

Научная статья
УДК 621.763
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-13-20>

Основные проблемы внедрения методов переработки полимерных композиционных материалов и обеспечения технологических процессов при производстве морской техники

Аким Владимирович Павлов^{1✉}, Константин Николаевич Сахно²

*^{1, 2}Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, pavlov.akim@gmail.com[✉]*

Аннотация. В последние несколько лет наблюдается рост использования полимерных композиционных материалов в сфере производства морской техники. Содержание полимерных композиционных материалов достигает 70 % в объеме деталей и конструкций судов или средств морской техники. Наиболее интенсивный рост применения и внедрения композиционных материалов происходит за рубежом. Выявлена проблема полного или частичного отсутствия исходных армирующих волокон и полимерных матриц российского производства. Обосновывается необходимость определения сдерживающих факторов применения полимерных композиционных материалов в судостроительной отрасли Российской Федерации. Проведено исследование отечественной и зарубежной литературы, отраслевых нормативных документов, использовались дедуктивные методы, анализ и синтез. Рассматривается экосистема подготовки технологического процесса из полимерных композиционных материалов при производстве конструкций и деталей морской техники. Перечислены особенности технологического процесса и приведена формула, описывающая скорость протекания процесса инфузии и определяющая параметры, от которых зависит процесс. Отмечено, что основная документация, регламентирующая применение в судостроении полимерных композиционных материалов, ориентирована на производство 70-х гг. прошлого столетия. В современных условиях конкуренции за заказы и сроки исполнения для проектирования сложных конструкций необходимо применять системы автоматизированного проектирования, способные создавать 3D-модели деталей и конструкций. Определены сдерживающие факторы, оказывающие негативное влияние на развитие технологических процессов переработки и внедрения полимерных композиционных материалов в российском производстве. Результаты исследования в дальнейшем послужат для формирования методических материалов и вариантов проектирования технологических процессов по переработке полимерных композиционных материалов в российской промышленности.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, армирующие волокна, полимерная матрица, связующее, однослойный композитный материал, методы формовки, полимерные композиционные материалы в судостроении, физико-механические свойства полимерных композиционных материалов

Для цитирования: Павлов А. В., Сахно К. Н. Основные проблемы внедрения методов переработки полимерных композиционных материалов и обеспечения технологических процессов при производстве морской техники // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 13–20. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-13-20>.

Original article

Basic problems of introducing methods of processing polymer composite materials and maintaining technological processes in marine equipment production

Akim V. Pavlov^{1✉}, Konstantin N. Sakhno²

*^{1, 2}Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, pavlov.akim@gmail.com*

Abstract. In the past few years there could be seen an increasing use of polymer composite materials in the marine industry. Polymer composite materials reach 70% in the volume of parts and structures of ships and marine equipment. The most intensive growth in the implementation of composite materials can be observed abroad. The problem of complete or partial absence of domestic original reinforcing fibers and polymer matrices is revealed. The necessity

to define the limiting factors for using the polymer composite materials in the shipbuilding industry of the Russian Federation is substantiated. A study of domestic and foreign literature, industry regulations was carried out, in which the deductive methods, analysis and synthesis were used. The ecosystem of organizing the technological process from the polymer composite materials in the production of structures and parts of marine equipment is considered. The specific features of the technological process are listed, and a formula that describes the speed of the infusion process and determines the parameters on which the process depends is given. It has been found that the main documents regulating the use of polymer composite materials in shipbuilding are focused on the production processes in the 1970s. Nowadays, a competitive struggle for the orders and deadlines forces to use computer-aided design systems for creating 3D models of parts and structures in designing complex structures. There have been defined the restraining factors that have a negative impact on the development of technological processes of working up and introducing the polymer composite materials in the national industry. The results of the study will further serve to form methodological materials and options for designing technological processes for the processing of polymer composite materials in the Russian industry.

Keywords: polymer composite materials, reinforcing fibers, polymer matrix, binder, single-layer composite material, molding methods, polymer composite materials in shipbuilding, physical and mechanical properties of polymer composite materials

For citation: Pavlov A. V., Sakhno K. N. Basic problems of introducing methods of processing polymer composite materials and maintaining technological processes in marine equipment production. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;2:13-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-13-20>.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) – это искусственно созданные неоднородные сплошные материалы, состоящие из различных полимерных матриц и волокон. Совмещение армирующих материалов и матрицы образует всегда новую композицию (новый материал), обладающую определенным набором свойств, которые являются отличными от характеристик исходных материалов, вошедших в композицию.

