

УДК 629.12
EDN PCFBYU

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СУДОСТРОЕНИИ

Т.В. Косырева (Князюк), канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: mail@crism.ru

О.В. Фомина, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: mail@crism.ru

А.В. Ильин, д-р техн. наук, доцент, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: mail@crism.ru

С.М. Кордонец, главный специалист-эксперт, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

В представленной обзорной статье выполнен комплексный анализ современного состояния, технологических возможностей и перспектив внедрения аддитивного производства (АП) в судостроительной отрасли. Обзор включает систематизацию и сравнительный анализ мирового и российского опыта применения аддитивных технологий с акцентом на идентификацию наиболее востребованных материалов и технологических решений для производства и ремонта судовых компонентов. Особое внимание уделено металлургическим аспектам АП: детально исследованы особенности формирования структуры и комплекса свойств металлических материалов, синтезированных аддитивными методами. Рассмотрены характерные типы дефектов, присущие аддитивному производству, и предложены научно обоснованные пути их минимизации и управления качеством. В работе систематизированы ключевые технологические ограничения, экономические и нормативные барьеры, сдерживающие внедрение АП в судостроении, а также разработаны стратегические инициативы и направления для их преодоления, базирующиеся на развитии нормативной базы, материаловедения и технологий постобработки. Показано, что дальнейшая эволюция аддитивных технологий и сопутствующей материаловедческой базы способна трансформировать традиционные подходы к проектированию и изготовлению изделий судового машиностроения. Это создает предпосылки для существенного повышения эксплуатационной эффективности судов, сокращения сроков и стоимости производства, а также оптимизации логистики запасных частей на всех этапах жизненного цикла судостроительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-печать, судостроение, стали и сплавы, стандартизация.

Для цитирования: Косырева (Князюк) Т.В., Перспективы развития аддитивного производства в судостроении / Т.В. Косырева (Князюк), О.В. Фомина, А.В. Ильин, С.М. Кордонец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 144–158. — EDN PCFBYU.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING IN SHIPBUILDING

T.V. Kosyreva (Knyazyuk), PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: mail@crism.ru

O.V. Fomina, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: mail@crism.ru

A.V. Il'in, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: mail@crism.ru

S.M. Kordonets, Chief Specialist-Expert, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

This review article provides a comprehensive analysis of the current status, technological capabilities, and prospects for the implementation of additive manufacturing (AM) in the shipbuilding industry. It systematizes and compares global and Russian experience with additive technologies, focusing on identifying the most in-demand materials and technological solutions for the production and repair of ship components. Particular attention is paid to the metallurgical aspects of AM: the structural formation and properties of metallic materials synthesized using additive methods are examined in detail. The paper examines the typical defect types inherent in additive manufacturing and proposes scientifically based approaches to minimizing them and managing quality. The paper systematizes the key technological limitations, economic, and regulatory barriers hindering the implementation of additive manufacturing in shipbuilding, and develops strategic initiatives and approaches for overcoming them, based on the development of the regulatory framework, materials science, and post-processing technologies. It has been demonstrated that the further evolution of additive technologies and the associated materials science framework has the potential to transform traditional approaches to the design and manufacture of marine engineering products. This paves the way for significantly improving the operational efficiency of ships, reducing production time and costs, and optimizing spare parts logistics throughout all stages of the shipbuilding product lifecycle.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, shipbuilding, steels and alloys, standardization.

For citation: Kosyreva (Knyazyuk) T.V., Fomina O.V., Il'in A.V., Kordonets S.M. Prospects for the development of additive manufacturing in shipbuilding. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 144–158. EDN PCFBUY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивным производством (АП), «additive manufacturing», называют процессы 3D-печати изделий или заготовок согласно разработанной компьютерной модели. На сегодняшний день существует более 10 видов технологий АП, и они не перестают развиваться. Наибольший интерес к АП проявили такие области промышленности, как автомобилестроение и авиастроение, для которых снижение веса деталей приводит к экономии топлива и, соответственно, снижению углеродного следа [1, 2]. Активно развивается АП в атомной энергетике. Повышенный интерес к технологиям АП проявляют ученые из медицинских организаций, поскольку технологии 3D-печати позволяют изготавливать уникальные природоподобные материалы, протезы и ткани [3]. Аналитические сервисы прогнозируют увеличение рынка АП до 41,6 млрд долл. в мире и до 13 млрд руб. в 2026 г. в РФ.^{1, 2}

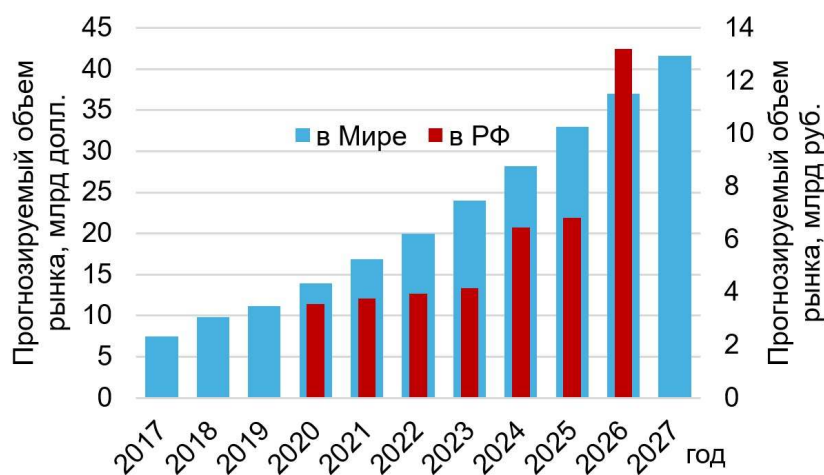


Рис. 1. Состояние и прогноз объема мирового и российского рынка АП

Как отмечают авторы [4], современное состояние российского судостроения характеризуется значительным отставанием от ведущих стран мира: удельная трудоемкость производства в отрасли в 3–5 раз выше, чем за рубежом, а продолжительность постройки судов в 2–3 раза дольше. Износ металлообрабатывающего оборудования достигает 70 %, а доля ручного труда остается высокой. В этих условиях особенно актуальным становится поиск путей технологической модернизации и повышения эффективности производства.

Однако преимущества АП, к которым главным образом относятся сокращение технологической цепочки изготовления деталей сложной формы (рис. 2) и увеличение коэффициента использования материала (КИМ), будут востребованы и в судостроении [4–8]. Технологии АП могут быть эффективны для изготовления и ремонта запасных частей деталей корабля (судна), в том числе топологически оптимизированных деталей, которые не могут быть изготовлены или изготавливаются с большим процентом брака традиционными методами литья или деформации; для создания прототипов и макетов кораблей или узлов; для оптимизации логистических цепочек материалов и полуфабрикатов. Следует отметить, что методы АП перспективны для производства изделий из биметаллов с градиентным переходом от одного материала к другому, что может повысить твердость и прочность отдельных фрагментов изделия [9, 10].

