

UOT: 621.762.08.11

ADDİTİV TEXNOLOGİYA İLƏ ÇAP EDİLMİŞ POLİMER MATERİALLARIN MÜXTƏLİF İSTİSMAR REJİMLƏRİNDƏ MEXANİKİ XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

Xankişiyev İ.A., Paşazadə S.Q., Həməzəyev X.Q.

“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası” PHŞ

AZ1000, Bakı şəh., Z. Əliyeva küç., 18

E-mail: isaq.xankishiyev@asco.az, pasazade.selim@gmail.com, khaganihamzayev@gmail.com

Xülasə. Bu məqalədə 3D çapda geniş istifadə olunan ABS, SBS, PLA, HIPS və PETG kimi additiv texnologiya (AT) materiallarının müxtəlif istismar rejimlərində (temperatur rejimlərində) mexaniki xüsusiyyətləri tədqiq edilmişdir. Nümunələr Creality CR10 markalı 3D-çap maşınında çap edilmişdir. Çap xüsusiyyətlərinə forsun diametri 0,4 mm, sapların (filamentlərin) diametri 1,75 mm, çap sürəti 45 mm/s, təbəqə qalınlığı isə 0,2 mm daxildir. Sınaqlar $+22^{\circ}\text{C}$, 0°C və -40°C temperaturlarında əyilmə və dartılma üzrə aparılmışdır. Əyilmə sınaqlarında, materialların möhkəmlik həddinin temperaturdan asılı olaraq əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdiyi müşahidə edilmişdir; otaq temperaturunda 16-60 MPa, mənfəi temperaturlarda isə 44-118 MPa arasında dəyişmişdir. Temperatur azaldıqca materiallar daha kövrək olur və şüşələşmə adlanan kövrək dağılma baş verir. Dartılma sınaqlarında isə hədd gərginliklərinin temperatur azaldıqca cüzi artdığı (orta hesabla 1,2 dəfə), uzanmanın isə azaldığı (orta hesabla 1,3 dəfə) qeyd edilmişdir. Yunq modulunda xassələrin temperatur artdıqca azaldığı müəyyən edilmişdir. Müqayisəli təhlil göstərmişdir ki, AT məhsulları ənənəvi qəlibləmə üsulları ilə hazırlanan materiallara nisbətən əyilmədə orta hesabla 1,8 dəfə, dartılmada 1,55 dəfə, Yunq modulunda isə 3,24 dəfə geri qalır. Sınaqlar nəticəsində gövdə materialı olaraq PLA seçilmişdir.

Abstract. This article investigates the mechanical properties of Additive Technology (AT) materials, such as ABS, SBS, PLA, HIPS, and PETG, commonly used in 3D printing, across various operational regimes (temperature regimes). Samples were printed using a Creality CR10 3D printer. Printing characteristics included a nozzle diameter of 0.4 mm, filament diameter of 1.75 mm, printing

speed of 45 mm/s, and layer thickness of 0.2 mm. Tests were conducted at temperatures of +22°C, 0°C, and -40°C for both bending and tensile properties. In bending tests, a significant variation in ultimate flexural strength with temperature was observed, ranging from 16-60 MPa at room temperature to 44-118 MPa at negative temperatures. As temperature decreases, materials become more brittle, leading to brittle fracture, a phenomenon known as glass transition. In tensile tests, ultimate tensile strengths showed a slight increase (average 1.2 times) with decreasing temperature, while elongation decreased (average 1.3 times). Young's modulus values were found to decrease with increasing temperature. Comparative analysis revealed that AT products lag behind materials produced by traditional molding methods by an average of 1.8 times in flexural strength, 1.55 times in tensile strength, and 3.24 times in Young's modulus. Based on the tests, PLA was chosen as the material for the casing.