Полученный композиционный материал имеет ряд новых физических свойств, однако механическое поведение нового материала все же определяется соотношением свойств армирующих элементов и свойств полимерной матрицы, образующих между собой прочностные связи.

В России накоплен большой опыт в области создания материалов и технологий изготовления крупногабаритных корпусных конструкций. Для получения результатов были задействованы НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», ЦМКБ «Алмаз», ФГУП «Крыловский государственный научный центр», АО «Средне-Невский судостроительный завод». В рамках разработок были построены несколько проектов кораблей для Министерства обороны. Имеющийся научный и практический задел можно было бы массово использовать и в гражданском судостроении, однако объемы переработки ПКМ на российских судостроительных предприятиях составляют лишь 1,5 % от мирового объема переработки этих материалов. Подобные научные изыскания доступны только для больших предприятий с государственным портфелем заказов. Таким образом, основной сегмент производства небольших судов и яхт из ПКМ до сих пор сосредоточен за рубежом, что очень

заметно, если сравнивать объем предложений судов и катеров из ПКМ зарубежных и российских производителей соответственно.

Важнейшей проблемой накопленного опыта и информации является полное или частичное отсутствие отечественных исходных армирующих волокон и полимерных матриц. Накопленный опыт относится лишь к применению импортных исходных компонентов, которые в настоящее время могут подпасть под санкции на территории РФ. Таким образом, при строительстве кораблей были использованы материалы импортных производителей, таких как Reichhold, Alhstrom, наполнители Airex, Divincel производства Швеции и Швейцарии.

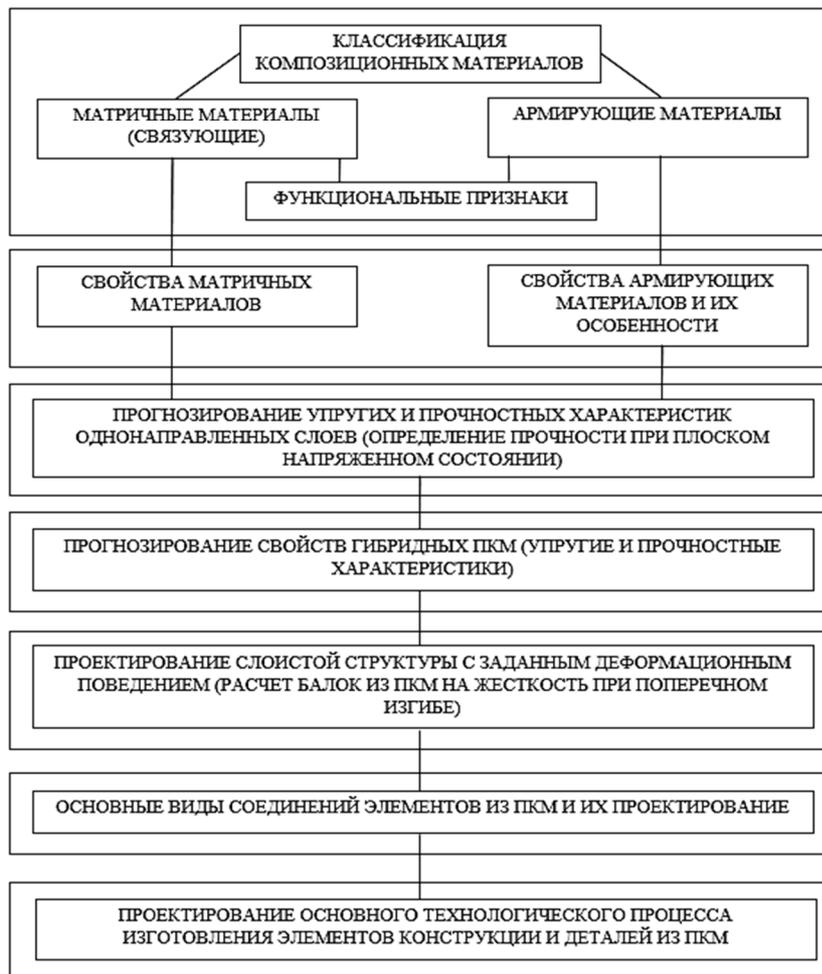
Несмотря на широкую поддержку Минпромторга России до сих пор не удается создать многие аналоги материалов, поскольку современные химические производства в технологическом процессе также используют зарубежные компоненты при производстве. Технологические процессы переработки ПКМ и их свойства в значительной степени зависят от используемых исходных материалов, а создание качественных исходных материалов, даже при наличии научного опыта и методик, требует достаточно длительного времени для выработки рецептур получения исходных материалов и отладки всех технологических циклов и процессов на предприятиях химической отрасли. Таким образом, необходимо безотлагательно начать подготовку специалистов и предприятий, использовать все меры государственной поддержки и массово привлекать университеты и научные сообщества, обладающие необходимыми знаниями и опытом в развитии этого направления [1].

