

УДК 629.5.01

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-2-41-48

А.В. Дектярев<sup>1</sup>, аспирант,  
А.О. Товпинец<sup>2</sup>, мл. науч. сотрудник,  
П.Р. Гришин<sup>1</sup>, аспирант,  
В.Н. Лейцин<sup>2</sup>, д-р ф.-м.н.,  
В.Н. Морозов<sup>1</sup>, к.т.н.

(<sup>1</sup> Калининградский государственный технический университет,  
г. Калининград, ул. Проф. Баранова, 43;

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, ул. Гайдара, 6)

E-mail: nwasanches@mail.ru; VLetsin@kantiana.ru

## Сравнительный анализ физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с традиционными методами литья как возможность применения 3D-печати в ремонтных работах на борту судна в рейсе в условиях Арктической зоны

*В представленной статье приводится анализ температурных зависимостей физико-механических характеристик наиболее распространенных термопластических материалов, применяемых в качестве «чернил» в 3D-печати: ABS, SBS, PLA, HIPS и PETG-пластиков. Материалы испытывались в трех случаях: при комнатной температуре +22 °С и при пониженных температурах: 0 °С и –40 °С. В качестве исследования физико-механических характеристик были проведены испытания на изгиб и растяжение.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии; 3D-печать; Арктическая зона; судостроение; судоремонт; физико-механические характеристики; литье.

A.V. Dektyarev<sup>1</sup>, Post graduate student,  
A.O. Tovpinets<sup>2</sup>, junior research assistant,  
P.R. Grishin<sup>1</sup>, Post graduate student,  
V.N. Leitsin<sup>2</sup>, Dr. Sc. Phys-Math.,  
V.N. Morozov<sup>1</sup>, Can. Sc. Tech.

(<sup>1</sup> Kaliningrad State Technical University, 43, Prof. Baranov Str., Kaliningrad,

<sup>2</sup> Kant Baltiysky Federal University, 6, Gaidar Str., Kaliningrad)

## Comparative analysis of physical stress-strain properties of materials of additive production with common methods of casting as possibility to use 3D-printing in repair works on board ship in voyage under Arctic conditions

*In the paper presented there is shown an analysis of temperature dependences of physical stress-strain characteristics of most spread thermo-plastic materials used as “ink” in 3D-printing: ABS, SBS, PLA, HIPS and PETG-plastics. The materials were tested in three cases: at room temperature +22°C and at lower temperatures: 0°C and - 40°C. As an investigation of physical stress-strain characteristics there were carried out bending tests and tension tests.*

**Keywords:** additive technologies; 3D-printing; Arctic Zone; shipbuilding; ship repair; physical stress-strain properties; casting.

### Введение

На сегодняшний день идет активное освоение и внедрение различных инновационных технологий во многих отраслях тяжелой промышленности, в том числе, и в судостроении.

Применительно к разработкам, направленным на освоение Арктики, интересен опыт установки американскими специалистами 3D-принтера на борту универсального десантного корабля класса Wasp – Essex [1 – 3], что позволило оперативно производить ремонт и

быстрое прототипирование некоторых изделий, решить проблему логистики в открытом море и существенно снизить траты на обслуживание корабля. Подобные положительные эффекты от установки 3D-принтера «на месте» обсуждались не только для судостроения [4], но и для смежных отраслей тяжелого машиностроения [5].

На данный момент, для представленных материалов, уже получены физико-механические характеристики при испытаниях на растяжение и изгиб для литьевого метода производства. Имеются данные и о прочностных характеристиках материалов 3D-печатного производства, испытанных в нормальных температурных условиях. Однако нет достоверных сведений относительно характеристик материалов аддитивного производства применительно к низким температурам.

Для реализации 3D-технологий оперативной замены пластмассовых деталей судна, работающих в климате Арктической зоны, актуальность исследования состоит в сравнительном анализе характеристик материалов, полученных 3D-печатью и традиционными технологиями литья. Главная цель – выяснить, чем отличаются характеристики термопластов, полученные аддитивными технологиями от характеристик таких же материалов, полученных методами литья, с рассмотрением возможности работы продукции 3D-печати при низких температурах.