Аннотация. В данной статье исследованы механические свойства материалов Аддитивных Технологий (АТ), таких как ABS, SBS, PLA, HIPS и PETG, широко используемых в 3D-печати, в различных эксплуатационных режимах (температурных режимах). Образцы были напечатаны на 3D-принтере Creality CR10. Характеристики печати включали диаметр сопла 0,4 мм, диаметр нитей 1,75 мм, скорость печати 45 мм/с и толщину слоя 0,2 мм. Испытания проводились при температурах +22°C, 0°C и -40°C на изгиб и растяжение. В испытаниях на изгиб наблюдалось значительное изменение предела прочности материалов в зависимости от температуры: от 16-60 МПа при комнатной температуре до 44-118 МПа при отрицательных температурах. С понижением температуры материалы становятся более хрупкими, что приводит к хрупкому разрушению – явлению, называемому стеклованием. В испытаниях на растяжение предельные напряжения незначительно возрастали (в среднем в 1,2 раза) с понижением температуры, а удлинение уменьшалось (в среднем в 1,3 раза). Было установлено, что значения модуля Юнга уменьшаются с повышением температуры. Сравнительный анализ показал, что изделия, изготовленные с использованием АТ, уступают материалам, полученным традиционными методами литья, в среднем в 1,8 раза по прочности на изгиб, в 1,55 раза по прочности на растяжение и в 3,24 раза по модулю Юнга. По результатам испытаний в качестве материала корпуса был выбран PLA.

Açar sözlər: additiv texnologiya, 3D çap, gəmiqayırma, polimerlər, gəmiqayırma materialı

Key words: additive technology, 3D printing, shipbuilding, polymer, shipbuilding material

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, судостроение, полимер, судостроительный материал

Giriş. 3D çapda plastiklərdə ən çox yayılmış Additiv texnologiya (AT) materialları ABS, SBS, PLA, HIPS və PETG-dir. Bütün plastiklərin çapı Creality CR10 markalı 3D-çap maşınında həyata keçirilmişdir. Bu maşının forsun diametri 0,4 mm, sapların (filamentlərin) diametri 1,75 mm, çap sürəti 45 mm/s, təbəqə qalınlığı isə 0,2 mm olmuşdur.

Plastik nümunələrin hazırlanması zamanı aşağıdakı çap xüsusiyyətləri müşahidə edilmişdir:

1. **SBS:** Çap 235°C temperaturda, masa temperaturu isə 60°C olmaqla həyata keçirilmişdir. Yapışdırıcı kimi "The 3D" şirkətinin yapışqanından istifadə edilmişdir. Qəlibləmə üsulları ilə hazırlanmış SBS-in normal temperatur şəraitində sınaqları zamanı əyilmədə möhkəmliyi 34,1 MPa, dartılmada möhkəmliyi isə 21,4 MPa olmuşdur [1].

2. **ABS:** Çap 245°C temperaturda, masa temperaturu isə 100°C olmaqla həyata keçirilmişdir. Yapışdırıcı kimi akril lakdan istifadə edilmişdir. Əyilmədə möhkəmliyi 79.8 MPa, dartılmada möhkəmliyi isə 54,0 MPa [2] təşkil etmişdir (qəlibləmə, normal temperatur şəraitində sınaqlar).