¹ Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство. — [Электронный ресурс] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv> (дата обращения 25.02.2025).

² Ассоциация развития аддитивных технологий (АРАТ). — [Электронный ресурс] URL: <https://aard.ru/> (дата обращения 25.02.2025).



Рис. 2. Сравнение технологических цепочек изготовления деталей традиционным и аддитивным методами

Внедрение АП в судостроение в перспективе позволит снизить затраты на производство некоторых деталей и сроки изготовления судов в целом, ускорить внедрение новых конструкторских решений. Конечно, следует отметить, что судостроение является металлоемкой отраслью, а условия эксплуатации требуют особых свойств материалов, поэтому должны быть разработаны соответствующие стандарты и правила для проведения испытаний новых материалов [4, 7]. АП в российском судостроении начало свой путь относительно недавно, реперной точкой в его истории можно назвать 2020 г., именно в это время была разработана первая редакция главы 11 «Продукты аддитивного производства» части XIII Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [11], устанавливающих требования к материалам и изделиям, изготовленным методами АП.

Цель данной статьи — выполнить обзор и анализ современного состояния, технологических возможностей, вызовов и перспектив внедрения аддитивного производства в отрасли судостроения. Для этого в работе рассмотрены основные технологии и материалы для 3D-печати с учетом их применимости в судостроении, затем рассмотрены особенности структуры и свойств металлических материалов, приведены примеры использования аддитивных технологий за рубежом и на территории Российской Федерации, в заключении предложены основные направления развития.

1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аддитивные технологии были опробованы в 1986 г. с созданием опытных образцов методом стереолитографии (SLA). Несмотря на относительную новизну, АП характеризуется интенсивным развитием и в настоящее время включает более 10 технологических модификаций (табл. 1). Современные методы АП стали неотъемлемым компонентом технологической платформы «Индустрия 4.0», находя практическое применение в различных отраслях промышленности [1, 2, 4, 12].

В судостроительной отрасли приоритет отдается аддитивным технологиям, ориентированным на работу с металлическими материалами, таким как селективное лазерное плавление (СЛС, SLM), прямое лазерное выращивание (ПЛВ, DMD) и проволоочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) [7, 9, 10, 13]. Технологии на основе полимеров, в частности моделирование методом наплавления (FDM/FFF), представляют интерес в меньшей степени и применяются главным образом для изготовления вспомогательной оснастки, прототипирования и ненагруженных элементов [14, 15].

Основными формами исходного сырья для металлического АП являются металлопорошковые композиции (МПК) и в меньшей степени проволока и ленты. Производство МПК осуществляется преимущественно методами газового или плазменного распыления расплава [3, 8, 16]. Центробежное распыление и гидрораспыление применяются реже. Полученные порошки подвергаются фракционированию для обеспечения требуемой granulometрии.

Таблица 1

Основные технологии АП			
№	Название технологии	Краткое описание технологии	Материалы/вид сырья
Металлы			
1	PBF-LB (или SLM, Selective Laser Melting) — синтез на подложке лазерным лучом / селективное лазерное сплавление (СЛС)	Полное расплавление металлического порошка лазером	Металлические порошки (стали, титановые, алюминиевые сплавы)
2	PBF-EB — синтез на подложке электронным лучом / электронно-лучевая плавка	Полное расплавление металлического порошка электронным лучом в вакууме	Металлические порошки (стали, титановые, сплавы: алюминиевые, никелевые, кобальт-хромовые)
3	Directed Energy Deposition (DED) — прямая подвод энергии и материала. Имеет следующие разновидности:	Энергия (лазерный луч, электронный луч, плазменная или электрическая дуга) подается непосредственно в зону наплавки, куда одновременно подается материал в виде порошка или проволоки	Металлические порошки и проволока
3.1	DED-LB (или DMD, Direct Metal Deposition) — лазерная наплавка	Наплавление металлического порошка в пятне лазера	Металлические порошки и проволока
3.2	DED-EB (или EBM, Electron Beam Melting) — электронно-лучевая наплавка	Наплавка материала в вакууме электронным лучом	Металлические порошки
3.3	DED-PA — плазменная наплавка	Наплавка материала с использованием плазменной дуги высокой энергии	Проволока
3.4	DED-GTA — газовая вольфрамовая дуговая наплавка	Наплавка материала с использованием электрической дуги, возникающей между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием, в среде защитного газа (обычно аргона)	Проволока
3.5	DED-GMA (или WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) — газовая металлическая дуговая наплавка	Наплавление металла сварочной дугой и проволочным электродом	Металлическая проволока (стали, алюминиевые сплавы)
Неметаллы			
1	FDM/FFF (Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication) — моделирование методом наплавления	Послойное наплавление термопластичной нити через экструдерную головку	Полимеры (ABS, PLA, нейлон, ПЭЭК)
2	SLS (Selective Laser Sintering) — селективное лазерное спекание	Послойное спекание порошка лазером без полного плавления ³	Полимерные порошки (нейлон, ПА)
3	SLA (Stereolithography) — стереолитография	Послойное отверждение жидкого фотополимера ультрафиолетовым лазером ⁴	Фотополимерные смолы
5	DLP (Digital Light Processing) — цифровая обработка светом	Отверждение фотополимера целого слоя проектором	Фотополимерные смолы
6	MJF (Multi Jet Fusion) — многоструйное спекание	Нанесение спекающего агента на порошок с последующим спеканием	Полимерные порошки (нейлон, ПА)
7	Binder Jetting — струйное нанесение связующего	Склеивание частиц порошка связующим с последующим спеканием	Порошки (гипс, песок, металлы, керамика)
8	Material Jetting — струйная печать материалом	Послойное нанесение капель фотополимера с УФ-отверждением ⁵	Фотополимерные смолы
9	LOM (Laminated Object Manufacturing) — производство ламинированных объектов	Послойное склеивание и вырезание контуров из листового материала	Листовые материалы (бумага, полимеры, фольга)
Металлы и неметаллы			
1	Binder Jetting — струйное нанесение связующего	Склеивание частиц порошка связующим с последующим спеканием	Порошки (гипс, песок, металлы, керамика)

³ Технология селективного лазерного спекания (SLS) в 3D-печати. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/sls-3d-printing.html> (дата обращения 27.02.2025).

⁴ Стереолитография (SLA) в 3D-печати. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/stereolitografiya-3d-pechati.html> (дата обращения 27.02.2025).

⁵ Технология струйного нанесения материала (Material Jetting). — URL: <https://industry3d.ru/handbook/tehnologii-3d-pechati/tehnologii-i-materialy-3d-pechati/struynoe-nanesenie-materiala-podacha-po-trebovaniiyu-material-jetting-dod/tehnologiya-struynogo-naneseniya-materiala> (дата обращения 27.02.2025).

