



## АНАЛИТИКА И ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Дектярев, аспирант кафедры кораблестроения ФСЭ  
ФГБОУ ВО «КГТУ», инженер-технолог 3-й категории  
корпусного бюро, УКТПП АО ПСЗ «Янтарь»  
nwasanches@mail.ru

В.Н. Морозов, к.т.н, доц., ФГБОУ ВО «КГТУ»  
mvm3613@gmail.com

В работе представлен анализ современных расходных материалов, применяемых при трехмерной печати: рассмотрены производные углеводородной химии, металлические порошки и полимерные материалы на основе древесины. Проведена аналитическая систематизация их применяемости к различным видам объектов морской техники судостроительного и судоремонтного производств. Каждый материал рассматривался как с позиции их физико-механических и химических свойств, так и по отношению к особенностям судостроительного производства. Дополнительно была дана характеристика потенциальных материалов 3D-печати для будущего судостроения.

*судостроение, применяемость материалов, расходные материалы, 3D-печать, трехмерная печать, аддитивные технологии, быстрое прототипирование, 3D-принтер*

Процесс создания инженерного объекта, который впоследствии будет отвечать всем необходимым свойствам и характеристикам, в условиях нового аддитивного производства – сложная наукоемкая задача, требующая нетривиальных подходов и нестандартных решений.

Как известно, современное судно представляет собой совокупность различных материалов: сталь – основной корпусной материал для сварных судовых конструкций; алюминиевые сплавы используются при изготовлении надстроек, рубок, некоторых переборок в сухих помещениях, топливных и масляных цистерн; медные сплавы – для изделий машиностроительной части (МСЧ), слесарного насыщения, облицовки гребных валов [1]; титановые сплавы – для обтекателей и прочих специальных установок [2]; пластмассы – для корпусов малотоннажных судов, иллюминаторов, кронштейнов, переборок; древесина – для настилов палуб, шлюпок, весел, обрешетников, судовой мебели [3] и пр.

Без точной 3D-модели и грамотно подобранных расходных материалов 3D-принтер является пустой оболочкой, не способной к синтезу и воссозданию желаемых объектов. При подборе расходного материала, главным образом, необходимо руководствоваться моделью аппарата и конечным изделием для будущего воспроизведения на нем (цвет, форма, материал). Расходные материалы, которые могут использоваться при 3D-печати, имеют различные физико-механические и химические свойства, а изделия, изготовленные из них, могут применяться в самых разных отраслях промышленности, в том числе и в судостроении.

Углеводородная химия является базовой наукой, которая изучает материалы, подходящие для 3D-печати. С ее помощью было получено большинство сырья, используемого сегодня аддитивной промышленностью. Производные высокомолекулярной химической технологии самые дешевые, доступные и практичные расходные материалы для 3D-прототипирования. Еще одно их достоинство – это разнообразие физико-механических характеристик. Стоит отметить, что многие эксперты в области экологии всерьез задумываются о вреде 3D-принтера для окружающей среды. Поэтому современное производство материалов для аддитивной сферы учитывает еще и экологические требования

к создаваемым изделиям. Исследователи в этой сфере проводят многочисленные эксперименты для создания более совершенных биосовместимых веществ для нужд 3D-печати [4].

Рассмотрим основные расходные материалы, которые используются в работе с 3D-принтерами и имеют применение, потенциальное или фактическое, в судостроительной промышленности.

#### 1. АБС-пластик.

АБС-пластик является самым распространенным материалом для 3D-печати. В него входят три компонента: акрилонитрил (15-30%), бутадиен (5-30%) и стирол (40-60%). В результате появляется длинная цепь полибутадиена крест-накрест с короткими цепями стиролакрилонитрила, причем нитриловые группы притягивают цепи и связывают их друг с другом, придавая АБС-пластику неповторимые свойства – он сильнее чистого полистирола, а при помощи бутадиена и стирола обладает устойчивостью при низких температурах и непроницаемостью поверхности. Содержание полибутадиена, главным образом, влияет на старение АБС-пластика и ухудшение его характеристик, поэтому в его состав часто включают антиоксиданты.