### Материалы и методы решения задач

Наиболее распространенные материалы аддитивного производства применительно к пластикам – это ABS, SBS, PLA, HIPS и PETG-пластики. Печать всех пластиков была осуществлена на 3D-принтере марки Creality cr10; диаметр сопла – 0,4 мм; диаметр нитей – 1,75 мм; скорость печати – 45 мм/с; толщина слоя – 0,2 мм.

При изготовлении пластиковых образцов имелись следующие особенности печати:

1) SBS – термопластичный сополимер на базе стирол-бутадиена [6]. Печать осуществлялась при температуре 235 °С, температура стола – 60 °С, в качестве адгезива использовался клей от «The3D».

SBS – пластик, изготовленный методами литья, при испытаниях в нормальных температурных режимах, имеет прочность на изгиб 34,1 МПа и прочность на растяжение – 21,4 МПа [7].

2) ABS – тройной полимер, изготавливаю-

щийся при помощи полимеризации акрилонитрила и стирола в присутствии полибутадиена [8]. Печать осуществлялась при температуре 245 °С, температура стола – 100 °С, в качестве адгезива использовался акриловый лак.

Прочность на изгиб – 79,8 МПа, на растяжение – 54,0 МПа [9] (литье, испытания в нормальных температурных условиях).

3) PLA – термопластичный полиэфир, который производится из отходов различных возобновляемых биомасс [10]. Печать осуществлялась при температуре 202 °С, температура стола при первом слое – 65 °С, при последующих – 55 °С.

Прочность на изгиб – 94,9 МПа, на растяжение – 89,0 МПа [9] (литье, испытания в нормальных температурных условиях).

4) HIPS – высокопрочный полистирол, термопластичный полимер, получаемый путем полимеризации с добавлением полибутадиена к полистиролу [11]. Печать осуществлялась при температуре 265 °С, температура стола – 100 °С, в качестве адгезива использовался клей от «The3D».

Прочность на изгиб – 30,0 МПа, на растяжение – 26,8 МПа [12] (литье, испытания в нормальных температурных условиях).

5) PETG – модернизированный сополиэфир полиэтиленгликольтерефталата – пластичной смолы, получаемый при добавлении второго хвоста гликоля при полимеризации [13]. Печать осуществлялась при температуре 230 °С, температура стола – 70 °С, в качестве адгезива использовался клей от «The3D».

Прочность на изгиб – 110,0 МПа [14], на растяжение – 39,0 МПа [15] (литье, испытания в нормальных температурных условиях).

Испытания проводились в испытательной машине Instron E1000, оснащенной криокамерой. Для работы с жидким азотом использовался сосуд Дьюара типа TPV-120 фирмы Wessington Cryogenics. Эксперименты по исследованию прочностных характеристик полимеров были проведены согласно требованиям, изложенным в работах [16, 17].

Для анализа возможностей применения материалов аддитивного производства при ремонтных работах в Арктической зоне испытания последовательно выполнялись при трех температурных режимах (+22 °С → 0 °С → –40 °С). Для каждого испытания, были выбраны пять материалов, описанных выше. На каждый эксперимент было отобрано по три образца, габаритами и формой согласно [16] для растяжения, и [17] для изгиба. Всего было из-

готовлено 100 образцов.

### Результаты

По итогам экспериментальных исследований на изгиб, получились зависимости, при

веденные на рис. 1.

На графиках представлены усредненные значения зависимостей при трех температурных режимах. На каждый температурный режим было испытано по три образца каждого материала.