К материалам, пригодным для АП, предъявляются специфические требования: высокая свариваемость, пониженная теплопроводность и ограниченная склонность к окислению. Этим критериям удовлетворяют нержавеющие и жаропрочные стали, а также титановые и алюминиевые сплавы [1, 16]. Использование бронзы и латуни в лазерной 3D-печати сопряжено с трудностями из-за их высокой отражательной способности и теплопроводности. Преодоление данного технологического барьера требует оптимизации химического состава сплавов и режимов энергетического воздействия. Наиболее перспективные для применения в судостроении материалы, их свойства и потенциальные области использования систематизированы в табл. 2.

Таблица 2

Наиболее перспективные материалы для АП лазерными и лучевыми методами

Материалы	Ключевые свойства и преимущества	Наиболее вероятные изделия в судостроении
Нержавеющие аустенитные стали (08X18H10T и аналоги)	Коррозионная стойкость, хорошая свариваемость	Сложные детали трубопроводов, штоки задвижек, корпуса насосов, фитинги
Азотсодержащие высокопрочные аустенитные стали (04X20H6Г11M2АФБ и аналоги)	Высокая прочность и вязкость, стойкость к кавитации	Гребные винты, элементы судовой арматуры, ответственные кронштейны
Нержавеющие мартенситные стали (08X14HДЛ, 06X15H4ДМЛ и аналоги)	Высокая твердость, прочность, износостойкость	Гребные винты, импеллеры насосов, валы, другие изнашиваемые детали
Титановые сплавы	Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость	Гребные винты, теплообменники, легкие корпусные конструкции, детали для агрессивных сред
Алюминиевые сплавы	Низкая плотность, хорошая обрабатываемость	Легкие конструкции, корпусные детали, элементы палубного оборудования, арматура
Бронзы	Антифрикционные свойства, коррозионная стойкость	Вкладыши подшипников, втулки, уплотнительные кольца, элементы гребных винтов
Высокопрочные полимеры (ПА, ПЭЭК, ППС и др.)	Низкая плотность, стойкость к химическому воздействию, диэлектрические свойства	Крыльчатки вентиляторов, корпуса приборов, воздухопроводы, изоляторы, элементы интерьера, прототипирование оснастки

2. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Стали и сплавы, синтезированные методами аддитивного производства, характеризуются формированием специфической структуры, существенно отличающейся от структуры материалов, полученных традиционными способами [1–3]. Указанные структурные отличия являются следствием термодинамических условий процессов АП, главным образом — экстремально высоких скоростей нагрева и охлаждения, действующих в зоне формирования расплава, а также определяются качественными характеристиками исходного сырья (МПК или проволоки) [16–18]. В табл. 3 систематизированы ключевые морфологические особенности структуры аддитивно произведенных сталей и сплавов, а также обусловленные ими характерные закономерности механического поведения [2, 3, 18]. На рис. 3 приведена структура нержавеющей стали марки 08X18H10T, полученной методом ПЛВ, при разных увеличениях [18].

Таблица 3

Особенности структуры и свойств металлических материалов, полученных методами АП

Особенности микроструктуры и состояния	Причины формирования	Влияние на свойства материала
Дендритно-ячеистая структура	Экстремально высокая скорость кристаллизации (10^3-10^6 К/с) и значительный тепловой градиент	Повышение предела прочности и предела текучести за счет дисперсной структуры
Междендритная сегрегация легирующих элементов	Неравновесность процессов кристаллизации, характерная для дендритно-ячеистого строения	Неоднородность свойств: возможное снижение ударной вязкости и коррозионной стойкости в обогащенных примесями зонах
Повышенная плотность дислокаций	Высокие скорости охлаждения «замораживают» неравновесные дефекты кристаллической решетки	Дисперсионное упрочнение; высокие остаточные термические напряжения, способствующие деформации и короблению, высокая прочность
Высокая плотность наноразмерных неметаллических включений (оксиды, нитриды)	Взаимодействие расплава с остаточными газами (O_2 , N_2) в камере построения или примесями в исходном сырье	Дисперсионное упрочнение, повышение прочности; возможное снижение пластичности и усталостной прочности
Мелкозернистая структура	Высокие скорости охлаждения расплава и закристаллизовавшегося металла, действующие как ограничитель роста зерна	Совместное повышение прочностных характеристик, пластичности и ударной вязкости (в соответствии с законом Холла — Петча)
Анизотропия структуры	Направленный характер теплоотвода (эпитаксиальный рост), слоистость построения, ориентация дендритов и дефектов вдоль направления сканирования	Анизотропия механических свойств
Наличие технологических дефектов (поры, непровары, горячие микротрещины)	Неоптимальные режимы энергетического воздействия (мощность, скорость), некачественное сырье, загрязнение порошка или среды камеры построения	Снижение статической и циклической прочности, вязкости, пластичности и коррозионной стойкости

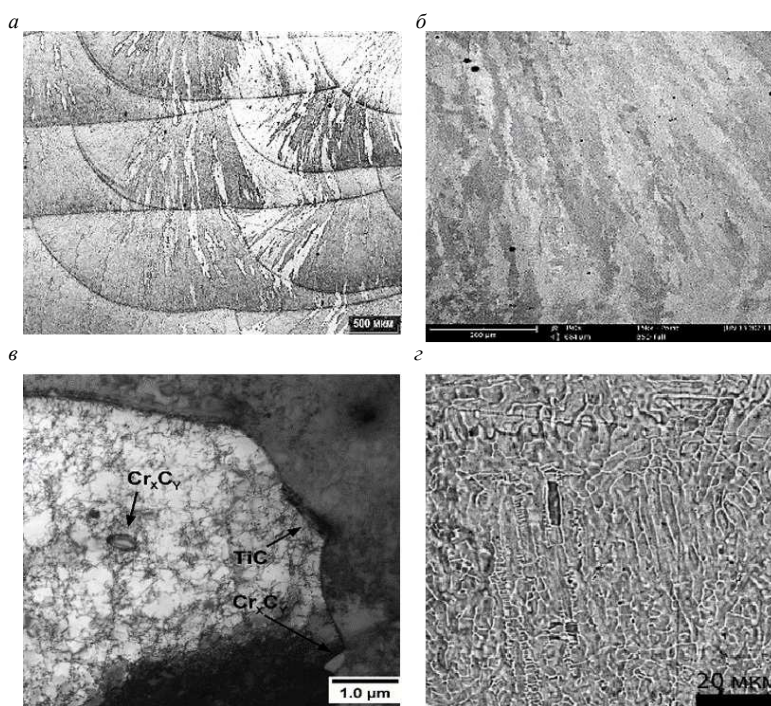


Рис. 3. Микроструктура нержавеющей стали марки 08X18H10T, изготовленной аддитивным методом ПЛВ:
a — $\times 50$; *b* — $\times 200$; *v* — $\times 5000$; *z* — $\times 20\,000$

