

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-202-207
УДК 629.5.02:624.04

К.С. Ераносян, О.Г. Ефимова, Е.А. Маслич, Н.Н. Федонюк
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ПОСЛЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРПУСА КОРАБЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты исследования прочности поврежденного в результате огневого воздействия корпуса корабля. Для восстановления корпуса предложена технология формования обшивки корпуса на наружной матрице с несимметричной разделкой кромок соединяемых элементов обшивки. Проведенные численные и экспериментальные исследования показали, что при действии предельных расчетных эксплуатационных нагрузках прочность и надежность корпуса обеспечены.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, корпус, обшивка, стыковое соединение, прочность, метод конечных элементов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-202-207
UDC 629.5.02:624.04

K.S. Eranosyan, O.G. Efimova, E.A. Maslich, N.N. Fedonyuk
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

POST-REPAIR STRENGTH OF HULL MADE OF POLYMERIC COMPOSITES

This paper studies the strength of the hull damaged by fire. To repair this hull, it was suggested to mould its plating on an outer matrix with asymmetric processing of the elements to be connected. Numerical investigations and experimental studies have shown that this will ensure required strength and reliability of the hull under limit design operational loads.

Keywords: polymeric composite materials, hull plating, joint, strength, finite-element method.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Во время строительства корпуса корабля из полимерных композиционных материалов (ПКМ), продольный разрез которого представлен на рис. 1, в результате огневого воздействия были повреждены значительные части обшивки обоих бортов выше верхней палубы (ВП), палуба полубака, часть настила ВП с подкрепляющим ее набором, и другие связи между 10 и 90 шпангоутами.

После удаления поврежденных частей и проведения мероприятий по дефектоскопии обшивки, а также испытаний образцов ПКМ, вырезанных из

балок набора и обшивки, было принято решение о восстановлении корпуса и продолжении строительства корабля.

Для того, чтобы выполнить работы по восстановлению корпуса из ПКМ и обеспечить его прочность была разработана технология восстановления обшивки и других связей корпуса (палуб, набора и переборок).

Наиболее сложной и ответственной задачей являлась восстановление обшивки корпуса, которая получила значительные по объему повреждения. На основе результатов исследований была разработана

Для цитирования: Ераносян К.С., Ефимова О.Г., Маслич Е.А., Федонюк Н.Н. Исследование прочности восстановленного после повреждения корпуса корабля из полимерных композиционных материалов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; Специальный выпуск 1: 202–207.

For citations: Eranosyan K.S., Efimova O.G., Maslich E.A., Fedonyuk N.N. Post-repair strength of hull made of polymeric composites. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; Special Edition 1: 202–207 (in Russian).



Рис. 1. Продольный разрез корпуса

технология восстановления обшивки, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

Предложенная технология подразумевает использование метода послойного контактного формирования из отечественных материалов восстановленной обшивки на наружной матрице с последующей приформовкой внутренней накладки, закрывающей район стыковки восстановленной и восстанавливаемых частей обшивки. Кроме того, с внешней стороны весь корпус обформовывается дополнительными слоями стеклоткани, формирующими наружную накладку. Увеличение веса корпуса в результате наформовки дополнительных слоев в накладках может составить, как показывают предварительные расчеты, не более 10 %, что удовлетворяет заданным требованиям.

При выполнении работ по восстановлению обшивки корпуса корабля из ПКМ принципиальным вопросом была разработка прочного и работоспособного узла стыкового соединения двух частей обшивки. В результате анализа результатов ранее проведенных исследований прочности стыковых соединений конструкций из ПКМ [1] было предложено два типа узла соединения: с симметричной и несимметричной ступенчатой разделкой кромок (рис. 3).

Для определения оптимальных параметров узлов стыковых соединений (количество ступенек, геометрические размеры ступенек, а также количество слоев стеклоткани в каждой ступеньке) была выполнена серия многовариантных расчетов. В результате численного моделирования были установлены основные геометрические размеры элементов узлов (рис. 3), которые являлись исходными данными для изготовления образцов узлов стыковых соединений, предназначенных для испытаний.