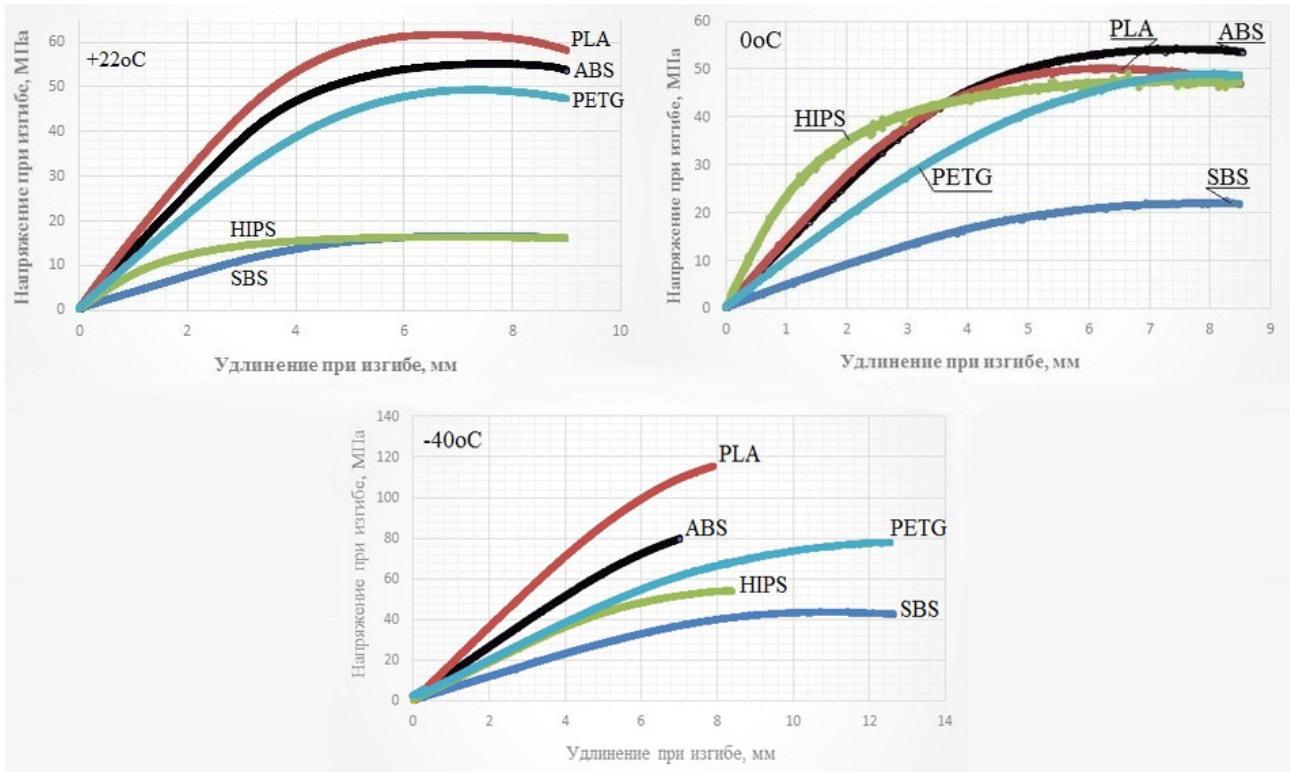


Рис. 1. Зависимость напряжения при изгибе от удлинения при трех температурных режимах

Из испытаний следует, что для представленных материалов имеется широкий разброс значений предела прочности при изгибе – от 16 до 60 МПа при комнатной температуре, и от 44 до 118 МПа при минусовом температурном режиме.

С изменением температуры меняются характеристики материалов. Пластики становятся менее пластичными, хрупкими, происходит хрупкое разрушение – проявляется, так называемая, температура стеклования.

Так, при 22 °С три пластика (ABS, PLA, PETG) лежат в «верхних» границах значений напряжений от 50 до 60 МПа, тогда как два оставшихся материала (HIPS, SBS) занимают «нижние» значения ≈ 16 МПа.

С понижением температуры до 0 °С у ABS и PETG-пластиков значения предельных напряжений практически не изменяются. У PLA и SBS-пластиков наблюдается незначительное изменение значений предельных напряжений, по сравнению со значениями при комнатной температуре, в среднем на 8 МПа. У оставше-

гося HIPS-пластика наблюдается значительное изменение значений напряжений на 30 МПа.

С дальнейшим понижением температуры до -40 °С, по сравнению с данными при 0 °С, значения предельных напряжений возрастают в среднем в 1,7 раза: у ABS – в 1,3 раза; SBS – в 2,7 раз; PLA – в 1,9 раз; HIPS – в 1,2 раза; PETG – в 1,6 раз.

Удлинение материалов при максимальном значении прочности на изгиб составляло, в среднем, 7,7 мм – при 22 °С и 0 °С. Удлинение при -40 °С составило в среднем 9,8 мм.