Стали и сплавы, синтезированные аддитивными методами, характеризуются комплексом структурных особенностей, определяющих их эксплуатационные характеристики. Для данных материалов характерно повышение статической прочности, в то время как уровень пластичности может варьироваться в широких пределах — как уступая показателям аналогов, полученных традиционными способами, так и превосходя их [17, 18]. Ключевой особенностью является анизотропия структуры, обусловленная слоистым характером построения и направленным тепловым воздействием. Основными механизмами упрочнения выступают формирование дисперсных дендритно-ячеистых структур и дисперсионное упрочнение наноразмерными неметаллическими включениями [1, 16, 18]. Наряду с этим, такие критически важные свойства, как ударная вязкость, пластичность, циклическая долговечность и коррозионная стойкость, в значительной степени лимитируются наличием макро- и микродефектов (поры, непровары, трещины) [2, 3, 17]. Минимизация дефектообразования представляет собой одну из приоритетных задач современных научных исследований в области аддитивных технологий. К основным стратегиям управления структурой и снижения дефектности относятся:

1) оптимизация параметров энергетического воздействия. Целенаправленный подбор режимов сканирования (мощность лазера/электронного луча, скорость, шаг, стратегия) и толщины слоя позволяет управлять термическими циклами и минимизировать термические напряжения, тем самым снижая вероятность возникновения дефектов;

2) повышение качества исходного сырья. Использование металлопорошковых композиций (МПК) и проволоки с высокой химической чистотой, однородной гранулометрией (для МПК) и стабильным геометрическим сечением (для проволоки) является необходимым условием для получения плотных и бездефектных материалов;

3) строгий контроль атмосферы процесса. Поддержание регламентированного состава защитной атмосферы (например, содержание кислорода < 100 ppm) и стабильных температурных условий в камере построения позволяет эффективно подавлять процессы окисления и минимизировать пористость.

Отдельной задачей является устранение анизотропии структуры и свойств, которая может оказывать негативное влияние на работоспособность изделий, испытывающих сложнапряженное состояние. Для ее снижения применяются методы последующей постобработки. Термическая обработка, включая отжиг для рекристаллизации и снятия остаточных напряжений, а также режимы закалки и отпуска для сталей мартенситного класса, является обязательным этапом для достижения требуемого комплекса свойств [17, 18]. Горячее изостатическое прессование (ГИП) эффективно устраняет внутреннюю микропористость, обеспечивая практически 100%-ную плотность материала за счет диффузионного «залечивания» пор под совместным воздействием высокого давления и температуры [2, 3, 16].

Следовательно, материалы, полученные методами АП, обладают уникальным сочетанием преимуществ и недостатков, обусловленных спецификой их синтеза. Анизотропия и наличие дефектов могут быть успешно нивелированы за счет комплексного подхода, включающего оптимизацию параметров построения и последующей обработки.

3. ТЕКУЩИЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРОВОМ СУДОСТРОЕНИИ

Мировой опыт внедрения аддитивных технологий (АТ) в судостроение демонстрирует их растущую значимость для оптимизации производственных процессов, создания инновационных конструкций и сокращения логистических издержек [4, 7, 9, 10]. К настоящему моменту сформировались несколько направлений применения АТ, подтвержденных успешными примерами ведущих отраслевых компаний и поддержанных развитием нормативной базы со стороны классификационных обществ.

3.1. Производство функциональных компонентов

Наиболее распространенным применением АТ является изготовление сложнофункциональных и уникальных деталей, производство которых традиционными методами нерентабельно или технологически затруднено [4, 5, 7, 9, 10].

Элементы движителей. Одним из наиболее распространенных применений 3D-печати в мировом судостроении является производство сложных и уникальных компонентов. Например, компания Damen Shipyards Group использует 3D-печать для создания металлических винтов, что позволяет значительно

сократить время и затраты на производство⁶. Технология проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM) успешно применяется для производства гребных винтов. Компания Naval Group (Франция) изготовила и сертифицировала у Bureau Veritas крупнейший в мире 5-лопастной гребной винт диаметром 2,5 м, установленный на тральщике типа «Tripartite» (рис. 4а⁷). Аналогичный проект по созданию 2-метрового винта по технологии WAAM был реализован южнокорейской SY Metal при сертификации DNV⁸. Ключевыми преимуществами WAAM в данном случае являются двукратное увеличение скорости производства по сравнению с литьем и формирование более однородной микроструктуры, что потенциально повышает прочностные характеристики и ремонтопригодность.

Биметаллические изделия для агрессивных сред. Совместный проект корейских компаний во главе с InssTek позволил создать первый в отрасли биметаллический криогенный клапан (рис. 4б). Метод прямого подвода энергии с 5-осевой синхронизацией позволил нанести 3-миллиметровый слой коррозионностойкого сплава Inconel 625 на внутреннюю поверхность корпуса из нержавеющей стали SUS316L, что обеспечило значительную экономию дорогостоящего материала⁹.

Компоненты двигателей и систем. Ряд компаний, включая Siemens, MAN Diesel & Turbo и Rolls-Royce, используют технологии селективного лазерного плавления (SLM/PBF) для производства сегментов направляющих лопаток турбин, деталей двигателей и литейной оснастки. Компания Huntington Ingalls Industries изготовила аддитивный трубопровод для авианосца «Гарри С. Трумэн». В 2018 г. командованием военно-морских систем США (NAVSEA) была одобрена первая металлическая деталь — прототип сливного сетчатого отверстия (DSO), — установленная на авианосце «Гарри С. Трумэн» (CVN 75) для проведения годичных эксплуатационных испытаний¹⁰ (рис. 4в). Wärtsilä (Финляндия) наладила производство специализированного инструмента для сервисного обслуживания двигателей [7].



Рис. 4. Изделия судового машиностроения, полученные методами АП за рубежом:

а — гребной винт нового поколения (Naval Group, Франция); б — биметаллический криогенный клапан (InssTek, Южная Корея); в — прототип дренажного сетчатого фильтра паропровода (NAVSEA, США)

Классификационное общество DNV также выдало сертификат соответствия для панамского клюза неклассического типа, изготовленного по технологии WAAM, который показал способность выдерживать нагрузки на 20 % выше проектных при двукратном превышении предела текучести по сравнению с традиционным литьем¹¹.

⁶ Damen unveils world's 1st class approved 3D printed propeller // Offshore Energy. — 2017. — URL: <https://www.offshore-energy.biz/damen-unveils-worlds-1st-class-approved-3d-printed-propeller/> (дата обращения 20.02.2025).