Расчетные исследования также позволили определить при действии растягивающей нагрузки наиболее нагруженные районы стыковых соединений с симметричной и несимметричной разделкой кромок, а именно: район клеевого шва стыка соединяемых

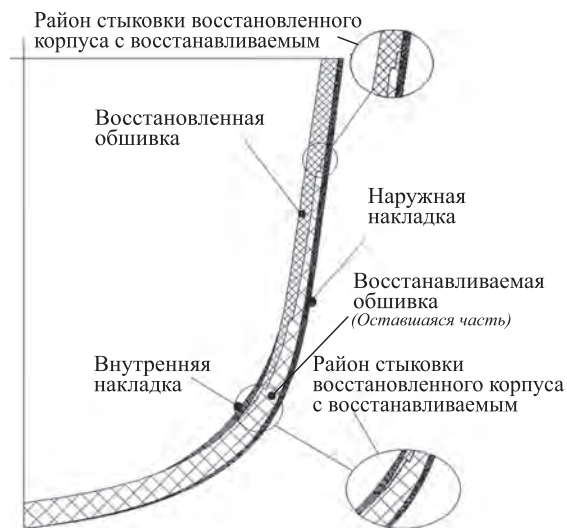


Рис. 2. Принципиальная схема восстановленной обшивки корпуса

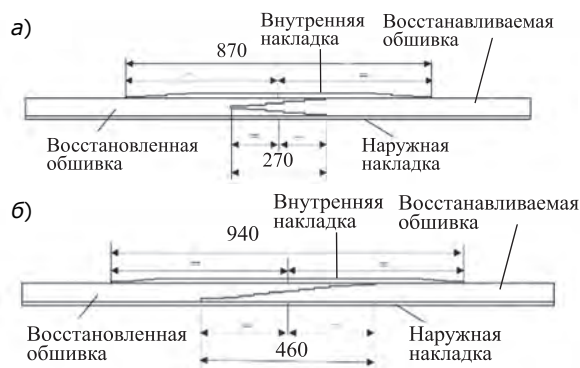


Рис. 3. Узел стыкового соединения частей обшивки корпуса: а) с симметричной ступенчатой разделкой кромок; б) с несимметричной ступенчатой разделкой кромок

частей обшивки, окончания накладок, а также районы ступенек соединяемых частей обшивки. В указанных районах из-за действия повышенных напряжений начинается разрушение. Запас прочности оценивался с использованием критерия Цзя-Ву.

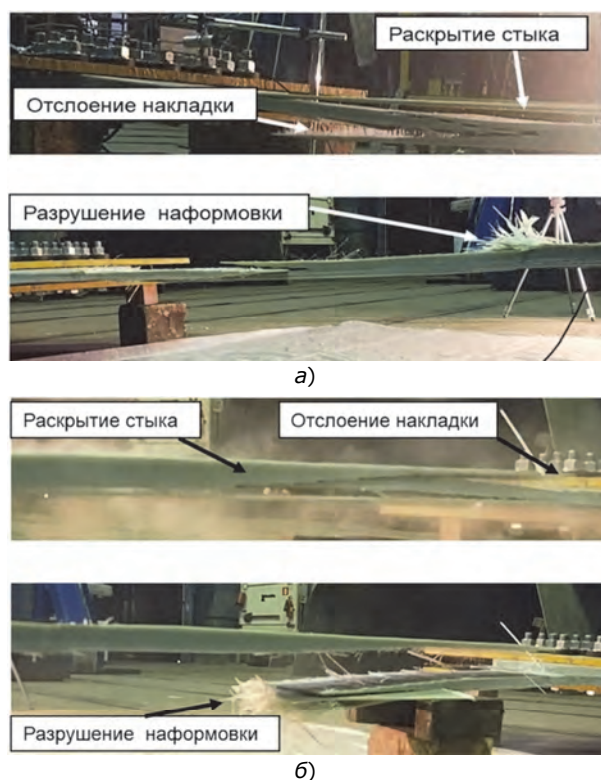


Рис. 4. Характер разрушения образцов узлов стыковых соединений: а) с симметричной ступенчатой разделкой кромок; б) с несимметричной ступенчатой разделкой кромок