Образцы после испытаний представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в исходную форму вернулись два материала – SBS и PETG. По ним не было зафиксировано ни одного разрушения. У остальных материалов (ABS, PLA) разрушения начинаются с 0 °С. При -40 °С разрушения зафиксированы у трех пластиков (PLA, HIPS, ABS) по всем напечатанным образцам.

Относительно испытаний на растяжение

имеются данные [18], где указано на невозможность проведения испытаний на растяжение образцов с геометрией «гантелеобразной» формы [19]. Такое утверждение, согласно данным [18] верно в том случае, когда слои, производимые печатающей головкой, пред-

ставляют собой «спиралевидную» или «лабиринтоподобную» линию. По мнению авторов, такая технология печати способна вызвать концентрацию напряжений вдали от рабочей зоны образца.



Рис. 2. Образцы после испытаний на изгиб: сверху-вниз: при +22 °С, 0 °С, - 40 °С; слева-направо: PLA, HIPS, SBS, ABS, PETG

В представленной работе, в виду несовершенства технологии печати образцов, возникла подобная проблема (рис. 3).

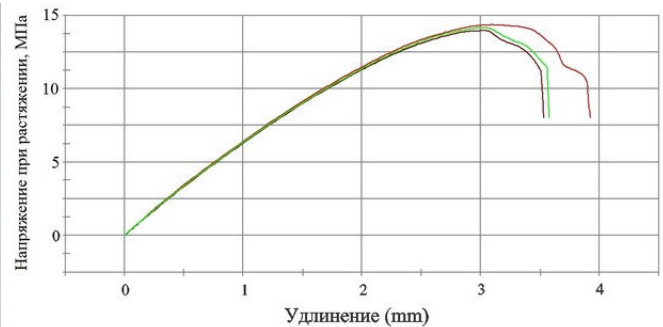


Рис. 3. Результаты испытаний на растяжения с образцами по [19]

Как можно видеть на рис. 3, образцы разрушались вдали от рабочей зоны, в местах концентрации напряжений. Было принято решение – сгладить поверхность образцов в местах перехода рабочей зоны с головкой.

После проведенных работ, в результате испытаний на растяжение получились следующие данные, приведенные на рис. 4.

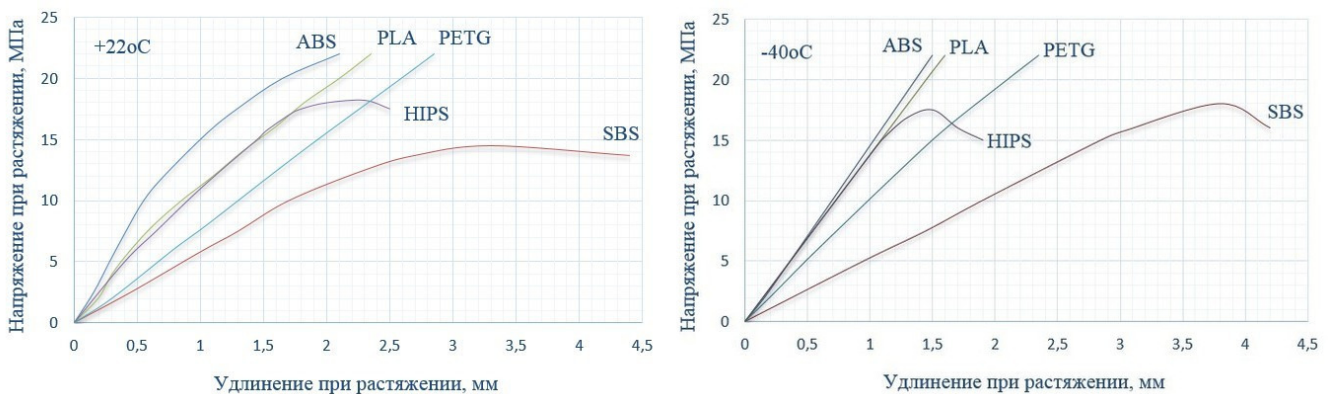


Рис. 4. Зависимость напряжения от удлинения при растяжении в двух температурных режимах (+22 °С и -40 °С)

Из рис. 4 следует, что с понижением температуры значения предельных напряжений при растяжении увеличиваются незначительно – в среднем в 1,2 раза. Значения удлинений при максимальном напряжении при растяжении, с понижением температуры, уменьшаются также незначительно – в среднем в 1,3 раза.