⁷ Largest metal 3D printed propeller certified by Bureau Veritas // The Maritime Executive. — URL: <https://www.maritime-executive.com/article/largest-metal-3d-printed-propeller-certified-by-bureau-veritas> (дата обращения 20.02.2025).

⁸ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

⁹ Ibid.

¹⁰ NAVSEA approves first metal part for shipboard use via additive manufacturing // VoxelMatters. — URL: <https://www.voxelmatters.com/navsea-first-metal-part-shipboard/> (дата обращения 15.07.2024).

¹¹ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

3.2. Крупногабаритное строительство и изготовление оснастки

АТ активно используются для создания крупногабаритных объектов и технологической оснастки, где ключевыми факторами являются скорость изготовления и снижение материалоемкости.

Производство судовых корпусов и конструкций. Компания Al Seer Marine с использованием роботизированной системы Flexbot (зона построения 4 × 36 м) осуществила 3D-печать надводного судна, установив мировой рекорд по величине напечатанной лодки (рис. 5¹²). Данный проект демонстрирует потенциал модульных роботизированных комплексов для крупноформатного аддитивного строительства. Предприятия типа OCore (Италия) используют полимерные аддитивные технологии для изготовления гоночных яхт класса Proto, применяя методы топологической оптимизации для снижения массы без потери прочности [7].



Рис. 5. Hydra — беспилотное надводное судно (БНС), напечатанное на 3D-принтере (Al Seer Marine, ОАЭ)

Изготовление прототипов и мастер-моделей. Такие компании, как Thyssenkrupp Marine Systems и Portsmouth/Puget Sound, применяют АТ для быстрого прототипирования узлов подводных лодок и макетирования при модернизации кораблей ВМС, что значительно ускоряет цикл проектирования и внедрения новых решений¹³.

3.3. Ремонт и восстановление деталей

Одним из наиболее экономически эффективных применений АТ является оперативный ремонт и восстановление геометрии изношенных или поврежденных компонентов, что особенно критично в условиях ограниченного доступа к запасным частям. Современное судно представляет собой сложный механизм, месяцами находящийся в открытом море без доступа к ремонтным докам и складам запасных частей. Традиционная организация ремонта требует сложной логистики: при поломке детали экипаж сообщает на берег, служба снабжения ищет деталь на складе или заказывает ее изготовление, после чего деталь отправляют в ближайший порт следования. Этот процесс занимает много времени и требует значительных затрат [19].

Использование 3D-принтера на борту позволяет принципиально изменить эту ситуацию. При поломке детали достаточно найти ее 3D-модель в базе данных или создать ее методом 3D-сканирования, после чего STL файл отправляется на 3D-принтер, и изготовление детали занимает считанные часы. Авторы подчеркивают, что такой подход позволяет сократить сроки судоремонта до 70 % по сравнению с традиционными методами, исключает необходимость складирования большого количества запасных частей и повышает точность изготовления благодаря высокому разрешению печати [19].

¹² Al Seer Marine and Abu Dhabi Maritime unveil the world's first 3D printed water taxi // Al Seer Marine. — 2024. — URL: <https://alseermarine.com/2024/04/22/eget-magna-dignissim-viverra-henderit-viverra-tristique-fermentum-mauris/> (дата обращения 21.02.2025).

¹³ Thyssenkrupp Marine Systems uses 3D printing to create prototypes // Thyssenkrupp Marine Systems. — URL: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/newsroom/press-releases/press-detail-page/thyssenkrupp-marine-systems-uses-3d-printing-to-create-prototypes-12345> (дата обращения 21.02.2025).

ВМС США проводят эксперименты по размещению 3D-принтеров на борту кораблей для оперативного изготовления запасных частей в ходе длительных морских походов, что позволяет минимизировать простои и сократить логистическую цепочку¹⁴. Технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ, DMD) и WAAM эффективно применяются для восстановления посадочных поверхностей, ремонта лопаток гребных винтов и других ответственных узлов, подверженных износу в процессе эксплуатации.

3.4. Развитие нормативной базы и сертификация

Активное внедрение АТ в судостроение стимулировало классификационные общества к разработке специализированных нормативных документов и процедур сертификации.

Классификационное общество DNV в 2016 г. инициировало программу по изучению потенциала АТ для судостроения, результатом которой стало создание системы правил и рекомендаций, легших в основу квалификационных и сертификационных процедур. В 2018 г. DNV выдало компании Thyssenkrupp Marine Systems первый сертификат на АП, признав ее TechCenter Additive Manufacturing утвержденным поставщиком для морской отрасли¹⁵.

DNV осуществляет сертификацию не только готовых изделий, но и исходных материалов, как в случае с проволокой для WAAM производства Voestalpine Böhler Welding, а также одобряет конкретные технологические процессы, такие как запатентованный метод компании AML3D. На основе проектов, подобных созданию титановых лопастей гребного винта с сотовой структурой (Kongsberg Maritime и SLM Solutions), DNV готовит обновления для стандарта DNV B203, что свидетельствует о динамичном развитии нормативной базы¹⁶.

Проведенный анализ международного опыта подтверждает, что аддитивное производство перешло из стадии экспериментальной технологии в стадию практической реализации в судостроении, охватывая весь жизненный цикл судовой техники — от проектирования и производства до ремонта и логистики запасных частей. Дальнейшее развитие отрасли напрямую связано с совершенствованием нормативной базы и накоплением статистики надежности аддитивно произведенных компонентов.

В 2025 г. Международная ассоциация классификационных обществ (МАКО) выпустила Рекомендацию 186 «Металлические детали, изготовленные методом аддитивного производства, для применения на морских судах и стационарных платформах» (Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications) [20]. Документом устанавливаются единые требования к обеспечению качества процессов металлического АП, применяемого в качестве альтернативы традиционным процессам производства материалов, таким как прокатка, литье, ковка и сварка в строительстве. Рекомендация распространяется на изделия/детали узлов и механизмов и не распространяется на корпусные конструкции.

4. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АП В РОССИЙСКОМ СУДОСТРОЕНИИ

Развитие аддитивного производства в российском судостроении характеризуется значительным научно-техническим потенциалом, однако его практическая реализация сталкивается с рядом системных вызовов [4, 21]. На начальном этапе темпы внедрения АП сдерживались консервативными подходами, характерными для металлоемкой отрасли с устоявшимися технологическими цепочками. Однако в последние годы под влиянием факторов импортозамещения, необходимости сокращения сроков строительства и ремонта судов, а также оптимизации логистики запчастей (ЗИП) наметилась устойчивая положительная динамика [5, 22, 23].

¹⁴ Navy explores 3D printing for shipboard repairs // U.S. Navy. — URL: <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/2234567/navy-explores-3d-printing-for-shipboard-repairs/> (дата обращения 21.02.2025).