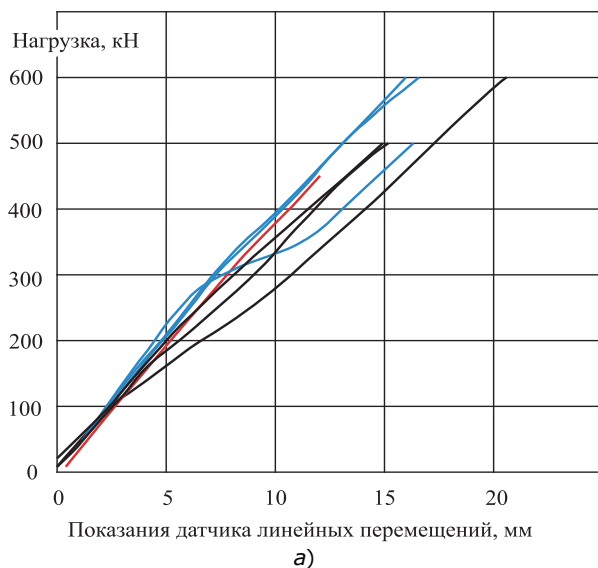
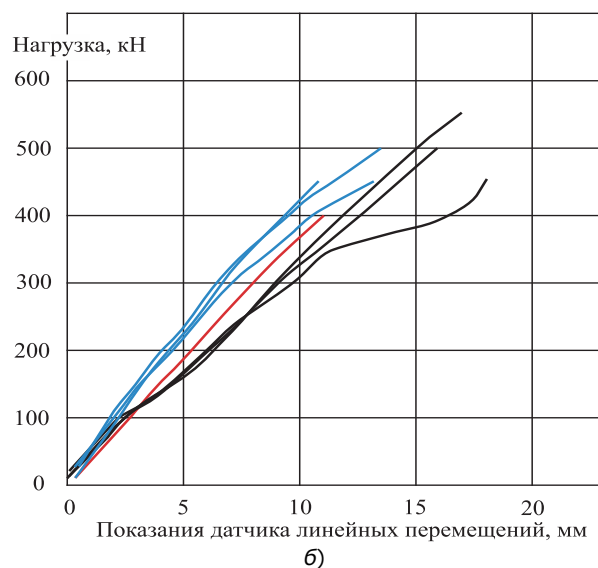


Рис. 5. Результаты экспериментальных и численных исследований образцов узлов стыковых соединений: а) с симметричной ступенчатой разделкой кромок; б) с несимметричной ступенчатой разделкой кромок

Изготовленные образцы узлов стыковых соединений с симметричной и несимметричной разделкой кромок с расчетными размерами элементов соединения (рис. 3) испытывались на основной вид нагружения – растяжение. Были проведены статические и повторно-статические испытания. При статических испытаниях нагрузка прикладывалась ступенчато вплоть до разрушения образца. На каждой ступени нагружения осуществлялась запись показаний датчика линейных перемещений и нагрузки. Повторно-статические испытания проводились на базе 10 000 циклов с нагрузкой, равной половине от средней максимальной нагрузки, полученной в ходе статических испытаний. После проведения повторно-статических испытаний образцы подвергались статическому нагружению до разрушения с целью определения остаточной прочности.

Все образцы успешно прошли испытания. Характер разрушения образцов узлов стыковых соединений с симметричной и несимметричной разделкой кромок при их растяжении одинаков – мгновенное отслоение внутренней накладки с одновременным раскрытием стыка и разрушением дополнительной наружной наформовки (рис. 4).

Сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований представлено на рис. 5. Очевидна хорошая корреляция расчета и эксперимента.



— статические испытания;
— повторно-статические испытания (остаточная прочность);
— результаты численного моделирования