Наряду с этим были рассчитаны значения

модуля упругости (Юнга) – рис. 5.

Из рис. 5 видно, что значения модуля упругости уменьшаются с увеличением температуры. График можно разделить на условные границы, где в «нижних» пределах лежат значения SBS-пластика, в «средних» - PETG и HIPS, в «верхних» - PLA и ABS-пластика.

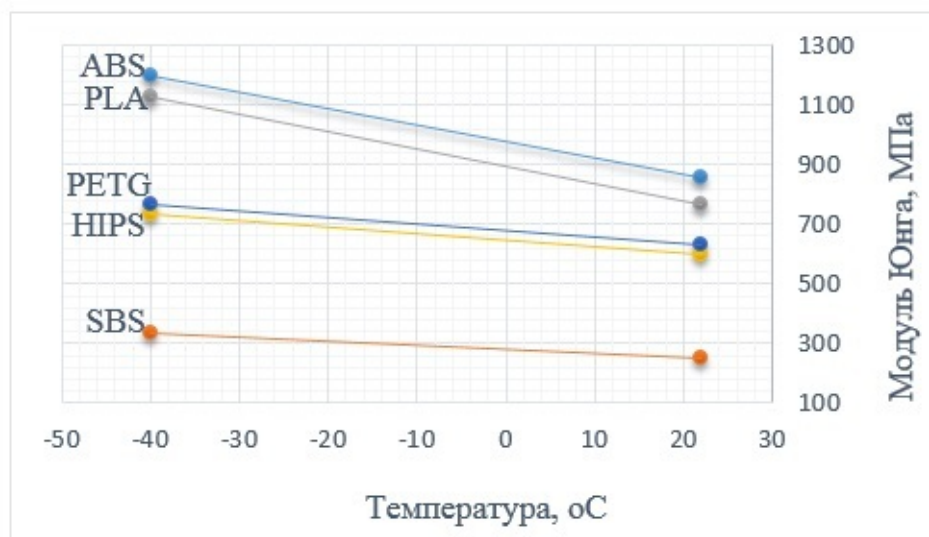


Рис. 5. Зависимость модуля упругости (Юнга) при растяжении от температурных режимов

### Обсуждение результатов

Для сравнения полученных данных с результатами прочностных испытаний образцов, изготовленных по традиционным технологиям

литья, все значения были объединены в таблицы. В табл. 1 представлено сравнение материалов традиционного и аддитивного производства относительно изгиба.

#### 1. Сравнение данных по изгибу относительно литьевых и аддитивных технологий изготовления объектов в различном диапазоне температур

Материал	Литье, +22 °C	3D-печать, +22 °C	3D-печать, 0 °C	3D-печать, -40 °C
	Предел прочности при изгибе, МПа			
ABS	79,8	55,05	54,57	71,86
SBS	34,1	16,55	22,38	44,01
PLA	94,9	61,61	50,72	117,76
HIPS	30,0	16,30	47,03	54,82
PETG	110,0	49,18	49,32	79,32

Из табл. 1 следует, что, по сравнению с материалами, изготовленными методами литья и испытанными при нормальной температуре, изделия аддитивного производства, по своим прочностным характеристикам проигрывают в среднем в 1,8 раза. Наименьшая разница зафиксирована у ABS-пластика – значения предельных напряжений при изгибе для литья больше, чем значения аддитивного изготовления в 1,45 раза. Наибольшая разница у PETG – в 2,23 раза.

Сравнение материалов традиционного и

аддитивного производства относительно растяжения представлено в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что изделия, полученные традиционными технологиями выигрывают перед аддитивными, в данном случае, в 1,55 раза. ABS, PLA и PETG-пластики прошли цикл испытаний без разрушений и выдержали максимальную нагрузку, зона упругости не была достигнута.

Далее, в табл. 3, приведен расчет модуля Юнга для представленных материалов (для ABS, PLA и PETG – при максимальной нагрузке).

