

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ СУДОВЫХ ПЛАСТИН В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Дектярев, Д.А. Романюта, П.Р. Гришин, В.Н. Морозов (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Приводится оценка параметров внедрения аддитивных технологий в современную судостроительную промышленность на основе анализа физико-механических характеристик различных материалов 3D-печати на основе углеводородной химии (SBS-пластик, ABS, PLA, HIPS, PETG). Материалы исследовались при разных толщинах и структуры заполнения. В качестве объекта исследования выступают судовые пластины, как одна из наиболее распространенных номенклатур корпусного производства объектов морской техники. Новизна исследования заключается в выявлении физико-механических закономерностей формирования изделий объектов морской техники с применением аддитивного промышленного производства в условиях полунатурных испытаний. Физико-механические характеристики были оценены в результате экспериментальных исследований образцов пластин на растяжение и изгиб при помощи специальной разрывной машины типа P-20 при ее модернизации специальными приспособлениями. На основе полученных данных составлены рекомендации по применению аддитивных технологий в судостроении и проанализирована применимость материалов 3D-печати к корпусным работам в судопроизводстве.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, судостроение, физико-механические характеристики, прочность, судовые корпусные конструкции, судовые пластины, композитные материалы.

### Введение

Ранние исследования относительно специфики работы аддитивных технологий в тяжелой промышленности [1, 2], в том числе и в судостроении [3, 4] показывают, насколько данная тематика актуальна в современном производстве. Про преимущества аддитивных технологий над традиционными методами изготовления конструкций также уже многократно высказывалось — легкое изготовление прототипов, быстрая корректировка проектов, возможность применения сложных архитектурных решений, минимум человеческого труда и т. д.

Рассмотрена новая методика прочностных испытаний, которая основывается в первую очередь на возможности печати принтеров (область печати) и их особенностей применения в судостроении. Большинство современных 3D-принтеров имеют область печати в 300x300x400 мм (длина x ширина x высота). В судостроении применяются крупногабаритные детали и узлы, поэтому при аддитивном изготовлении объектов морской техники область печати должна быть заполнена на максимум. Например, при создании элементов корпуса, судовых моделей, люковых закрытий, настилов и т. д. может быть использована форма 3D-печатного производства в виде пластин. При больших геометрических характеристиках, выходящих за область печати, пластины должны быть склеены между собой.

Исходя из этого, в приведенном исследовании был проведен анализ физико-механических закономерностей формирования элементов судовых корпусных конструкций на примере пластин в условиях аддитивного производства. Для исследования физико-механических характеристик были проведены испытания на растяжение и на изгиб.

### Обоснование выбора вида исследуемых корпусных конструкций

До последнего времени расчетные методы проектирования конструкции корпуса малых судов приме-

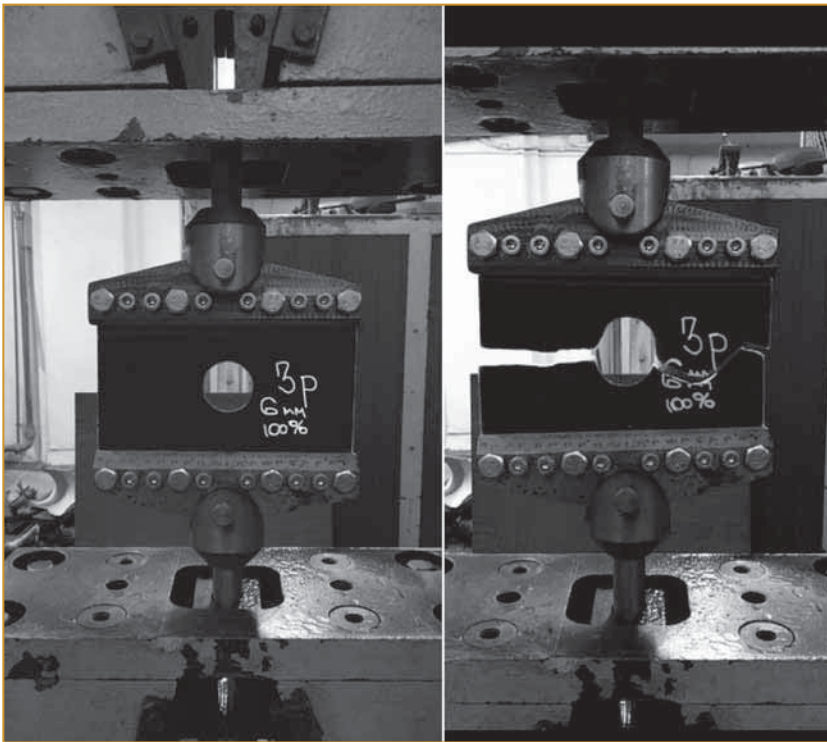
нялись сравнительно редко и, главным образом, для судов длиной  $\geq 15...20$  м. Конструкторы в основном руководствовались не расчетами, а существующими правилами постройки малых судов тех или иных типов.