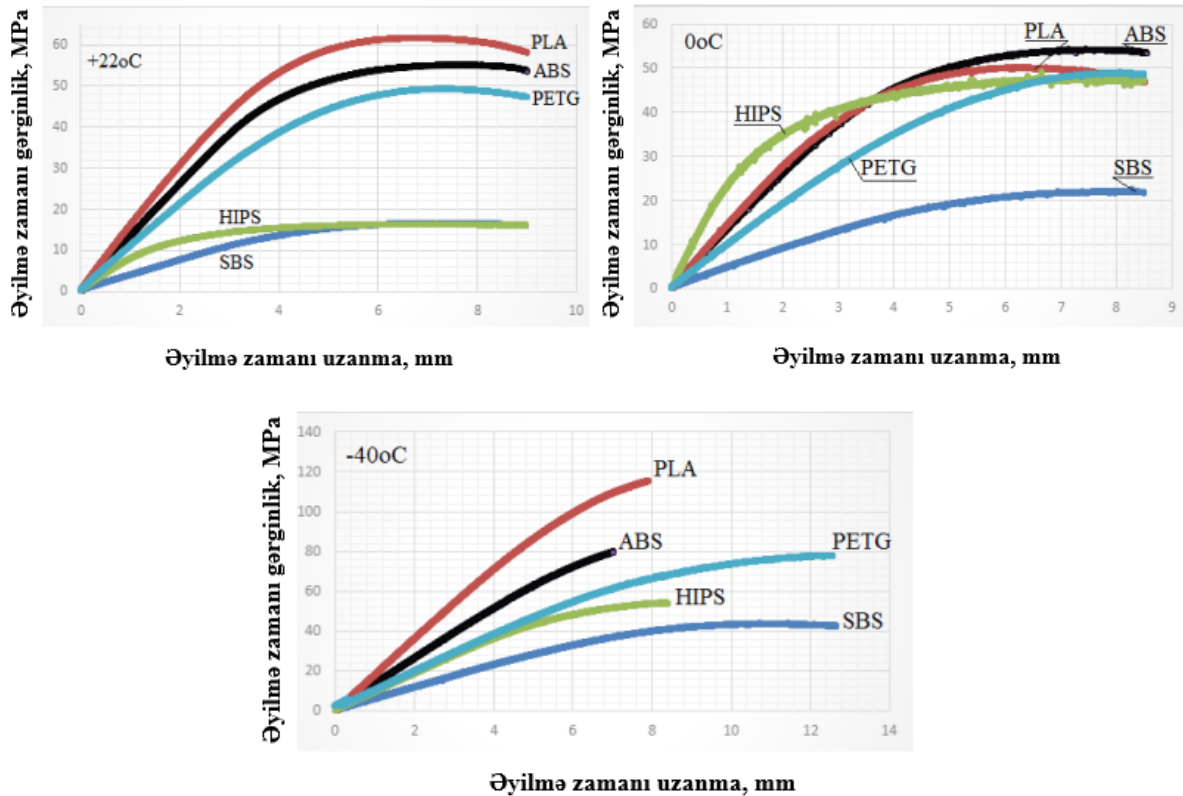
3. **PLA:** Çap 202°C temperaturda, ilk təbəqə üçün masa temperaturu 65°C, sonrakı təbəqələr üçün isə 55°C olmaqla həyata keçirilmişdir. Əyilmədə möhkəmliyi 94,9 MPa, dartılmada möhkəmliyi isə 89,0 MPa [2] olmuşdur (qəlibləmə, normal temperatur şəraitində sınaqlar).

4. **HIPS:** Çap 265°C temperaturda, masa temperaturu 100°C olmaqla həyata keçirilmişdir. Yapışdırıcı kimi "The 3D" şirkətinin yapışqanından istifadə edilmişdir. Əyilmədə möhkəmliyi 30,0 MPa, dartılmada möhkəmliyi isə 26,8 MPa olmuşdur (qəlibləmə, normal temperatur şəraitində sınaqlar).

5. **PETG:** Çap 230°C temperaturda, masa temperaturu 70°C olmaqla həyata keçirilmişdir. Yapışdırıcı kimi "The 3D" şirkətinin yapışqanından istifadə edilmişdir. Əyilmədə möhkəmliyi 110,0 [3] MPa, dartılmada möhkəmliyi isə 39,0 MPa [4] olmuşdur (qəlibləmə, normal temperatur şəraitində sınaqlar).

Əsas hissə. Sınaqlar kriokamera ilə təchiz olunmuş Instron E1000 sınaq maşınında aparılmışdır. Maye azotla işləmək üçün "Wessington Cryogenics" firmasının TPV-120 tipli Dewar qabından istifadə edilmişdir. Polimerlərin möhkəmlik xassələrinin tədqiqi üzrə eksperimentlər müvafiq tələblərə uyğun olaraq aparılmışdır [5, 6].