**2. Сравнение данных по растяжению относительно литьевых и аддитивных технологий изготовления объектов в различном диапазоне температур**

Материал	Литье, +22 °С	3D-печать, +22 °С	3D-печать, -40 °С
	Предел прочности при растяжении, МПа		
ABS	54,0	–	–
SBS	21,4	14,42	20,7
PLA	89,0	–	–
HIPS	26,8	16,68	18,68
PETG	39,0	–	–

**3. Сравнение данных по модулю Юнга относительно литьевых и аддитивных технологий изготовления объектов в различном диапазоне температур**

Материал	Модуль Юнга, МПа		
	Литье, +22 °С	3D-печать, +22 °С	3D-печать, - 40 °С
ABS	1700...2930 [20]	857	1200
SBS	1800...2000 [21]	250	333
PLA	1300...1800 [22]	766	1125
HIPS	1300...2800 [23]	600	737
PETG	2000...3000 [24]	632	766

Из табл. 3 можно сделать выводы о том, что относительно модуля Юнга представленные материалы аддитивного производства уступают материалам, изготовленным традиционными методами литья, в среднем в 3,24 раза. Меньшая разница, по сравнению с минимальными значениями модуля Юнга при литье, у ABS-пластика (1,98 раза), большая – у SBS-пластика (7,2 раза).

При сравнении значений модуля Юнга, полученных в работе [18] с показателями представленной работы, средняя погрешность между ними составляет 17 % (632 МПа в данной статье и 526 МПа – в материалах работы [18]), что свидетельствует о достаточной достоверности полученных данных.

**Заключение**

Несмотря на то, что 3D-печать применяется в разнообразных секторах промышленности, данная технология не является совершенной. Исходя из представленных результатов экспериментальных исследований и сравнительного анализа традиционных и аддитивных технологий, 3D-печать заметно искажает характеристики материалов. Разница между прочностными характеристиками существенна, и это может заметно сказаться на эксплуатационных характеристиках изделий при их непосредственном использовании.

Технологиям 3D-печати в аспекте пластмассового производства предстоит еще решить множество проблем для того, чтобы приблизиться к традиционным методам изго-

товления продукции при помощи литья: создать единую информационную платформу на базе цифровых технологий, разработать национальные стандарты и нормативную документацию, сформировать и систематизировать «паспорт» физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с учетом различных эксплуатационных факторов.

При дальнейших исследованиях, необходимо оптимизировать технологию работы с 3D-печатью, либо учитывать полученные результаты прочностных характеристик при изготовлении продукции по данной технологической схеме.

Данное исследование может оказать помощь судовладельцам и другим производственным структурам, планирующим установку оборудования 3D-печати на борту своих судов и прочих машин для оперативной печати и замене износившихся деталей «на месте» без постановки сложного габаритного инженерного сооружения на длительный ремонт.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. J. Bergsma, M. vander Zalm, J. Pruyn. 3D-Printing and the Maritime Construction Sector. Conference Paper, HIPER 2016, At Cortona, Italy, Vol. 10, pp. 428-442.
2. M. Zanardini, A. Bacchetti, S. Zanoni, M. Ashourpour. Additive Manufacturing applications in the domain of Product Service System: an empirical overview. Procedia CIRP, 47, 2016, pp. 543-548.
3. A. Laplume, B. Petersen, J. Pearce. Global Value Chains from a 3D Printing Perspective. Journal of International

Business Studies, Vol. 47, No. 5, 2016, p. 595-609.

4. **Шмелев, А.С.** Экономическая эффективность использования аддитивных технологий в судостроении // Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Казань, 17 мая 2018 г.). В 2 ч. Ч.2. – Стерлитамак: АМИ, 2018. – С. 134-136.

5. **Дорошенко, В.С.** 3D-технологии для формовки и литья // Литье и металлургия. – 2015. – №3 (80). – С. 30-39.

6. **G.D. Airey.** Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. Journal of Materials Science. – Vol. 39, – No.3, – 2004, – pp. 951-959.

7. **Лобанов, А.В., Пряников Д.В., Алексеев А.А., Осипчик В.С.** Свойства блок-сополимера стирола и бутадиена марки «Стиротеп-70» // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. – Т. XXVI. – №4 (133). – С. 32-36.

8. **C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian.** Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modeling. Mechanical Engineering. – No.7, – 2012, – pp.159-180.

9. **Мишкин, С.И., Тихонов, Н.Н.** Полимерные композиты на основе акрилонитрилбутадиенстирола и полимолочной кислоты // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. XXV. – №3 (119). – С. 19-24.