Основные задачи переработки полимерных композиционных материалов

Для подготовки инженера или специалиста, способного качественно спроектировать и определить технологические процессы изготовления деталей и конструкций морской техники, необходимо рассмотреть круг вопросов, связанных с основами механики слоистых ПКМ, т. к. их механические свойства во многом принципиально отличаются от традиционных (изотропных) материалов. Необходимо подробно рассмотреть основы проектирования структур слоистых ПКМ, включая прогнозирование поведения элементов конструкций в процессе эксплуатации, рассмотреть методы расчета стержневых систем из ПКМ на прочность и жесткость, методы расчета соединений элемен-

тов из ПКМ и уделить особое внимание основам технологических процессов изготовления изделий из ПКМ. Подобный круг вопросов связан с тем, что структура ПКМ (марка волокон, связующее, количество слоев, ориентация и др.) проектируется для каждой конкретной детали или конструкции. Принципиальное отличие изготовления деталей и конструкций из ПКМ заключается в том, что деталь и ее свойства формируются одновременно с формированием материала [2].

Современный облик производства морской техники с большим процентом применения и переработки ПКМ должен формировать внутри себя многоуровневую экосистему, представленную на рисунке.



Экосистема подготовки технологического процесса из полимерных композиционных материалов при производстве конструкций и деталей морской техники

Ecosystem for organizing a technological process from polymer composite materials in the production of structures and parts of marine equipment

Pavlov A. V., Sakho K. N. Basic problems of introducing methods of processing polymer composite materials and maintaining technological processes in marine equipment production

Данная схема (рис.) содержит классификацию материалов по связующим и армирующим компонентам отечественного и доступного импортного производства (как пример, импорт из КНР), готовых к массовому применению на серийных заказах в гражданской и оборонной отрасли.

Инженер на производстве или конструктор должен обладать информацией о доступности материалов в соответствии с классификацией и иметь возможность оперативно внести изменения в чертежи при необходимости. Экосистема также должна содержать в себе функциональные признаки этих материалов. Для связующих и армирующих материалов следует четко обозначать их свойства и указывать особенности структур армирующих каркасов. Далее должна быть рассмотрена механика двухкомпонентной системы и спрогнозированы упругие и прочностные характеристики однонаправленного слоя.

Прочность следует рассматривать при плоском напряженном состоянии. На основании полученных данных в дальнейшем можно изучать микромеханику гибридного композита с определением и прогнозированием его упругих и прочностных характеристик. В рамках проектирования слоистой структуры необходимо определить изотропные или анизотропные свойства многослойной структуры, а также рассмотреть частные случаи.

Особенности технологического процесса

Полученный композиционный материал характеризуется комплексом свойств, которыми отдельные компоненты, входящие в состав нового материала, не обладают. Для получения качественного полимерного композитного материала необходимо обеспечить соблюдение технологического процесса, например сохранение в технологическом процессе хорошей смачиваемости всей поверхности распределенного в ней наполнителя без возможности получить дополнительные химические реакции составляющих компонентов и материалов.

Хорошая смачиваемость в технологическом процессе может быть не достигнута из-за отсутствия возможности провести на производстве правильную подготовку материалов, что связано или с недостатком технологического оборудования, или с удешевлением процесса за счет исключения применения моющих составов и поверхностно-активных веществ, или просто исключением этого этапа из процесса.