¹⁵ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

¹⁶ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

4.1. Формирование нормативной базы и научный задел

Фундаментальную роль в легитимизации АП в отрасли сыграло утверждение главы 11 «Продукты аддитивного производства» части XIII Правил Регистра в 2020 г. [11, 21, 24]. Этот документ установил первоначальные требования к металлическим полуфабрикатам и изделиям, полученным методами аддитивного синтеза, и разрешил их применение для элементов корпуса, механизмов и устройств, находящихся под надзором Регистра.

Разработку правил предваряли и сопровождают комплексные научно-исследовательские работы (НИР). В 2019 г. Регистром совместно с Институтом лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) СПбГМТУ и НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» были исследованы свойства низкоуглеродистой высокопрочной стали, ряда мартенситных нержавеющей сталей и титанового сплава. В 2020 г. АО «ОСК» завершила НИР по изготовлению топологически оптимизированного колеса для гидравлического привода роликового механизма устройства, вытравливающего трос, из титанового сплава [22]. В 2022–2024 гг. в рамках проекта НОЦ «Российская Арктика» проведены успешные исследования мартенситных сталей марок 06X14HДЛ и 08X15H4ДМЛ для элементов движителей, показавшие, что их свойства после печати и последующей термической обработки соответствуют требованиям к литым заготовкам¹⁷. С 2022 г. инициирован проект, поддержанный АО «ОСК», направленный на разработку технологий АП для кораблестроения. На рис. 6 приведены некоторые изделия, полученные аддитивными методами в рамках НИР.



Рис. 6. Примеры изделий для судостроения, полученные аддитивными методами в результате НИР:
а — гребной винт (ПЛВ, ИЛИСТ); *б* — колесо для гидравлического привода (СЛС, АО «ОСК»);
в — деталь «корпус» (ПЛВ, ИЛИСТ)

Помимо Правил Регистра, в России сформирована и продолжает активно развиваться комплексная национальная нормативная база в области аддитивных технологий. По состоянию на 2025 г. разработано и действует свыше 50 национальных стандартов (ГОСТ Р) и предварительных стандартов (ПНСТ), охватывающих все ключевые аспекты АП. Эта система документов включает:

- фундаментальные и основополагающие стандарты (серия ГОСТ Р 57558-2017 и др.), устанавливающие терминологию, базовые принципы и общие требования к процессам, данным и материалам;
- стандарты на исходные материалы, регламентирующие требования к металлопорошковым композициям (например, ГОСТ Р 59035-2020, ГОСТ Р 70907-2023), их контроль и методы испытаний (ГОСТ Р 57556-2017);
- стандарты на оборудование (ГОСТ Р 57588-2017, ГОСТ Р 59184-2020) и процедуры его квалификации;
- стандарты на конкретные технологические процессы и изделия, в том числе для селективного лазерного сплавления сталей и титановых сплавов (ГОСТ Р 59183-2020, ГОСТ Р 59185-2020, ГОСТ Р 58419-2019), прямого подвода энергии (ГОСТ Р 70242-2022) и других методов;
- стандарты на методы контроля, включая обширный блок по неразрушающему контролю (серия ГОСТ Р 58598-2019 и др.) и измерению остаточных напряжений (ГОСТ Р 71316-2024);
- стандарты, интегрирующие АП в существующие системы конструкторской (ГОСТ 2.310-2022) и технологической (ГОСТ 3.1408-2022) документации.

Развитие нормативной базы не прекращается: на 2026 г. запланирована разработка и актуализация ряда новых национальных стандартов. В фокусе внимания находятся стандарты для проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM), которые критически важны для крупногабаритного судостроения, а также более детальные технические условия на широкую номенклатуру судовых деталей (корпусной арматуры, элементов движительно-рулевых комплексов), изготовленных методами АП. Эта работа направлена на закрытие существующих нормативных пробелов и создание исчерпывающих регламентов для серийного применения аддитивных технологий в отрасли.

¹⁷ Арктика — понятие наукоёмкое // ЦНИИ КМ «Прометей». — URL: <https://crism-prometey.ru/news/novosti/arktika-ponyatie-naukoemkoe/> (дата обращения 22.02.2025).

4.2. Анализ практического внедрения методов АП на предприятиях

Опыт российских судостроительных предприятий демонстрирует разноуровневый подход к внедрению АП [25–27], который можно разделить на несколько направлений:

АП ответственных металлических деталей. Наиболее значимые проекты связаны с технологиями прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного лазерного плавления. Так, АО «ЦС «Звездочка» с 2021 г. проводит экспериментальные работы по изготовлению методом ПЛВ деталей узла уплотнения винторулевых колонок. Эти работы находятся на стадии опытно-конструкторских разработок и направлены на создание функциональных компонентов с высокими требованиями к механическим свойствам.

Производство оснастки, запчастей и ремонт с использованием полимерных технологий. Наиболее массовое и быстро окупаемое направление. Предприятия, такие как АО «ПО «Севмаш», Прибалтийский СЗ «Янтарь», СПО «Арктика» и Амурский судостроительный завод, активно используют технологию FDM для 3D-печати оснастки, корпусов оборудования (например, головки дробеструйного аппарата на «Севмаше») и оперативного ремонта сломанных деталей^{18, 19}. Это позволяет значительно сократить сроки и затраты на технологическое обеспечение производства.

Крупногабаритное прототипирование. В 2024 г. Крыловский государственный научный центр совместно с заводом «Вымпел» создал первую в России модель яхты с использованием аддитивных технологий. Подобные проекты служат важной цели отработки технологий и визуализации новых возможностей для проектирования.

Таким образом, российское судостроение преодолело стадию первоначального ознакомления с АП и перешло к фазе точечного внедрения и накопления практического опыта. Сформированы основы нормативной базы, запущены перспективные НИР и реализуются практические проекты различного уровня сложности, в ходе которых профильные специалисты предприятий и научных центров приобретают критически важные компетенции. Дальнейшее ускорение этого процесса зависит от консолидированных усилий государства, научно-исследовательских центров и промышленных предприятий, направленных на решение проблем в области стандартизации, обеспечения материалами, подготовки кадров и снижения экономических барьеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтверждает, что аддитивное производство обладает потенциалом для трансформации технологических процессов в судостроении. Мировой опыт демонстрирует успешные примеры внедрения АП на всех этапах жизненного цикла судна — от прототипирования и производства функциональных компонентов (гребные винты, биметаллические клапаны) до ремонта и оперативного изготовления запчастей. В России развитие АП находится на начальной, но активной стадии: сформирована основа нормативной базы (гл. 11 ч. XIII Правил Регистра, более 50 ГОСТ), ведутся НИР и запускаются пилотные проекты на предприятиях.

Однако для перехода от точечных успехов к широкомасштабному внедрению необходимо системное решение следующих задач.