10. **В. Вах, J. Müsling.** Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. Composites Sciences and Technology. – Vol. 68, – No.7-8, – 2008, – pp.23.

11. **Алексеев, А.А., Осипчик, В.С., Алексеев, м.л. А.А., Коробко, Е.А., Чернышова, В.Н., Алексеев, П.А.** Особенности переработки смесей ударопрочного полистирола с полиэтиленом низкого давления на термопластавтоматах различного типоразмера // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2014. – Вып. 1. – Ч.2. – С. 263-275.

12. **E. Jakab, Md. A. Uddin, T. Bhaskar, Y. Sakata.** Thermal decomposition of flame-retarded high-impact polystyrene. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – No. 68-69, – 2003, – pp. 83-89.

13. **R.V. Dupaix, M.C. Vouce.** Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). Polymer. – Vol.46, – 2005, – pp.4827-4838.

14. **Арламова Н.Т., Бурмистр М.В., Хохлова Т.В., Розгон О.В., Сорока М.Л.** Экологические аспекты переработки отходов полиэтилентерефталата // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2012. – Вып. 40. – С. 146-150.

15. **Шилько С.В., Гракович П.Н., Хиженок В.Ф., Паркалов С.В.** Биомеханические свойства хирургических нитей с функциональным покрытием // Российский журнал биомеханики. – 2003. – Т.7. – №2. – С. 85-91.

16. **ГОСТ 11262-2017.** Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М: Стандартинформ, – 20 с.

17. **ГОСТ 4648-2014.** Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – М: Стандартинформ, – 20 с.

18. **K. Szykiedans, W. Credo, D. Osinski.** Selected mechanical properties of PETG 3D-prints, Procedia Engineering, – Vol. 177, – 2017, – pp.455-461.

19. **ISO 527-2.** Plastics – Determination of tensile properties. Part 2. Test conditions for moulding and extrusion plastics. – 2012. – 6 p.

20. **Барвинский, И.А., Барвинская, И.Е.** Справочник по литьевым термопластичным материалам. 2018. URL: [http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials\\_ABS.htm](http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_ABS.htm) (дата обращения: 10.06.2019).

21. **Периодическая** таблица полимеров. *E-plastic.ru*. URL: <https://e-plastic.ru/spravochnik/polimers/> (дата обращения: 10.06.2019).

22. **J. Russias, E. Saiz, R.K. Nalla, K. Gryn, R.O. Ritchie, A.P. Tomsia.** Fabrication and mechanical properties of PLA/HA composites: A study of in vitro degradation. Mater.Sci.Eng. C.Biomim.Supramol. Syst. – Vol. 26(8), – 2006, – pp. 1289-1295.

23. **Барвинский, И.А., Барвинская, И.Е.** Справочник по литьевым термопластичным материалам. 2009. URL: [http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials\\_HIPS.htm](http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_HIPS.htm) (дата обращения: 10.06.2019).

24. **W.W. Focke, S. Joseph, J. Grimbeek, G.J. Summers, B. Kretzschmar.** Mechanical properties of ternary blends of ABS + HIPS + PETG. Polymer-Plastics Technology and Engineering. – Vol. 48 (8), – 2009, – pp. 814-820.

## REFERENCES

1. J. Bergsma, M. vander Zalm, J. Pruyn. 3D-Printing and the Maritime Construction Sector. Conference Paper, HIPER 2016, At Cortona, Italy, Vol. 10, pp. 428-442.

2. M. Zanardini, A. Bacchetti, S. Zaroni, M. Ashourpour. Additive Manufacturing applications in the domain of Product Service System: an empirical overview. Procedia CIRP, 47, 2016, pp. 543-548.

3. A. Laplume, B. Petersen, J. Pearce. Global Value Chains from a 3D Printing Perspective. Journal of International Business Studies, Vol. 47, No. 5, 2016, p. 595-609.

4. Shmelyov, A.S. Economic effectiveness in use of additive technologies in shipbuilding // *Proceedings on Totals of the Inter. Scientif.-Pract. Conf. (Kazan, May 17, 2018)*. In 2 Parts, Part 2. – Sterlitamak: AMI, 2018. – pp. 134-136.

5. Doroshenko, V.S., 3D-Technologies for molding and casting // *Casting and Metallurgy*. – 2015. – No.3(80). – pp. 30-39.