Механические свойства, наиболее важными из которых являются прочность и ударопрочность, зависят в основном от температуры эксплуатации [5]. Также полимеру присуща превосходная стабильность под ограниченной нагрузкой. Это термопластичный, жесткий, легкообрабатываемый пластик, обладающий повышенной ударной прочностью. Подходит для таких работ, как фрезеровка, сверление, токарная обработка и т. д. АБС-пластик не имеет истинной температуры плавления, так как является термопластом. Однако его температура стеклования (переход полимера при охлаждении из вязко текучего или высокоэластичного состояния в стеклообразное) составляет примерно 105°C, а плотность различных модификаций варьирует от 0,25 до 0,68 г/см<sup>3</sup>. При помощи модификаций полимера можно повысить его теплостойкость, прочность, ударопрочность и т.д.

Применяется преимущественно в температурных пределах от -20 до 80°C, причем его можно использовать в качестве соединений для экструзии, вспенивания под давлением, в листах для холодной штамповки и термоформования, выдувного формования, литья под давлением. При низких температурах ударопрочные характеристики падают, но без резкого ускорения.

АБС-пластики обладают устойчивостью к спиртам, минеральным, растительным и животным маслам, концентрированным фосфорной и соляной кислотам, водным растворам щелочей и кислот. Однако они имеют свойства набухать от ароматических углеводородов, четыреххлористого углерода, уксусной кислоты, а также подвержены воздействию азотной и серной кислот, растворяются в ацетоне, дихлорэтаноле, кетонах, сложных эфирах.

С экологической точки зрения при сжигании данного полимера не происходит загрязнения, т.е. чистый АБС-пластик не содержит галогенов. Наиболее опасными продуктами его пиролиза либо сгорания являются цианистый водород и окись углерода.

Поставляется АБС-пластик в виде гранул или нити. Стоимость за килограмм составляет около 50\$.

Применительно к судостроению АБС-пластик используют для производства судового насыщения: пластиковых труб вентиляционных и сточных систем, корпусов для электронных и электрических узлов, малой бытовой техники, различных компонентов, медицинских приборов, профилей для строительства, кабель-каналов, направляющих профилей. В потенциале, отработав технологию, при помощи АБС-пластика будет возможным воспроизводить суда маломерного флота.

АБС-пластик, практически как и все пластики при аддитивном производстве, применяется при технологии моделирования методом наплавления (FDM), суть которой состоит в выдавливании печатающей головкой материала, размягченного под действием температуры. Сама печатающая головка свободно перемещается по трем координатным осям. Схематично данный метод представлен на рис. 1.

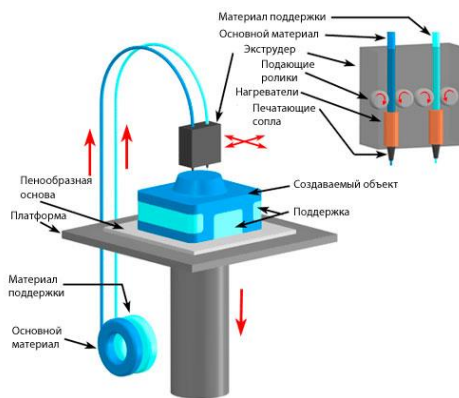


Рисунок 1 – Технология метода наплавления (FDM)

## 2. Полипропилен.

Представляет собой полимер, который получают из нефтепродуктов или газов крекинг-процессов нефти. Выпускается в виде гранул или нитей. Является термопластичным, может сохранять кристаллическую структуру и высокую механическую прочность практически до температуры плавления (160-170 °С).