Additiv texnologiya materiallarının müxtəlif istismar rejimlərində tətbiqi imkanlarını təhlil etmək üçün sınaqlar ardıcıl olaraq üç temperaturda (+22°C→0°C→-40°C) yerinə yetirilmişdir. Hər bir sınaq üçün yuxarıda təsvir olunan beş material seçilmişdir. Hər eksperimentə dartılma üçün [5] ölçü və formasına, əyilmə üçün isə [6] ölçü və formasına uyğun üç nümunə götürülmüşdür. Əyilmə sınaqlarının nəticələrinə əsasən, şəkil 1-də əks olunan asılılıqlar əldə edilmişdir. Qrafiklərdə üç temperatur rejimində asılılıqların orta qiymətləri təqdim edilmişdir. Hər bir temperatur rejimi üçün hər materialdan üç nümunə sınaqdan keçirilmişdir.



Şəkil 1. Üç temperatur rejimində əyilmə zamanı gərginliyin uzanmadan asılılığı

Sınaqlardan belə nəticə çıxır ki, təqdim olunan materiallar üçün əyilmədə möhkəmlik həddində geniş fərq müşahidə olunur və burada otaq temperaturunda 16-dan 60 MPa-a qədər, mənfi temperatur rejimində isə 44-dən 118 MPa-a qədər möhkəmlik həddi dəyişir.

Temperatur dəyişdikcə materialların xarakteristikaları da dəyişir. Plastik materiallar daha kövrək olur, kövrək dağılma baş verir və bu, şüşələşmə temperaturu adlanan bir haldır. Belə ki, 22°C-

də üç plastik material (ABS, PLA, PETG) gərginliyin yuxarı hədlərində, yəni 50÷60 MPa diapazonunda olur, qalan iki material (HIPS, SBS) isə aşağı həddində, təxminən 16 MPa ətrafında olur.

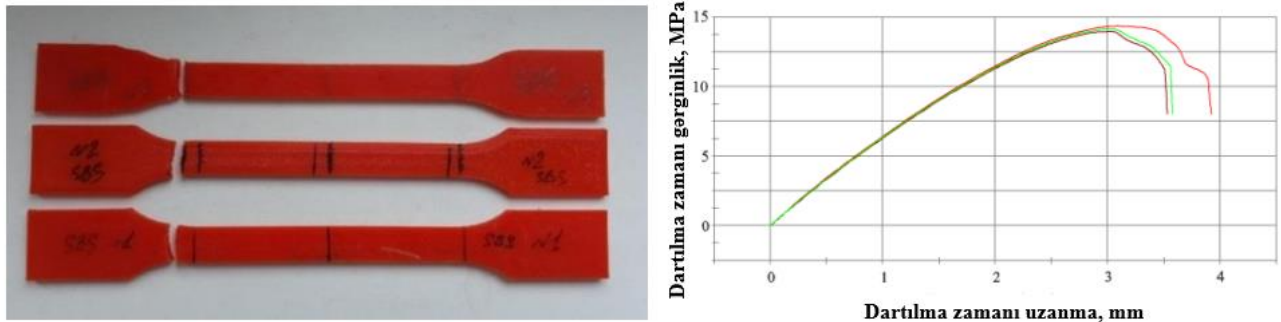
Temperatur 0°C-yə endikdə ABS və PETG materiallarında gərginliklərinin həddi praktiki olaraq dəyişmir. PLA və SBS materiallarında gərginliklərinin həddi otaq temperaturundakı nəticələrə nisbətən orta hesabla 8 MPa-a qədər dəyişə bilər. HIPS materialında isə gərginlik həddi (30 MPa) əhəmiyyətli dərəcədə dəyişikliyə məruz qalır. Temperatur -40°C-yə qədər aşağı düşməsi ilə gərginliklərin həddi 0°C-dəki göstəricilərlə müqayisədə orta hesabla 1,7 dəfə artır: ABS-də 1,3 dəfə, SBS-də 2,7 dəfə, PLA-da 1,9 dəfə, HIPS-də 1,2 dəfə, PETG-də isə 1,6 dəfə. Materialların əyilmədə möhkəmlik həddində maksimum uzanması 22°C və 0°C-də orta hesabla 7,7 mm olmuşdur. -40°C-də isə uzanma orta hesabla 9,8 mm olmuşdur. Sınaqlardan sonra nümunələr şəkil 2-də təqdim edilmişdir.