6. G.D. Airey. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. Journal of Materials Science. – Vol. 39, – No.3, – 2004, – pp. 951-959.

7. Lobanov, A.V., Pryanikov D.V., Alexeev A.A., Osipchik V.S. Properties of block-copolymer of styrene and butadiene of type “Styrotep-70” // *Successes in Chemistry and Chemical Technology*. – 2012. – Vol XXVI. – No.4(133). – pp. 32-36.

8. C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposi-

tion modeling. *Mechanical Engineering*. – No.7, – 2012, – pp.159-180.

9. Mishkin, S.I., Tikhonov, N.N. Polymer composites based on acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid // *Successes in Chemistry and Chemical Technology*. – 2011. – Vol. XXV. – No.3(119). – pp. 19-24.

10. B. Bax, J. Müsling. Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Sciences and Technology*. – Vol. 68, – No.7-8, – 2008, – pp.23.

11. Alexeev, A.A., Osipchik, V.S., Alexeev, A.A.(Jr.), Koboko, E.A., Chernyshov, V.N., Alexeev, P.A. Processing peculiarities of shockproof polystyrene mixtures with low-pressure polyethylene on thermoplastic automatic machines of different dimensions // *Proceeding of TulaSU. Natural Sciences*. – 2014. – Issue 1. – Part 2. – pp. 263-275.

12. E. Jakab, Md. A. Uddin, T. Bhaskar, Y. Sakata. Thermal decomposition of flame-retarded high-impact polystyrene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – No. 68-69, – 2003, – pp. 83-89.

13. R.B. Dupaix, M.C. Boyce. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*. – Vol.46, – 2005, – pp.4827-4838.

14. Arlamova N.T., Burmist M.V., Khokhlova T.V., Rozgon O.V., Soroka M.L. Ecological aspects of polyethylene terephthalate waste processing // *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*. – 2012. – Issue 40. – pp. 146-150.

15. Shilko S.V., Grakovich P.N., Khizhenok V.F., Parkalov S.V. Biomechanical properties of surgical sutures with functional coating // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2003. – Vol.7. – No.2. – pp. 85-91.

16. GOST 11262-2017. *Plastic. Method for Tensile Test*. – М.: Standartinform, - pp.20.

3. Mikhailov, D.A. Basic peculiarities in GTE compressor blades 17. GOST 4646-2014. *Plastic. Methods of Testing for Static Bending*. – М.: Standartinform, - pp. 20.

18. K. Szykiedans, W. Credo, D. Osinski. Selected mechanical properties of PETG 3D-prints, *Procedia Engineering*, – Vol. 177, – 2017, – pp.455-461.

19. ISO 527-2. *Plastics – Determination of tensile properties. Part 2. Test conditions for moulding and extrusion plastics*. – 2012. – 6 p.

20. Barvinsky, I.A., Barvinskaya, I.E. *Reference Book on Molding Thermoplastic Materials*. 2018.

URL: [http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials\\_ABS.htm](http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_ABS.htm) (address date: 10.06.2019).

21. *Polymer Periodic Table. E-plastic.ru*. URL: <https://e-plastic.ru/spravochnik/polimers/> (Address data: 10.06.2019).

22. J. Russias, E. Saiz, R.K. Nalla, K. Gryn, R.O. Ritchie, A.P. Tomsia. Fabrication and mechanical properties of PLA/HA composites: A study of in vitro degradation. *Mater.Sci.Eng. C.Biomim.Supramol. Syst*. – Vol. 26(8), – 2006, – pp. 1289-1295.

23. Barvinsky, I.A., Barvinskaya, I.E. *Reference Book on Molding Thermoplastic*. 2009. URL: [http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials\\_HIPS.htm](http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_HIPS.htm) (address date: 10.06.2019).

24. W.W. Focke, S. Joseph, J. Grimbeek, G.J. Summers, B. Kretzschmar. Mechanical properties of ternary blends of ABS + HIPS + PETG. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – Vol. 48 (8), – 2009, – pp. 814-820.

Рецензент д.т.н. В.И. Сутырин

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбкова.

Сдано в набор 17.02.2020. Выход в свет 28.02.2020.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
"Брянский государственный технический университет"  
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+