Также необходимо обеспечить формуемость состава в монолитное изделие. Нарушения могут возникать вследствие низкой квалификации специалистов на производстве или отсутствия точной информации у конструктора о применяемых материалах. Таким образом, в процессе формирования

изделия возникают расслоения, плохая проводимость матричного состава к сложным участкам формы и образование пустот или сухого армирующего материала. Поэтому при разработке технологического процесса применяют и разрабатывают так называемые стратегии (стратегия пропитки), например для метода вакуумной инфузии, где используется математическое моделирование процесса пропитки согласно формуле

$$g = \frac{KS}{\eta} \left(\frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{вакуум}}}{l} \right),$$

где g – скорость инфузии; K – проницаемость пропитываемого материала (например, у армирующего материала из однонаправленных лент проницаемость ниже, чем у тканей с различным переплетением); $P_{\text{атм}}$ и $P_{\text{вакуум}}$ – атмосферное давление и глубина вакуума, Па, МПа, Н/м²; l – расстояние, м, см, мм; η – вязкость смолы, Ст, сСт; S – площадь сечения пропитываемого материала, м², см², мм².

Формула описывает скорость протекания процесса инфузии и определяет параметры, от которых зависит процесс. При конструировании изделий, где сочетаются в одной детали различные физико-механические характеристики, важно иметь представление о свойствах материала и технологических возможностях производства, т. к. в результате изготовления можно получить деталь не с анизотропными свойствами, а с изотропными.

После расчетов по методикам, приведенным в [3–6], и разработки принципиальных технологических процессов, в зависимости от изготавливаемых деталей и конструкций (объемные или плоские секции, узлы крепления и др.), необходимо изготовить макеты отдельных узлов или их фрагментов для проведения испытаний.

Следующий этап нацелен на разработку требований к приемке и методов контроля качества изготавливаемых конструкций и изделий. Этот этап, по мнению специалистов, также сопряжен с проблемами отсутствия ГОСТов и систем сертификации и контроля качества. Основная документация, регламентирующая применение ПКМ в судостроении (ОСТ 5.9310-78, РД 5.0401-85, ГОСТ РВ 15.203-2001), отражает материалы, технологии, методики испытаний периода 70-х гг. Указанная документация разработана и ориентирована на изготовление заказов Минобороны и под производственные цепочки промышленности 70-х гг., в ней не учитываются особенности создания многослойных и гибридных ПКМ, а также отсутствует регламент проведения испытаний [7–9].

Задача испытания материалов из ПКМ является одной из наиболее важных во многих отраслях машиностроения. Для достижения наибольшей

достоверности результатов проверки физико-механических свойств материала необходимо детально описать процесс разрушения полученного материала в динамическом состоянии. Необходимо создать такое программное обеспечение, которое будет способно накапливать данные экспериментальных процессов и в дальнейшем обеспечивать проектировщика анализом результатов испытаний и целесообразности применения полученного ПКМ и возможных вариантов замены традиционных материалов.

Системы автоматизированного проектирования. Проектирование деталей из полимерных композиционных материалов

В настоящее время рыночная экономика накладывает серьезные ограничения на сроки выполнения задач по проектированию. Это связано с жесткими условиями конкурентной борьбы за заказы и сроки их исполнения. Поэтому для проектирования сложных конструкций, состоящих из сотен и тысяч деталей, применяют современные системы автоматизированного проектирования (САПР). Современные САПР представляют собой многоуровневые сложные модульные системы как для построения математических моделей, так и для определения поведения этих моделей в режиме различных симуляций.

До недавнего времени в качестве примера основных и доступных САПР можно привести такие программные пакеты, как Inventor и Revit компании AUTODESK, SolidWorks и CATIA французской компании Dassault Systemes, универсальную программную систему конечно-элементного анализа ANSYS, созданную американской компанией под одноименным названием, систему твердотельного поверхностного моделирования Solid Edge производства компании Siemens PLM Software, систему CADMATIC, предназначенную для судостроения. Можно говорить о том, что практически вся отечественная промышленность, связанная с машиностроительной отраслью, использовала в большинстве случаев вышеперечисленные иностранные средства проектирования.