1. Развитие и гармонизация нормативной базы. Основной задачей остается разработка единых детализированных стандартов и процедур сертификации, признаваемых на международном уровне. Это включает в себя как создание новых стандартов (в частности, для технологий WAAM и серийного производства конкретных судовых деталей), так и углубление международного сотрудничества между классификационными обществами и организациями по стандартизации.

2. Комплексные исследования и оптимизация технологий. Требуется изучение свойств аддитивных материалов в реальных эксплуатационных условиях: коррозионная стойкость, усталостная прочность, трещиностойкость, свариваемость. Параллельно необходима оптимизация параметров печати и режимов последующей термической и механической обработки для гарантированного получения заданных свойств и минимизации анизотропии.

¹⁸ «Севмаш» внедряет аддитивные технологии // ОСК «Севмаш». — URL: <https://sevmash.ru/rus/news/3098-2021-05-19-05-46-42.html> (дата обращения 21.02.2025).

¹⁹ В СПО «Арктика» развиваются новые направления промышленной автоматизации и аддитивных технологий // Медиапалуба. — URL: <https://paluba.media/news/70236> (дата обращения 22.02.2025).

3. Преодоление технологической зависимости и развитие инфраструктуры АП. Критически важно наладить отечественное производство высококачественных металлопорошковых композиций и специализированной проволоки, а также продолжить локализацию производства оборудования для АП. Это снизит риски и затраты для судостроительных предприятий.

4. Подготовка кадров и формирование компетенций. Для внедрения АП необходима целенаправленная подготовка нового поколения инженеров, технологов и операторов, владеющих знаниями на стыке материаловедения, цифрового проектирования и аддитивных технологий.

Реализация этих стратегических инициатив позволит раскрыть потенциал аддитивного производства, что в перспективе приведет к созданию принципиально новых, топологически оптимизированных конструкций, значительному сокращению сроков строительства и ремонта судов и укреплению технологического суверенитета судостроительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee et al. // *Progress in Materials Science*. — 2018. — Vol. 92. — P. 112–224.
2. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Materialia*. — 2016. — Vol. 117. — P. 371–392.
3. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review / W.E. Frazier // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2014. — Vol. 23, No. 6. — P. 1917–1928.
4. Александров М.В. Основные направления модернизации и развития предприятий судостроения / М.В. Александров, Н.Н. Солнцев, А.В. Вебер, Ю.М. Зубарев, В.А. Барсуков // *Судостроение*. — 2021. — № 5(858). — С. 39–42.
5. Савченко О.В. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отечественного гражданского судостроения / О.В. Савченко, В.Н. Половинкин // *Судостроение*. — 2022. — № 3(862). — С. 3–10.
6. Sözen A. A critical systematic scoping review on the applications of additive manufacturing (AM) in the marine industry / A. Sözen, G. Neşer // *Polymers*. — 2025. — Vol. 17(1). — P. 4.
7. Котов В.С. Опыт применения аддитивных технологий в мировом судостроении // *Судостроение*. — 2020. — № 6(853). — С. 34–37.
8. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2017. — № 4(38), т. 2. — С. 76–82.
9. Armanfar A. Embedding lattice structures into ship hulls for structural optimization and additive manufacturing / A. Armanfar, A. Taşmektepligil, R.T. Kiliç, S. Demiret et al. // *Ocean Engineering*. — 2024. — Vol. 301. — P. 117601.
10. Scattareggia Marchese S. G. Feasibility study on additive-manufactured honeycomb sandwich structural solutions for a Fast Patrol Vessel / S. Scattareggia Marchese, G. Epasto, V. Crupi, Y. Garbatov // *Composite Structures*. — 2025. — Vol. 351. — P. 118601.
11. Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
12. Котов В.С. Использование полимерных материалов в системе оперативного ремонта судового оборудования / В.С. Котов, Р.К. Резникова, А.А. Коростелев, В.В. Барсков // *Судостроение*. — 2022. — № 5(864). — С. 50–53.
13. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроении: тенденции и правовое регулирование / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов, А.Я. Яфасов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 4(46), т. 4. — С. 38–49.
14. Гринадеров В.Ю. Аддитивные технологии для изготовления судовой арматуры / В.Ю. Гринадеров // *Судостроение*. — 2023. — № 4(869). — С. 54–57.
15. Дектярев А.В. Технология изготовления корпуса маломерного судна методами аддитивного производства / А.В. Дектярев, П.Г. Зобов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова*. — 2022. — Т. 14, № 4. — С. 571–582.
16. Войнов П.С. Возможности применения аддитивных технологий при конструировании и производстве вооружения, военной и специальной техники / П.С. Войнов, В.Я. Беленький, Д.С. Белинин, С.В. Варушкин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. — 2021. — Т. 23, № 2. — С. 70–78.
17. Бобырь В.В. Исследование влияния параметров прямого лазерного выращивания на структуру и свойства высокопрочной нержавеющей стали марки 08X14НДЛ / В.В. Бобырь, Т.В. Князюк, Л.В. Мухамедзянова, М.В. Старицын, П.А. Кузнецов // *Вопросы материаловедения*. — 2024. — № 4(120). — С. 63–72.
18. Князюк Т.В. Исследование влияния аустенизации на структуру и свойства аддитивной нержавеющей стали марки 08X18H10T / Т.В. Князюк, И.В. Шакиров, Л.В. Мухамедзянова, М.С. Михайлов // *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2024): материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф.* — Пермь, 2024. — С. 107–112.
19. Иванов А.В. Особенности организации судового ремонта с помощью аддитивных технологий / А.В. Иванов, В.В. Ваганов, Н.А. Билецкий // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2020. — № 1(47), т. 1. — С. 118–124.
20. Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications. — [Электронный ресурс] URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations>.
21. Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении / А.Е. Киселева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2017. — № 48/49. — С. 84–88.
22. Бурмистров М. AddSol — давно не стартап / М. Бурмистров // *Аддитивные технологии*. — 2022. — № 3. — С. 15.
23. Спиридонов А.Ю. Практический опыт применения аддитивных технологий в отечественном судостроении / А.Ю. Спиридонов, С.М. Ляшенко, А.А. Прохода, П.Г. Зобов // *Морской вестник*. — 2020. — № S1 (14). — С. 90–93.