Обладает следующими преимуществами: стабильностью формы при нагреве, высокой механической прочностью, высокой химической стойкостью (устойчивостью к агрессивным средам), пригодностью для переработки любыми способами, отсутствием токсичности, низкой стоимостью, влагостойкостью.

К недостаткам можно отнести: недостаточную морозостойкость (при -5 °С становится хрупким), подверженность старению под действием ультрафиолетовых лучей или кислорода (ухудшение физико-механических свойств, растрескивание, «мелование»).

В судостроении из него изготавливают роторы центрифуг, корпуса насосов, зубчатые колеса, профили и листы конструкционного назначения, детали машин, рукоятки, штапельные и декоративные ткани, упаковочные пленки, судовые канаты, рыболовные сети, трубы, резервуары, сосуды. При постройке корпуса судна и изготовлении судовых конструкций полипропиленовые волокна можно применять для армирования пластиков [6].

В 3D-печати полипропилен используется реже, чем АБС-пластик, из-за высокой усадки (в 3,5 раза больше, чем у АБС-пластика). Подобные недостатки могут привести к существенным деформациям распечатываемой модели. Также данный материал рекомендуется применять только при наличии нагреваемой платформы из-за адгезионных свойств полипропилена (прилипания к холодной области печати).

## 3. Полиэтилен низкого давления.

Полиэтилен представляет собой продукт полимеризации газа этилена, получаемого при крекинг-процессе нефти. Выпускается в виде гранул или порошка. Является основным представителем группы полиолефинов. Это высокомолекулярный карбоцепной полимер этилена (высокомолекулярный парафин), обладающий комплексом ценных технических свойств. Полиэтилен широко используется в технике, в том числе и судостроении. В зависимости от способа производства его подразделяют на полиэтилен высокого давления (ПЭВД), среднего (ПЭСР) и низкого (ПЭНД). Последний можно применять в 3D-печати.

Полиэтилен низкого давления представляет собой термопластичный полимер с высокой эластичностью, гибкостью и вязкостью. Является хорошим диэлектриком и физиологически безвредным материалом. Не подвержен потере своих свойств даже при температуре -170 °С. Температура плавления колеблется от 130 до 145 °С, а застывания – от 100 до 120 °С.

Имеет следующие преимущества: высокую устойчивость к агрессивным средам (солям, щелочам, кислотам), высокую электрическую прочность, низкое влагопоглощение, высокую ударостойкость, жесткость, нетоксичность, низкую диэлектрическую

проницаемость, удовлетворительную механическую прочность, хорошую устойчивость к истиранию, малую паропроницаемость и газопроницаемость, легкость сварки, возможность переработки любыми методами.

К недостаткам следует отнести: низкую теплостойкость под нагрузкой, текучесть при повышенной температуре, высокий коэффициент теоретического расширения, горючесть, склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей, недостаточную морозостойкость, повышенную усадку при затвердевании; при температуре свыше 120 °С выделяет токсичные вещества.

В судостроении ПЭНД применяют при изготовлении общетехнического, конструкционного, антикоррозионного, поделочного, электроизоляционного и радиотехнического материалов, таких как краны, вентили, золотники, шестерни, капельницы и иллюминаторы, арматуры, крепления деталей насыщения, детали механизмов, конденсаторы, детали высокочастотных установок и аппаратуры, провода и кабели различного назначения, а также трубы, стержни, профили, изготавливаемые экструзией [6].

Несмотря на то, что материал является вполне дешевым, в 3D-печати его используют относительно редко. Причиной тому служат усадка и низкая адгезия, проявляющаяся в плохом сцеплении последующего слоя материала с предыдущим, которое может привести к деформациям, растрескиваниям и расслаиванию модели.

#### 4. Поликарбонат.

Представляет собой термопластичный полимер, обладающий высокой прочностью и прозрачностью. Относится к классу синтетических полимеров. Это линейный полиэфир угольной кислоты и двухатомных фенолов. Обладает высокой теплостойкостью (до 153 °С). Сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур (от -40 до 120 °С).