Şəkil 2. Əyilmə sınaqlarından sonra nümunələr:
- yuxarıdan aşağıya: +22°C, 0°C, -40°C-də;
- soldan sağa: PLA, HIPS, SBS, ABS, PETG

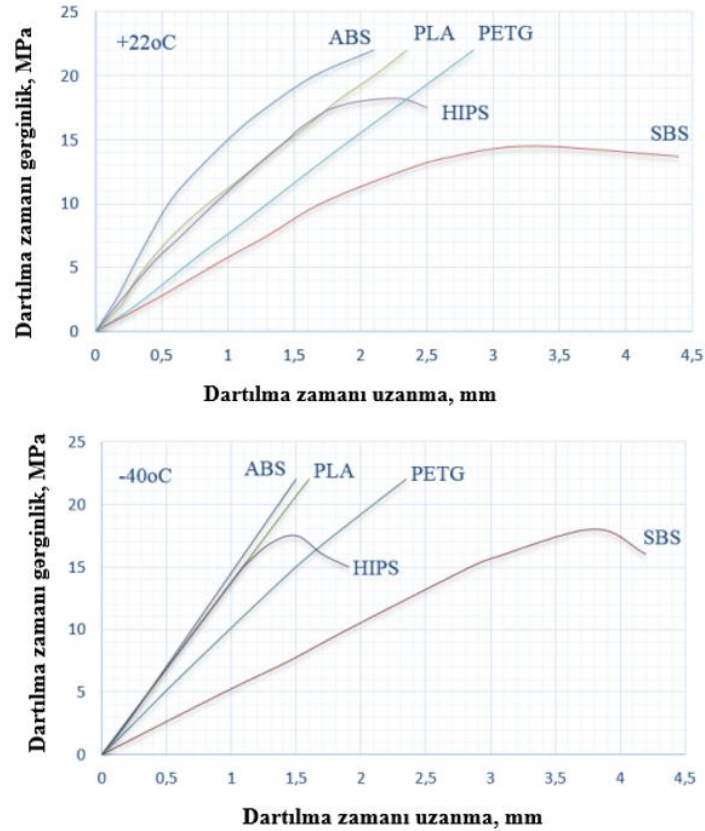
Şəkil 2-dən göründüyü kimi, iki material SBS və PETG öz ilkin formalarına qayıtmışdır. Bu materiallarda heç bir qırılma qeydə alınmamışdır. ABS, PLA materiallarında qırılmalar 0°C-dən başlamışdır, HIPS materialında isə qırılmalar -40°C-də müşahidə edilmişdir.

[7]-də dartılma sınaqları ilə əlaqədar məlumatları mövcuddur və burada [8]-ə əsasən "qantelə bənzər" formaya malik nümunələrin dartılma sınaqlarının aparılmasının qeyri-mümkün olduğu qeyd olunur. [7]-nin məlumatlarına görə, bu iddia çap başlığı tərəfindən istehsal olunan təbəqələr "spiralvari" və ya "labirintvari" xətt təşkil etdikdə özünü doğruldur. Müəlliflərin fikrincə, belə bir çap texnologiyası nümunənin işçi zonasından uzaq yerlərdə gərginlik konsentrasiyasına səbəb ola bilər. Təqdim olunan işdə, nümunələrin çap texnologiyasının qeyri-mükəmməlliyi səbəbindən oxşar bir problem yaranmışdır (şəkil 3).