24. Кордонец С.М. Расширение компетенций Российского морского регистра судоходства. Введение требований к инновационным материалам и технологиям / С.М. Кордонец, М.А. Кутейников, А.В. Кучапов, М.Е. Юрков // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — Специальный выпуск 1. — С. 28–32.
25. Зобов П.Г. Опыт применения аддитивных технологий на судостроительном предприятии / П.Г. Зобов // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сборник материалов II Всерос. науч.-практ. конф. — Архангельск, 2021. — С. 96–105.
26. Халилов Н.А. Инновационные 3D-технологии в судостроении и судоремонте. Обзор текущего состояния / Н.А. Халилов, Д.В. Огурцов, О.П. Коперчак // Эксплуатация морского транспорта. — 2020. — № 4(97). — С. 116–121.
27. Костылев А.А. Опыт применения аддитивных технологий в судостроении на примере использования установки прямого лазерного выращивания / А.А. Костылев // Новые технологии в судостроении: сборник трудов отраслевой науч.-техн. конф. СПб., 2022. С. 81–84.

REFERENCES

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T. et al. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224.
2. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
3. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23, No. 6. P. 1917–1928.
4. Aleksandrov M.V., Solntsev N.N., Veber A.V., Zubarev Yu.M., Barsukov V.A. General modernization and development trends of shipbuilding enterprises. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2021. No. 5(858). P. 39–42. (In Russ.)
5. Savchenko O.V., Polovinkin V.N. Current state, problems and prospects for development of domestic shipbuilding industry. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2022. No. 3(862). P. 3–10. (In Russ.)
6. Sözen A., Neşer G. A critical systematic scoping review on the applications of additive manufacturing (AM) in the marine industry. *Polymers*. 2025. Vol. 17(1). P. 4.
7. Kotov V.S. Additive technologies in world shipbuilding industry: application experience. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2020. No. 6(853). P. 34–37. (In Russ.)
8. Dektyarev A.V., Morozov V.N. Additive technologies in the shipbuilding industry and prospects for their development. *Marine Intellectual Technologies*. 2017. No. 4(38), vol. 2. P. 76–82. (In Russ.)
9. Armanfar A., Taşmektepligil A., Kiliç R.T., Demiret S. et al. Embedding lattice structures into ship hulls for structural optimization and additive manufacturing. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 301. P. 117601.
10. Scattareggia Marchese S., Epasto G., Crupi V., Garbatov Y. Feasibility study on additive-manufactured honeycomb sandwich structural solutions for a Fast Patrol Vessel. *Composite Structures*. 2025. Vol. 351. P. 118601.
11. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
12. Kotov V.S., Reznikova R.K., Korostelev A.A., Barskov V.V. Use of polymeric materials for rapid repair of shipboard equipment. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2022. No. 5(864). P. 50–53. (In Russ.)
13. Dektyarev A.V., Morozov V.N., Yafasov A.Ya. Additive technologies in shipbuilding: trends and legal regulation. *Marine Intellectual Technologies*. 2019. No. 4(46), part 4. P. 38–49. (In Russ.)
14. Grinaderov V.Yu. Additive technologies for production of ship valves and fittings. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2023. No. 4 (869). P. 54–57. (In Russ.)
15. Dektyarev A.V., Zobov P.G. Technology for producing the small vessel hull by the additive manufacturing methods. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 571–582. (In Russ.)
16. Voynov P.S., Belen'kiy V.Ya., Belinin D.S., Varushkin S.V. Possibilities of additive technologies application in designing and manufacturing of weapons of military equipment]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2021. Vol. 23, No. 2. P. 70–78.
17. Bobyr' V.V., Knyazyuk T.V., Mukhamedzyanova L.V., Staritsyn M.V., Kuznetsov P.A. Study of the influence of direct laser deposition parameters on the structure and properties of high-strength 08Kh14NDL stainless steel. *Voprosy materialovedeniya [Problems of Materials Science]*. 2024. No. 4 (120). P. 63–72. (In Russ.)
18. Knyazyuk T.V., Shakirov I.V., Mukhamedzyanova L.V., Mikhaylov M.S. Issledovanie vliyaniya austenitizatsii na strukturu i svoystva additivnoy nerzhaveyushchey stali marki 08Kh18N10T [Study of the effect of austenitization on the structure and properties of additive stainless steel grade 08Kh18N10T]. Innovatsionnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii (ITMM-2024): materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konf. [Innovative technologies in materials science and mechanical engineering: Proceedings of the All-Russian science and pract. conf.]. Perm', 2024. P. 107–112.
19. Ivanov A.V., Vaganov V.V., Biletskiy N.A. Features of organization of ship repair using additive technologies. *Marine Intellectual Technologies*. 2020. No. 1(47), part 1. P. 118–124. (In Russ.)
20. Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications. International Association of Classification Societies (IACS). 2025. URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations> (accessed: 20.02.2025).
21. Kiseleva A.E. Application of additive technologies in solving shipbuilding design problems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 84–88. (In Russ.)
22. Burmistrov M. AddSol — davno ne startup [AddSol — not a startup for a long time]. *Additivnye tekhnologii [Additive Technologies]*. 2022. No. 3. P. 15.
23. Spiridonov A.Yu., Lyashenko S.M., Prokhoda A.A., Zobov P.G. Prakticheskiy opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy v otechestvennom sudostroenii [Practical experience in the application of additive technologies in domestic shipbuilding]. *Morskoy vestnik [Marine Bulletin]*. 2020. No. S1 (14). P. 90–93.
24. Kordonets S.M., Kuteynikov M.A., Kuchapov A.V., Yurkov M.E. Rasshirenie kompetentsiy Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. Vvedenie trebovaniy k innovatsionnym materialam i tekhnologiyam [Expansion of competencies of the Russian Maritime Register of Shipping. Introduction of requirements for innovative materials and technologies]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Transactions of the Krylov State Research Centre]*. 2022. No. S1. P. 28–32.

25. Zobov P.G. Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy na sudostroitel'nom predpriyatii [Experience in the application of additive technologies at a shipbuilding enterprise]. *Aktual'nye voprosy innovatsionnogo razvitiya Arkticheskogo regiona RF: sbornik materialov II Vseros. nauch.-prakt. konf. [Current issues of the innovative development of the Arctic region: Proceedings of the 2nd All-Russian science and pract. conf.]* Arkhangel'sk, 2021. P. 96–105.
26. Khalilov N.A., Ogurtsov D.V., Koperchak O.P. Innovatsionnye 3D-tekhnologii v sudostroenii i sudoremonte. Obzor tekushchego sostoyaniya [3-D technologies in shipbuilding and ship repair. Overview of the current state]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Operation of maritime transport]*. 2020. No. 4 (97). P. 116–121.
27. Kostylev A.A. Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy v sudostroenii na primere ispol'zovaniya ustanovki pryamogo lazernogo vyrashchivaniya [Experience in the application of additive technologies in shipbuilding on the example of using a direct laser growing installation]. *Novye tekhnologii v sudostroenii : sbornik trudov otraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [New technologies in shipbuilding: Collection of papers of the industry scientific and technical conference]*. St. Petersburg, 2022. P. 81–84.

Статья поступила в редакцию 17.12.2025.

Принята к публикации 02.03.2026.