Производство поликарбоната обладает экологически небезопасными свойствами, но сам поликарбонат биологически инертный.

Он не имеет аналогов среди полимерных материалов по механическим свойствам. В нем нашли свое сочетание такие свойства, как высокая прозрачность, уникальная ударостойкость и высокая термостойкость. Свойства поликарбоната практически не зависят от температурных изменений, а критические температуры, при которых данный материал становится хрупким, находятся за границей возможных отрицательных температур эксплуатации.

Обладает следующими достоинствами: тепло- и атмосферостойкостью, высокой ударной вязкостью, высокой устойчивостью к ползучести под нагрузкой, стабильными электрическими характеристиками в широком интервале температур и частот, пластичностью в широком интервале температур, высокими электроизоляционными свойствами, стойкостью к действию большинства кислот, стойкостью к окислительным средам при высоких температурах, низким водопоглощением, отсутствием возгорания, малой усадкой при литье.

Недостатки: при длительном кипячении в воде проявляется хрупкость, разрушается под действием едких щелочей и аммиака, растворяется в хлорированных углеводородах, эфирах и кетонах.

В судостроении применяется в виде судовой трубопроводной аппаратуры, клапанов, фильтров, шестерен, сепараторов, вкладышей, а также конструктивных элементов, работающих в жестких условиях тепловых, механических и динамических нагрузок. Также поликарбонат ввиду своих ударопрочных качеств используется в качестве защитного антивандального остекления – для корпусов катеров, яхт и прочих маломерных судов [6].

Поликарбонат поставляется в виде нитей и стоит примерно 80-90\$ за килограмм.

#### 5. Полифенилсульфон, полилактрид, фотополимерные смолы

Данные материалы пока не получили должного распространения в судостроении. Вместе с тем они нашли широкое применение в среде 3D-печати и обладают большим потенциалом внедрения в отрасли тяжелых промышленности.

Полифенилсульфон представляет собой аморфный термопластик с хорошими диэлектрическими, механическими и тепловыми свойствами. Температура плавления находится в промежутке от 340 до 370 °С. Данный материал очень прочный и практически не горит, поэтому его широко используют в аэрокосмической и авиационной отраслях при производстве различных теплостойких деталей.

Преимущества: хорошие диэлектрические свойства, физиологическая инертность, высокая ударопрочность, высокая максимальная температура работы (стеклование – от 220 до 230 °С), хорошая химическая стойкость к щелочам, кислотам и растворителям.

Недостатки: выделение вредных веществ при воздействии открытого пламени, возможность растрескивания при механической обработке, затруднительная полировка после печати из-за высокой прочности материала.

Полилактид является самым экологически и биологически совместимым материалом среди всех материалов 3D-печатного производства. Он представляет собой термопластичный полиэфир, который производится из отходов различных возобновляемых биомасс. По физико-механическим характеристикам похож на все вышеперечисленные материалы. Поставляется в виде нити. Температура плавления находится в пределах 170 °С. Используется для производства изделий с ограниченным сроком службы.

Преимущества: получение более детальных и полностью готовых объектов, гладкая поверхность, нетоксичность, отличное скольжение деталей, существенная экономия энергии из-за низкой температуры размягчения нити.

Недостатки: высокая цена производства сырья, модели недолговечны и разлагаются в естественных условиях.

Фотополимерные смолы представляют собой отдельный класс светочувствительных смол, которые имеют способность к изменению своего агрегатного состояния при помощи воздействия ультрафиолетовой вспышки или лазерного луча. Физико-механические свойства разнообразны и зависят от конечного предназначения продукта.

Достоинства: широкий диапазон физико-механических свойств, нет необходимости в обработке поверхности после печати, высокое разрешение печати (до 0,025 мм).

Недостатки: крупногабаритность оборудования, сложность печати, дороговизна материалов.