При деформациях пластин в составе перекрытий возникают продольные силы, вызванные ограниченным смещением продольных кромок в плоскости пластин. Величина этих усилий может достигать весьма больших значений и существенно влиять на параметры деформирования пластин, особенно в упругопластической стадии.

В реальных корпусных конструкциях судовые пластины работают в составе перекрытий, которые при деформировании обеспечивают им определенные граничные условия и распорные усилия, определяемые через смещение опорного контура. Наибольший практический интерес представляет случай, когда опорный контур работает в упругой области, а пластина — в упругопластической [5].

Теоретико-экспериментальное исследование прочностной задачи в этой работе было решено проводить на жестко заделанной пластине, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета (испытания на изгиб) и растягивающим усилием по кромкам (испытания на растяжение). Хотя такая схема нагружения в практике встречается редко, она легко осуществима в лабораторных условиях и позволяет получить относительно простые результаты, по которым можно судить о приемлемости методики в практических расчетах.

Объектом испытаний служило полунатурное упрощенное перекрытие без судового набора (судовая пластина). Испытание полунатурного перекрытия дает возможность качественного и количественного сопоставления результатов эксперимента с реальными корпусными конструкциями, а также используется как контрольная оценка «масштабного эффекта» [5]. Выбор параметров перекрытий для испытаний



Образец из пластины ABS-пластика толщиной 6 мм со 100% структурой заполнения материала перед (слева) и после испытания на растяжение (справа)

осуществлялся на основе анализе типоразмеров перекрытий нескольких серий маломерных пластмассовых судов.

#### Изготовление образцов

3D-печатные образцы судовых пластин были напечатаны из пяти материалов аддитивного производства: SBS-пластик, ABS, PLA, HIPS и PETG.

1. SBS — термопластичный сополимер на базе стирол-бутадиена. Печать осуществлялась при температуре 235 °С, температура стола — 60 °С, в качестве адгезива использовался клей от The 3D.

2. ABS — тройной полимер, изготавливающийся при помощи полимеризации акрилонитрила и стирола в присутствии полибутадиена. Печать осуществлялась при температуре 245 °С, температура стола — 100 °С, в качестве адгезива использовался акриловый лак.

3. PLA — термопластичный полиэфир, который производится из отходов различных возобновляемых биомасс. Печать осуществлялась при температуре 202 °С, температура стола при первом слое — 65 °С, при последующих — 55 °С.

4. HIPS — высокопрочный полистирол, термопластичный полимер, получаемый путем полимеризации с добавлением полибутадиена к полистиролу. Печать осуществлялась при температуре 265 °С, температура стола — 100 °С, в качестве адгезива использовался клей от The 3D.

5. PETG — модернизированный сополиэфир полиэтиленгликольтерефталата — пластичной смолы, получаемый при добавлении второго хвоста гликоля

при полимеризации. Печать осуществлялась при температуре 230 °С, температура стола — 70 °С, в качестве адгезива использовался клей от The 3D.

Изготовления 3D-печатных пластин было осуществлено при помощи трех моделей 3D-принтеров: Tevo Tornado (для печати ABS- и HIPS-пластиков), Creality Ender 3 (для печати PETG- и SBS-пластиков) и Ultimaker 2+ (для печати PLA-пластика).

В результате, были изготовлены следующие образцы пластин:

— для испытания на растяжение — образцы размером 160x200 мм с центровым отверстием диаметром 40 мм;

— для испытания на изгиб — цельные образцы размером 200x200 мм.

Для проведения испытаний в образцах высверливались отверстия для крепления в специально изготовленные приспособления.

В исследовании физико-механических характеристик были испытаны пять видов наиболее распространенных образцов 3D-печатных материалов (ABS, SBS, PLA, HIPS, PETG), толщинами по 4 и 6 мм и плотностью структуры заполнения материала в 50 и 100%. На каждое испытание было задействовано по 5 образцов пластин. Всего было изготовлено 100 пластин.

#### Проведение испытаний

Все запланированные испытания были проведены на разрывной машине Р-20 на базе отраслевой лаборатории эксплуатационной прочности промышленных судов Калининградского государственного технического университета. Для проведения необходимых испытаний были созданы специальные приспособления для испытаний на растяжение и изгиб. Испытания проводились согласно требованиям соответствующих ГОСТов и с учетом особенностей испытаний полунатурных перекрытий [5–7].

Методика проведения испытания на растяжение:

- испытываемый образец вставляется в приспособление и стягивается зажимными болтами и винтами;
- приспособление с образцом вставляется в захваты испытательной машины и безостановочно доводится до разрушения.

Образцы до и после испытания представлены на рисунке для пластин из ABS-пластика.