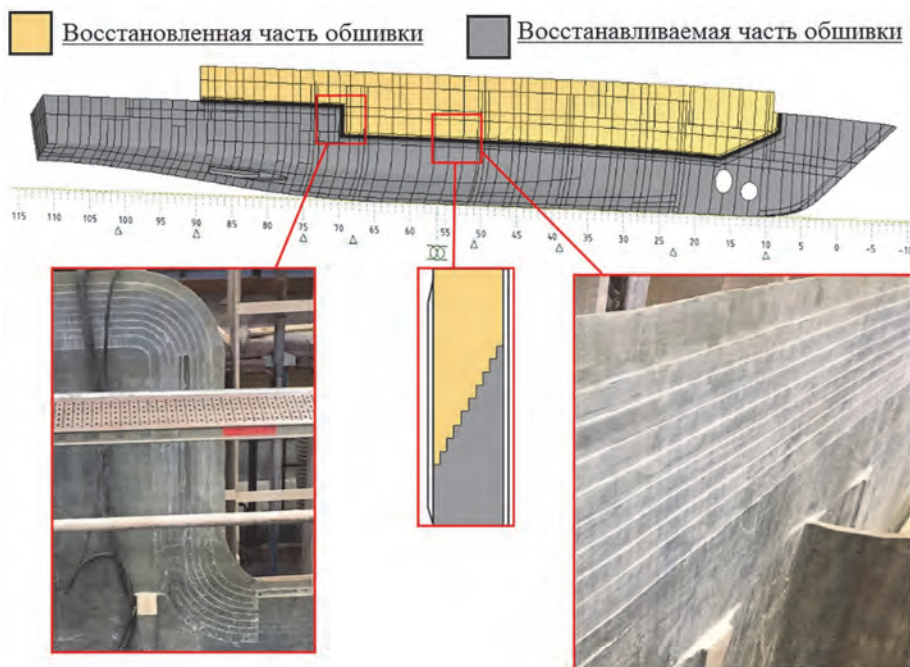


Рис. 6. Фрагменты обшивки корпуса со ступенчатой разделкой кромок

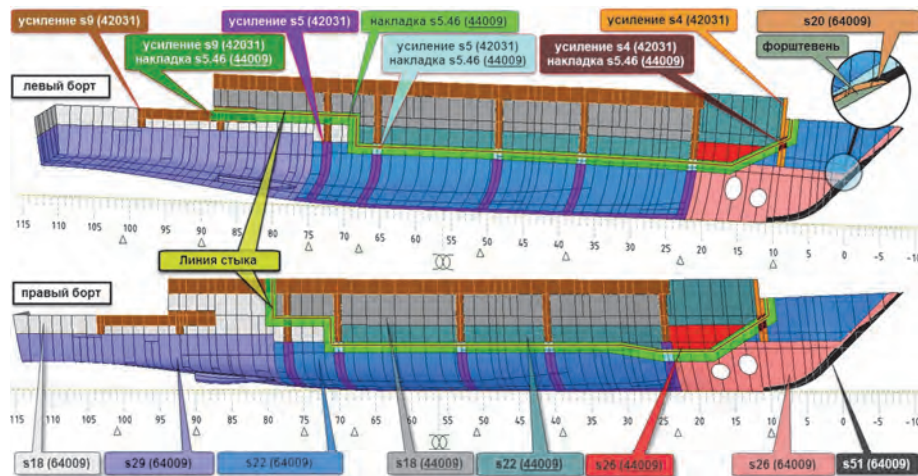


Рис. 7. Сформированная КЭ модель исследуемого корабля

Результаты эксперимента показали, что образцы узлов стыковых соединений с симметричной и несимметричной ступенчатой разделкой кромок практически являются равнопрочными. В ходе эксперимента подтверждена усталостная прочность образцов при повторно-статических испытаниях на базе 10 000 циклов. Остаточная прочность образцов после проведения повторно-статических испытаний практически не изменилась по сравнению с прочностью в исходном состоянии.

Предельная нагрузка при разрушении образцов с симметричной разделкой кромок в среднем на

12 % выше предельной нагрузки образцов с несимметричной разделкой.

Вместе с тем, узел с симметричной разделкой кромок является менее технологичным и более трудоемким в изготовлении. При формировании узла стыкового соединения с несимметричной разделкой кромок можно использовать метод послойного контактного формования на матрице, установленной только с внешней стороны борта, что позволяет реализовать разработанную технологию восстановления обшивки корпуса. Учитывая эти обстоятельства, было принято решение использовать при восстанов-

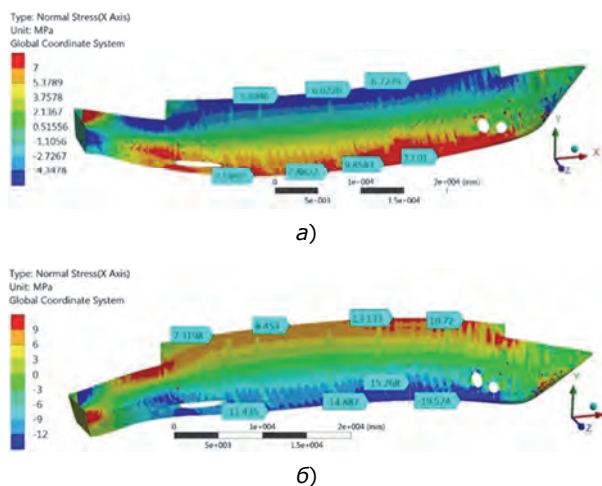


Рис. 8. Распределение нормальных напряжений, действующих вдоль корпуса, Мпа: а) прогиб корпуса; б) перегиб корпуса

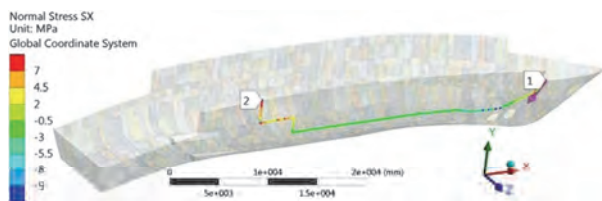


Рис. 9. Распределение нормальных напряжений, МПа, действующих вдоль корпуса по линии стыка в пластинах обшивки борта при перегибе корпуса