В сложившейся ситуации промышленность в РФ подпадает под обширные санкции с запретом на использование и обновление вышеуказанного программного обеспечения. После введения западных санкций власти России обсуждают возможность отмены уголовной и административной ответственности за использование нелегального программного обеспечения [10].

Следует отметить, что в вышеуказанных САПР при расчетах и симуляциях использовались уже известные материалы с заданными характеристиками от известных поставщиков и производителей.

Во всех САПР при проектировании можно выделить несколько функциональных уровней при проектировании технических объектов, при этом основными будут являться функциональный, технологический и конструкторский уровни. Для понимания проблематики внедрения переработки и конструирования деталей из ПКМ особое внимание следует уделить конструкторскому уровню. На этом уровне формируются требования к материалам и их свойствам, которые закладываются при создании 3D-модели, весь жизненный цикл испытываемой механические нагрузки. Таким образом, обеспечение требуемой конструкционной прочности является одним из необходимых условий работоспособности и надежности разрабатываемой детали. Для соблюдения этих условий в первую очередь необходимо правильно выбрать исходные материалы, которые будут обладать требуемыми физико-механическими характеристиками. Учитывая, что САПР располагает возможностями широкого выбора различных вариантов конструкционных материалов с различными характеристиками прочностных и иных свойств, выявляется потребность применения автоматизированного решения задач по выбору элементов и материалов по критериям физико-механических свойств исходных материалов.

Таким образом, существует необходимость создания баз данных и информационно-поисковых систем с возможностью ручного и автоматического выбора конструкционных элементов по критериям физико-механических свойств. Данная система должна накапливать не только объем и свойства исходных материалов для создания ПКМ, но и иметь систему сбора данных, получаемых при прочностных исследованиях материалов с их математическим моделированием физико-механических свойств.

Основные преимущества ПКМ, такие как высокая коррозионная стойкость, малый удельный вес, физико-механические характеристики, превосходящие и сравнимые с прочностью металлов и сплавов, явились основной движущей силой в прогрессе по замене металлов в разработке технических систем.

Учитывая многообразие существующих и появляющихся на рынке новых исходных материалов для получения ПКМ, можно говорить о том, что их механические характеристики будут всегда основным и недостаточно изученным вопросом. Обозначенная важность задачи сегодня практически не изучена в объеме, позволяющем промышленности быстро перейти на производство неметаллических конструкций, которые до сих пор исследуются способами, не соответствующими международным стандартам (при недостаточном объеме отечественных стандартов), а автоматизация процессов пере-

работки недостаточно автоматизирована и не исключает в большинстве случаев человеческий фактор. Возникшую проблему, которая характеризуется, с одной стороны, большим объемом новых исходных материалов для ПКМ и стремительным мировым ростом информации о новых конструкторских и технологических решениях, а с другой – предельно низким уровнем технического оснащения производств, наличием морально устаревшего и физически изношенного оборудования российской промышленности, можно решать только с помощью внедрения автоматических систем и компьютерных технологий.

В качестве примера более ясного понимания проблематики можно привести создание деталей и конструкций в САПР Inventor и SolidWorks. Имея некоторый опыт в создании деталей и конструкций в этих САПР, можно отметить важную особенность, которая состоит в способах задания механических свойств и определения материала создаваемой детали. Здесь мы имеем дело с уже известными материалами и их свойствами, а построение детали из нового ПКМ является фактически неопределяемой и невозможной задачей ввиду отсутствия характеристик многослойного ПКМ и его структуры с полученными физико-механическими свойствами. Выбор рациональной модели многослойного ПКМ, позволяющий сделать оценку прочности посредством учета неоднородности деформаций сдвига, сводится к созданию локальной твердотельной сетки, которая впоследствии имитируется сплошной однородной средой с соответствующими эффективными характеристиками. Таким образом, многослойный пакет ПКМ относится к категории моделей на базе твердотельной аппроксимации, поскольку однородная система требует меньше ресурсов. Иными словами, исследование сводится к определению механических свойств монолитного материала с заданными параметрами осей анизотропии относительно системы координат, связанной с оболочкой или неким объектом проектирования. При этом для начала проектирования детали или конструкции в САПР требуется полный набор характеристик ортотропного материала в трехмерной постановке.