Методика проведения испытания на изгиб:

- испытываемый образец вставляется в приспособление и стягивается зажимными болтами и винтами;
- приспособление с образцом устанавливается на верхнюю площадку подвижной траверсы испытательной машины;

- сверху, над центром образца в неподвижную часть образца устанавливается нож радиусом 15 мм;
- ступенчато прикладывая нагрузку к образцу, замеряется прогиб центральной части образца;
- испытание проводится до разрушения пластины.

#### Результаты испытаний

Из проведенного исследования на изгиб сделаны следующие выводы:

- наиболее прочным относительно изгибных нагрузок является PLA-пластик;
- наименьший предел прочности на изгиб зафиксирован у SBS и HIPS-пластиков;
- заполнение структуры материала пластин с 50% до 100% увеличивает значения разрушающей нагрузки в среднем на 5...10%;
- увеличение толщины пластин на 2 мм дает увеличение разрушающей нагрузки в среднем на 10...15%;
- увеличение толщины пластин на 2 мм при снижении структуры их заполнения до 50% увеличивает их прочность на 15...20%.

Из проведенного исследования на растяжение сделаны следующие выводы:

- наиболее прочным относительно растяжения является PLA-пластик;
- наименее прочным материалом оказался SBS-пластик;
- заполнение структуры материала пластин с 50% до 100% дает улучшение прочностных характеристик в среднем на 15...20%;
- увеличение толщины пластин на 2 мм дает увеличение их прочности в среднем на 35...40%;
- увеличение толщины пластин на 2 мм при снижении структуры их заполнения до 50% увеличивает их прочность на 25...30%.

#### Заключение

Аддитивное производство, в виду несовершенства технологий, дает разные результаты относительно физико-механических характеристик изготовленных объектов в зависимости от выбранной технологии печати: структуры заполнения изделия, выбранного материала, скорости печати, «базового полотноща», контура наплавляемых слоев и т. д. Отсюда вытекает одна из основополагающих проблем внедрения 3D-печати в тяжелую промышленность — проблема сертификации изделий.

Однако не все объекты морской техники подлежат обязательной сертификации. В результате, промышленная печать без сертификационных процедур возможна для некоторых изделий судового машиностроения, судовых испытательных моделей, элементов мелких механизмов и станков, а также, при форми-

ровании корпусов маломерных судов (спасательных и рабочих шлюпок, спортивных, туристских и прогулочных катеров, плотов, лодок, индивидуальных спасательных плавсредств и т. д.).

Кроме того, в РФ вступил в силу «Комплексный план мероприятий по развитию и внедрению аддитивных технологий в РФ на период 2019–2025 гг.», основывающийся на распоряжениях Правительства РФ, где указано, что технологии 3D-печатного производства должны стать доминантной национальной технологической инициативой. Поэтому можно утверждать, что проблема сертификации изделий должна найти свое решение.

На основе проведенных исследований сделан краткий вывод, что, варьируя характеристики как изготавливаемого объекта, так и технологии печати, можно получить изделие, удовлетворяющее прочностным и эксплуатационным характеристикам с минимальными производственными затратами. Любые материалы, теоретически, пригодны к судостроению, и конструктору, проектанту или технологу нужно лишь оценить их применимость для конкретного объекта.

Данное исследование призвано помочь предприятиям, в том числе и судостроительным, при переходе на аддитивное промышленное производство продукции.

#### Список литературы

1. Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G.N. Laser based additive manufacturing in industry and academia // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2017. Vol. 66. no. 2. pp. 561–583.
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. pp. 172–196.
3. Jha S.K. Emerging technologies: Impact on shipbuilding. Maritime Affairs // Journal of the National Maritime Foundation of India. 2016. Vol. 12, no. 2, pp. 78–88.
4. Strickland J.D. Application of additive manufacturing in the Marine Industry. Proceeding of PRADS 2016, p.5.
5. Бураковский Е.П., Нечаев Ю.И., Бураковский П.Е., Прохнич В.П. Эксплуатационная прочность корпусов промысловых судов. Уч. пособие. Арт-Эспресс. 2012. с.392.
6. Шмигельский И.Ю. Исследование и разработка технологии изготовления сферического экранного проецирования для имитационного стенда. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. 2016. с.22.
7. Андриевский В.Р., Симановский И.В., Подоплекин Ю.Ф. Комплексная отработка сложных систем методом полунатурного моделирования // Моделирование систем и процессов. 2005. №2. с.18–21.

**Декаряев Александр Владимирович** — инженер-технолог II кат. корпусного бюро управления конструкторско-технологической подготовки производства (направление главного технолога) АО «ПСЗ «Янтарь», аспирант кафедры кораблестроения ФГБОУ ВО «КГТУ»,

**Романюта Дмитрий Александрович** — начальник отраслевой лаборатории эксплуатационной прочности промысловых судов, **Гришин Павел Романович** — инженер кафедры кораблестроения,

**Морозов Владимир Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры кораблестроения ФГБОУ ВО «КГТУ». Контактный телефон 8 (911) 488-17-60.

E-mail: nwasanches@mail.ru