их изображения, полученные акустическими низкочастотными методами (внизу справа)

дефектоскоп ДАМИ-С09 позволяет реализовывать метод свободных колебаний для поиска внутренних дефектов типа расслоение.

В дополнение, использование классического и хорошо известного дефектоскопа ИД-91М в сочетании с мерительным инструментом также позволяет не только обнаруживать внутренние дефекты типа расслоение, но и пусть достаточно приблизительно, измерять их геометрические размеры и вычислять площадь. Поэтому определенные инструменты, позволяющие выполнять исследования технического состояния корпусов судов из композитов в процессе эксплуатации, в России имеются.

Перспективы развития исследований, кроме того, обусловлены тем обстоятельством, что в настоящее время на акваториях Российской Федерации находится несколько десятков тысяч корпусов судов из композитов, которые в сегодняшних условиях физически не могут покинуть границы России. Подавляющее большинство этих корпусов (даже качественно изготовленные) имеет регулярное ежегодно ухудшающееся техническое состояние. Это влечет за собой, с одной стороны, необходимость максимально возможного продления сроков эксплуатации этих судов (так как их утилизация встречает существенные технические трудности). С другой стороны, необходим своевременный вывод из эксплуатации технически



Рис. 5. Авария амфибного судна на воздушной подушке проекта 15060 «Ирбис-1», имеющего в конструкции большое количество элементов из композитов, на Амуре

не пригодных судов и их списание для обеспечения безопасности эксплуатации (рис. 5).

Поэтому судовладельцы, страховые компании, организации, осуществляющие технический надзор и техническое наблюдение за эксплуатацией судов из композитов, самим ходом истории обречены на использование результатов исследований технического состояния корпусов судов из композитов, их осмысление и разработку на их основании соответствующей нормативной документации.

Заключение

В статье рассмотрен ряд аспектов исследований технического состояния корпусов судов из композиционных материалов в процессе эксплуатации. Упомянуты наиболее известные в мире ученые и специалисты, работающие в этой области, указаны наиболее значимые их достижения и круг научных интересов, перечислены направления и способы их исследований, а также полученные ими результаты. Рассмотрено современное состояние дел в этой области в России. Обозначены наиболее крупные проблемы, стоящие перед отечественными исследователями, а также описаны перспективы развития этой области морской науки. **КМ**

Список литературы

1. David Pascoe. Surveying Fiberglass Power Boats. Second Edition, 2005
2. Greene E. Marine composites. Second Edition. Eric Greene Associates, Inc., Annapolis, 1999.
3. Greene E. Marine Composites Non-Destructive Evaluation, SSC Ship Structure Symposium, 2014
4. Waldemar Swiderski, Martyna Strag. Possibilities of Detecting Damage Due to Osmosis of GFRP Composites Used in Marine Applications, Appl. Sci. 2023, 13, 4171. <https://doi.org/10.3390/app13074171>
5. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций из композитных материалов. - М.: Машиностроение, 1991.
6. Ланге Ю.В., и др. Новые низкочастотные акустические дефектоскопы для неразрушающего контроля многослойных конструкций В мире НК (Неразрушающего контроля) № 3, 2004, с. 12-13
7. Францев М.Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации, Контроль. Диагностика, № 11, 2009. стр. 61-68
8. Frantsev M. E. The mode used for the estimation of the technical condition for the boat hull from composite materials for exploitation, 10-th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June 7-11, 2010, Abstracts, part 2, p. 64
9. Францев М.Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов, Катера и яхты № 2(212) 2008, стр. 90-93, № 3(213) 2008, стр. 102-105.
10. Францев М.Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок. Труды Государственного Крыловского Научного Центра, выпуск 75(359), СПб, 2013, стр. 192-200.
11. Францев М.Э. Определение степени утраты прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композита в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти академика Ю.А. Шиманского, 2013, СПб, стр. 124-126
12. Францев М.Э. Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение. Конструкции из композиционных материалов, № 1, 2016, стр. 67-73
13. Frantsev M.E., Chudnov I.V. Determining the degree of strength loss of the possibility of failure of ship hull structures of composites in the zone of delamination, International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016, June 6-8, 2016, Saint-Petersburg, Russia, Abstracts of Papers
14. Францев М.Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов, Конструкции из композиционных материалов, № 3, 2011, стр. 86-97
15. Frantsev M. E. The project's recommendation for definition of the most loaded and vulnerable elements of boat hull from composites which based on results of survey by methods of non-destructive testing., World Maritime Technology Conference, Saint-Petersburg 29 May – 1June, 2012, Abstracts of papers, p. 31
16. Францев М.Э. Сорокин А.К. Способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, использующий результаты неразрушающего контроля по обнаружению дефектов типа расслоение. Патент на изобретение № 2354964 от 16.10.2007 года
17. Францев М.Э. Дефектоскопия корпусов судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, акустическими методами неразрушающего контроля. Дефектоскопия, 2013, № 1, стр. 3-11
18. Frantsev M.E. Nondestructive Testing of Ship Hulls Made of Composite Materials Using Acoustic Methods. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 1-7
19. Францев М.Э. Способы верификации проектных решений, полученных численными методами, при создании судов и их крупных элементов из композиционных материалов с позиций обеспечения их характеристик долговечности, Сборник тезисов докладов VIII Международной конференции «Композиты СНГ», Сочи, 2018, стр. 3-14
20. Францев М.Э. Советские противоминные корабли из композиционных материалов. Compositebook, № 3, 2019, стр. 50-56.