Можно с уверенностью сказать, что перед построением 3D-моделей деталей и конструкций в САПР необходимо иметь начальное представление о физико-механических свойствах ПКМ. В рамках этой задачи разрабатывается методика и программное обеспечение для решения вопросов механики композиционных материалов, позволяющее перед построением моделей в САПР определить параметры прочности, жесткости, устойчивости и долговечности ПКМ с подробным описанием свойств многослойного пакета, из которого состо-

ит ПКМ с характеристиками используемых армирующих материалов и вариантами укладок слоев. Основой методики является изучение механического поведения ПКМ на уровне микромеханики, который включает структуру композитов на уровне размеров волокон, помещенных в матрицу. Главная задача методики заключается в определении связи между эффективными модулями упругости и свойствами компонентов. Согласно методике вычисляются эффективные модули упругости и коэффициенты Пуассона, благодаря чему появляется возможность дальнейшего аналитического исследования на уровне слоистого тела ПКМ. При этом многослойный материал рассматривается как однородное анизотропное тело, состоящее из множества однонаправленных слоев с определенной ориентацией под разными углами относительно друг друга. А совместная работа слоев предполагает, что между армирующими волокнами и связующим существует жесткое сцепление. Благодаря этой методике в рамках проектирования деталей и конструкций на ранних стадиях можно одновременно определить последовательности в технологическом процессе или вносить на самых ранних этапах проектирования корректировки в подбор армирующих и связующих материалов относительно технических возможностей производства [11].

Анализ изученных материалов выявил, что проектирование технологического процесса находится в тесной зависимости на всех уровнях и стадиях принятия решений по выбору материалов, экспериментальных исследований простых однонаправленных слоев ПКМ, численных исследований, режимов и методов изготовления (формования) деталей и конструкций. Параллельно с решением этих задач необходимо также сформировать и провести численные исследования модели судна и ее отдельных деталей и конструкций на прочность и наличие напряженно-деформированного состояния.

Заключение

Основные сдерживающие факторы внедрения технологий и процессов переработки ПКМ при производстве морской техники: отсутствие компаний, готовых внедрять процессы переработки ПКМ; отсутствие механизма поддержки частных верфей (закупка и оснащение оборудованием); низкий спрос на гражданскую продукцию из ПКМ; отсутствие или ограниченность возможности производства химической продукции на предприятиях РФ; отсутствие российских производителей технологического оборудования для переработки ПКМ; отсутствие современной нормативной документации; описание методов и технологий, основывающихся на материалах и методиках производства 70-х гг.; применение иностранных САПР с заранее

заложенными свойствами материалов от иностранных производителей и поставщиков.

Отдельно необходимо отметить дефицит или полное отсутствие квалифицированных кадров на всех уровнях отрасли. В большинстве вузов отсутствует подготовка специалистов по конструированию и изготовлению изделий из композитных материалов. В рамках подготовки специалистов по ПКМ рекомендуется более глубокое изучение дисциплин по основам механики, проектированию и изготовлению изделий из композиционных материалов. Необходимо внести уточнения в учебные пособия относительно полученного актуального опыта применения современных материалов, где

концентрированно содержались бы сведения и типовые методики определения свойств получаемых ПКМ из новых исходных материалов.

Для больших судостроительных заводов и частных верфей на основании уже имеющегося опыта необходимо разработать стандарты по созданию деталей и конструкций ПКМ в рамках отрасли, где четко сформулировать подходы и методики создания ПКМ, определить возможные варианты разработки технологических процессов с привязкой к доступным и недорогим материалам, создать альбомы и правила для конструирования деталей и конструкций судов из ПКМ с указанием регламента сертификации разработок и их внедрения.