## 6. Металлический порошок

Одним из самых прочных материалов, которые применяются в 3D-печати, является металлический порошок. Для его изготовления могут быть использованы абсолютно любые металлы, однако в 3D-индустрии наиболее распространены благородные металлы, бронза, медь, никель, титан, алюминий, нержавеющей сталь. Металлический порошок можно применять при аддитивном производстве, используя технологию спекания направленным пучком электронов (EBM), селективного лазерного плавления (SLM) и селективного лазерного спекания (SLS).

Технология EBM основывается на «спекании» частиц порошка в трехмерный объект при помощи лазера высокой мощности. Лазерный луч получает данные о форме изделия из его 3D-модели и далее выборочно сплавляет частицы порошка в рабочей зоне. Область применения – авиационные и судовые детали, например, жаростойкие форсунки, лопатки газовых турбин и т.д. Материалы данного метода очень легки и прочны, к тому же имеется возможность создавать пористые и полые структуры.

В технологии SLS применяется лазер высокой мощности, чтобы «спекать» частицы порошка в трехмерный объект. Такие принтеры используют импульсные лазеры для увеличения его мощности. Исходный материал нагревается почти до плавления, чтобы лазеру было легче достигнуть пиковую точку. Изделия обычно получаются с шероховатой, пористой поверхностью. В технологии SLS применяются связующие материалы, придающие изделию необходимую термическую и химическую стойкость. В роли таких материалов обычно используют стеклянные или керамические частицы, а также различные полимеры. Чтобы предотвратить окисление частиц металла, спекание проходит в инертной или

вакуумной среде. После спекания деталь идет в высокотемпературную печь, где пластик выгорает и на его место приходит легкоплавкая бронза. Область применения – машиностроение, производство деталей судов. Легкоплавкие металлы, например алюминий, может спекаться без каких-либо дополнительных материалов [4].

Технологии EBM и SLS представлены на рис. 2.

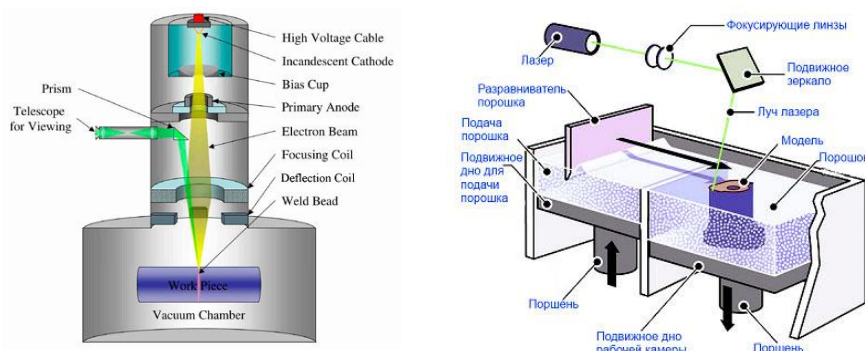


Рисунок 2 – Технологии работы с металлическими порошками (слева-направо: электронно-лучевая плавка EBM и селективное лазерное спекание SLS)

### 7. Древесина

Материал, при помощи которого можно создавать деревянные суда, называется LAYWOO-D3 [7]. Он является полимером на основе древесины и представляет собой композит из переработанной древесины (40%) и связующего полимера (60%). Материал обладает хорошими характеристиками: отсутствие деформаций при печати, возможность печати годовых колец дерева, варьирования поверхности – можно создавать ее шершавой, гладкой или чередовать указанные свойства. Выпускается в виде прутков диаметрами 1,75 и 3 мм. Стоимость составляет 20€ за 500 грамм.

Достоинства: высокая термостойкость (от 170 до 250 °C), выбор цвета в зависимости от температуры (темная древесина при 245, светлая – при 180 °C), хорошие адгезионные свойства.

Некоторые из вышеперечисленных материалов показаны на рис. 3.