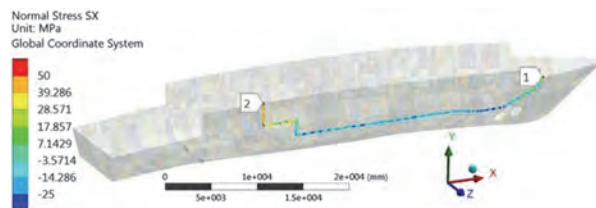


Рис. 10. Распределение нормальных напряжений, МПа, действующих вдоль корпуса по линии стыка в пластинах обшивки правого борта при действии местных нагрузок

лении обшивки корпуса узел стыкового соединения с несимметричной ступенчатой разделкой кромок.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили определить приведенное ко всему сечению разрушающее напряжение при растяжении узла стыкового соединения с несимметричной разделкой кромок, которое составило 157 МПа.

На рис. 6 представлены фрагменты обшивки корпуса со ступенчатой разделкой кромок, выполненной заводом-изготовителем.

Для оценки уровня напряжений, возникающих в корпусе исследуемого корабля при действии эксплуатационных нагрузок, была сформирована конечно-элементная (КЭ) модель корпуса, полностью отражающая все особенности его конструкции, с учетом измененных в ходе реконструкции корпуса материалов, толщин, наличия стыков в обшивке, а также дополнительных накладок.

Общий вид КЭ модели обшивки корпуса представлен на рис. 7.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса проводился в два этапа по методике, изложенной в [2].

Результаты расчетов при прогибе и перегибе корпуса позволили выполнить оценку напряженного состояния обшивки корпуса при его общем изгибе.

На рис. 8 представлено распределение нормальных напряжений, действующих вдоль корпуса в пластинах обшивки днища и борта. Максимальные напряжения зафиксированы в районах горизонтального киля и ширстрека и не превышают 20 МПа. При этом максимальные напряжения, действующие в обшивке вдоль корпуса в районе соединения восстанавливаемой и восстановленной частей обшивки (по линии стыка) возникают в районе 77 шп. правого борта при перегибе корпуса и не превышают 8 МПа (рис. 9).

Результаты расчетов местной прочности позволили выполнить оценку напряженного состояния обшивки корпуса при действии местных нагрузок. Максимальные напряжения, действующие в наружной обшивке вдоль корпуса в районах горизонтального киля и ширстрека, не превышают 100 МПа. Максимальные напряжения, действующие в обшивке поперек корпуса, не превышают 40 МПа. Напряжения вблизи 77 шп. в обшивке правого борта в районе линии стыка не превышают 50 МПа (рис. 10).

Полученные значения напряжений от общего изгиба и от действия местных нагрузок суммировались и сравнивались со значениями, полученными в результате испытаний.

Наиболее опасный участок обшивки борта расположен в районе 77 шп. между ВП и палубой полубака, где при перегибе корпуса действует суммарное растягивающее напряжение 58 МПа. Как отмечено выше, разрушающее напряжение узла стыкового соединения при растяжении, полученное в результате эксперимента, составило 157 МПа. Следовательно, запас прочности стыкового соединения равен 2,7, что удовлетворяет заданным требованиям.

По результатам расчетных исследований была выполнена оценка уровня касательных напряжений, возникающих в обшивке восстановленного корпуса при воздействии на него общего изгиба и местных нагрузок. Зафиксировано, что суммарные максимальные касательные напряжения, действующие в плоскости армирования пластин обшивки, не превышают 40 МПа.

Результаты расчетов показали, что нормальные и касательные напряжения в узлах стыкового соединения не превышают допустимых значений.

Выводы

Результаты проведенных расчетных и экспериментальных исследований позволили разработать технологию восстановления обшивки с использованием отечественного армирующего материала и связующего, а также узлы стыковых соединений восстанавливаемой и восстановленной частей обшивки. Проведенные исследования показали, что прочность обшивки восстановленного после повреждения корпуса из ПКМ обеспечена.

Библиографический список

1. *Алейникова М.В., Федонюк Н.Н.* Исследование процессов развития повреждения и разрушения стыковых соединений из полимерных композиционных материалов и выбор их рационального конструктив

ного оформления // Труды «Крыловского государственного научного центра», выпуск 82, 2014 г.

2. *Ераносян К.С., Маслич Е.А., Федонюк Н.Н.* Оптимизация конструкции корпуса корабля из полимерных композиционных материалов // Труды «Крыловского государственного научного центра», специальный выпуск 2, 2018 г.

Сведения об авторах

Ераносян Карен Спартакович, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Ефимова Ольга Геннадьевна, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Маслич Елена Александровна, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Федонюк Николай Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-47-74. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 01.03.19
Принята в печать / Accepted: 10.04.19
© Коллектив авторов, 2019