Список источников

1. Никитин В. С., Половинкин В. Н. Современное состояние и перспективы применения композитов в зарубежном подводном кораблестроении // Тр. Крылов. гос. науч. центра. 2017. № 4 (328). С. 57–74.
2. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 118 с.
3. Первушин Ю. С., Жернаков В. С. Проектирование и прогнозирование механических свойств однонаправленного слоя из композиционного материала: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2002. 127 с.
4. Первушин Ю. С., Жернаков В. С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. 303 с.
5. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
6. Немировский Ю. В., Резников Б. С. Прочность элементов конструкций из композитных материалов. Новосибирск: Наука, 1986. 166 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVI. Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов. СПб.: Изд-во РМРС, 2019. 151 с.
8. ОСТ 5.9310-78. Стеклопластики конструкционные для корпусов кораблей и судов. Правила приемки (утв. 30.11.1978). М.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1979. 77 с.
9. Половинкин В. Н. Перспективные конструкционные материалы для специальной морской техники, судостроения и военного кораблестроения. Ч. 1. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=5778> (дата обращения: 16.02.2022).
10. Свиридайллов Г. В России могут легализовать пиратское ПО. URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/03/05/17382919.shtml?updated> (дата обращения: 10.03.2022).
11. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК-Пресс, 2015. 562 с.

References

1. Nikitin V. S., Polovinkin V. N. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniia kompozitov v zarubezhnom podvodnom korablestroenii* [Current state and prospects for the use of composites in foreign submarine shipbuilding]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2017, no. 4 (328), pp. 57-74.
2. Bondaletova L. I., Bondaletov V. G. *Polimernye kompozitsionnye materialy (chast' 1): uchebnoe posobie* [Polymer composite materials (Part 1): textbook]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2013. 118 p.
3. Pervushin Iu. S., Zhernakov V. S. *Proektirovanie i prognozirovaniye mekhanicheskikh svoystv odnonapravlenogo sloia iz kompozitsionnogo materiala: uchebnoe posobie* [Design and prediction of mechanical properties of unidirectional layer from composite material: textbook]. Ufa, Izd-vo UGATU, 2002. 127 p.
4. Pervushin Iu. S., Zhernakov V. S. *Osnovy mekhaniki, proektirovaniia i tekhnologii izgotovleniia izdelii iz sloistykh kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie* [Fundamentals of mechanics, design and manufacturing technology of products from layered composite materials: textbook]. Ufa, Izd-vo UGATU, 2008. 303 p.

5. Alfutov N. A., Zinov'ev P. A., Popov B. G. *Raschet mnogosloinykh plastin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of multilayer plates and shells from composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 264 p.
6. Nemirovskii Iu. V., Reznikov B. S. *Prochnost' elementov konstruktssii iz kompozitnykh materialov* [Strength of structural elements made of composite materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 166 p.
7. *Pravila klassifikatsii i postroiiki morskikh sudov. Part XVI. Konstruktsiia i prochnost' korpusov sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Rules for classification and construction of sea vessels. Part XVI. Design and strength of ship hulls made of polymer composite materials]. Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2019. 151 p.
8. ОСТ 5.9310-78. *Stekloplastiki konstruktssionnye dlia korpusov korablei i sudov. Pravila priemki (utv. 30.11.1978)* [OST 5.9310-78. Structural fiberglass for ship and vessel hulls. Acceptance rules (approved on November 30, 1978)]. Moscow, TsNII imeni akademika A. N. Krylova, 1979. 77 p.
9. Polovinkin V. N. *Perspektivnye konstruktssionnye materialy dlia spetsial'noi morskoi tekhniki, sudostroeniia i voennoyo korablestroeniia* [Perspective structural materials

for special marine equipment, merchant and navy shipbuilding]. Part 1. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=5778> (accessed: 16.02.2022).

10. Svidrigailov G. *V Rossii mogut legalizovat' piratskoe PO* [Hacked software may be legalized in Russia]. Available at: [https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/03/05/17382919.](https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/03/05/17382919.shtml?updated)

[shtml?updated](https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/03/05/17382919.shtml?updated) (accessed: 10.03.2022).

11. *Aliamovskii A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyi analiz dlia professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering Analysis for Professionals: Tasks, Methods, Recommendations]. Moscow, DMK-Press, 2015. 562 p.

Статья поступила в редакцию 10.03.2022; одобрена после рецензирования 14.04.2022; принята к публикации 22.04.2022
The article was submitted 10.03.2022; approved after reviewing 14.04.2022; accepted for publication 22.04.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Аким Владимирович Павлов – аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; pavlov.akim@gmail.com

Akim Vladimirovich Pavlov – Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; pavlov.akim@gmail.com

Константин Николаевич Сахно – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; k.sakhno@mail.ru

Konstantin Nikolaevich Sakhno – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering; Astrakhan State Technical University; k.sakhno@mail.ru