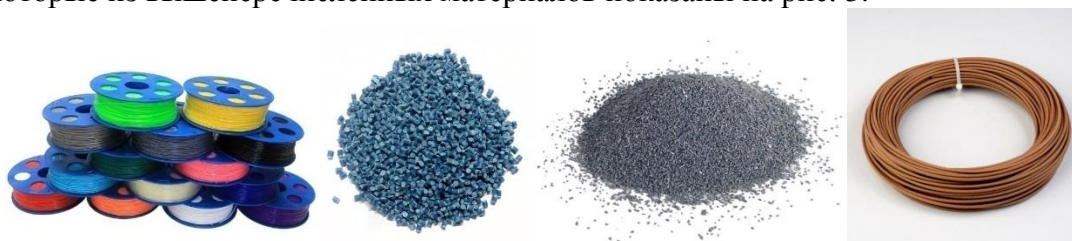


Рисунок 3 – Материалы для 3D-печати (слева-направо: АБС-пластик, полипропилен, металлический порошок, полимер на основе древесины)

Из приведенного исследования сделаем краткие выводы:

1. На сегодняшний день в условиях аддитивного производства можно изготавливать объекты морской техники практически из любых материалов, применяемых в современном судостроении – пластмасс, металлов, древесины;
2. Физико-механические характеристики некоторых материалов соответствуют или превышают аналогичные показатели при традиционной технологии судостроения;
3. Химические характеристики позволяют судить о том, что практически все представленные материалы имеют хорошую влагостойкость, стойкость к агрессивным средам, а также низкое влагопоглощение;
4. Наиболее дешевым и распространенным материалом при 3D-печати является АБС-пластик и его производные.



### Список использованных источников

1. Елин, И.А. Пластики и декоративные материалы из древесины, их свойства и применение в судоремонте / И.А. Елин, Н.В. Жур, И.Л. Шейдин. – Москва: Морской транспорт, 1961.
2. Пульцин, Н.М. Титановые сплавы и их применение в машиностроении / Н.М. Пульцин. – Москва: Машгиз, 1962.
3. Леонтьев, В.М. Судостроительные материалы / В.М. Леонтьев, Н.Ф. Фролов. – Ленинград: Судостроение, 1965. – 187 с.
4. Дектярев, А.В. Аддитивные технологии в судостроении и перспективы их развития / А.В. Дектярев. – Beau Bassin. Lamp Academic Publishing, 2018. – 177 с.
5. Дектярев, А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №4 (38). – С. 76-82.
6. Справочник по современным судостроительным материалам / В.Р. Абрамович [и др.]. – Ленинград: Судостроение, 1979. – 584 с.
7. A. Le Duigou, M. Castro, R. Bevan, N. Martin. 3D printing of wood fibre biocomposites: from mechanical to actuation functionality // Materials & Design. – 2016. №96, pp. 106-114.

### ANALYTICS AND REVIEW OF THE APPLICABILITY OF MATERIALS 3D PRINTING FOR SHIPBUILDING PRODUCTION

A.V. Dektyarev  
postgraduate student, [nwasanches@mail.ru](mailto:nwasanches@mail.ru)  
V.N. Morozov, assistant professor, PhD in Engineering  
[mvn3613@gmail.com](mailto:mvn3613@gmail.com)  
Kaliningrad State Technical University

The article presents an analysis of modern consumables used in three-dimensional printing: hydrocarbon derivatives, metal powders and wood-based polymeric materials are considered. An analytical systematization of their applicability to various types of objects of marine engineering of shipbuilding and ship-repair facilities was carried out. Each material was considered both from the standpoint of their physical and mechanical, and chemical properties, and in relation to the features of the shipbuilding industry. Additionally, the characteristics of potential 3D-printing materials for the future shipbuilding were given.

*shipbuilding, applicability of materials, consumables, 3D-printing, three-dimensional printing, additive technologies, rapid prototyping, 3D-printer*