Şəkil 3. [7, 8]-ə uyğun nümunələrlə dartılma sınaqlarının nəticələri

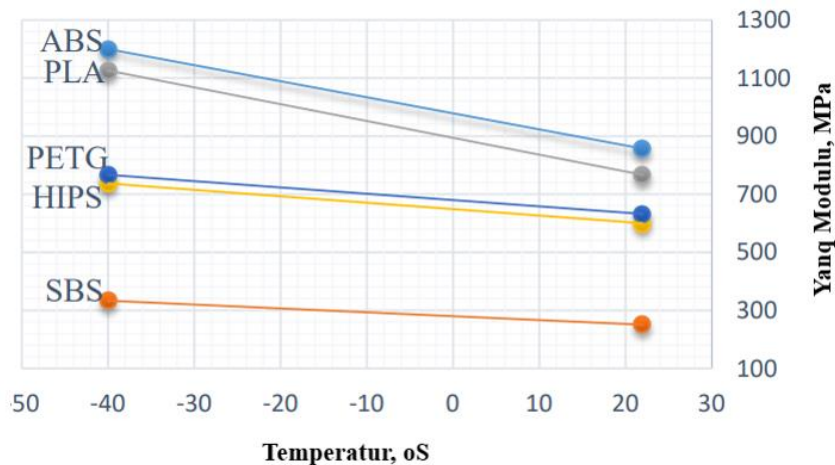
Şəkil 3-dən göründüyü kimi, nümunələr işçi zonadan uzaq, gərginlik konsentrasiyası olan yerlərdə dağılmışdır. Bunun qarşısının alınması üçün nümunələrdə işçi sahədən başlığa keçid yerlərində səthin hamarlanması qərarı qəbul edilmişdir. Aparılan işlərdən sonra, dartılma sınaqları nəticəsində şəkil 4-də əks olunan aşağıdakı məlumatlar əldə edilmişdir.



Şəkil 4. İki temperatur rejimində dartılma zamanı gərginliyin uzanmadan asılılığı

Şəkil 4-dən göründüyü kimi, temperatur azaldıqca dartılmada gərginlik həddi az miqdarda, orta hesabla 1,2 dəfə artır. Dartılmada maksimum uzanması isə temperatur azaldıqca eyni şəkildə, orta hesabla 1,3 dəfə azalır. Həmçinin, elastiklik (Yunq) modulu da hesablanmışdır.

Şəkil 5-dən görünür ki, elastiklik modulu temperatur artdıqca azalır. Burada qrafiki şərti sərhədlərə bölmək olar: "aşağı" hədlərdə SBS, "orta" hədlərdə PETG və HIPS, "yuxarı" hədlərdə isə PLA və ABS materiallarının sınaq nəticələrini.



Şəkil 5. Dartılmada Yunq modulunun temperatur rejimlərindən asılılığı

3D çap nümunələrinin möhkəmlik sınaqlarının nəticələrini ənənəvi qəlibləmə texnologiyaları ilə hazırlanmış nümunələrin möhkəmlik sınaqlarının nəticələri ilə müqayisəsi cədvəl 1 və 2-də verilmişdir. Cədvəl 1-də ənənəvi və additiv texnologiya materiallarının əyilmədə möhkəmliyi təqdim olunur.

Cədvəl 1

Ənənəvi qəlibləmə və additiv texnologiya ilə hazırlanmış nümunələrin müxtəlif temperaturlarda əyilmədə möhkəmlik sınaqlarının nəticələri

Material	Qəlibləmə, +22°C	3D-Çap, +22°C	3D-Çap, 0°C	3D-Çap, -40°C
	Əyilmədə möhkəmlik həddi, MPa			
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

Bu cədvəl, hər bir materialın ənənəvi qəlibləmə üsulu ilə (+22°C-də) əldə edilmiş əyilmədə möhkəmlik həddi, həmçinin 3D-çap üsulu ilə hazırlanmış nümunələrin müxtəlif temperatur rejimlərində (+22°C, 0°C, -40°C) əldə edilmiş nəticələrini müqayisəli şəkildə göstərir. Cədvəl 1-dən göründüyü kimi, normal temperaturda sınaqdan keçirilmiş qəlibləmə üsulları ilə hazırlanmış materiallarla müqayisədə, additiv texnologiya məhsulları möhkəmlik xarakteristikalarına görə orta hesabla 1,8 dəfə geri qalır. Ən az fərq ABS materialında, ən böyük fərq isə PETG materialında (2,23 dəfə) qeydə alınmışdır.

Cədvəl 2

Ənənəvi qəlibləmə və additiv texnologiya ilə hazırlanmış nümunələrin müxtəlif temperaturlarda dartılmada möhkəmlik sınaqlarının nəticələri

Material	Qəlibləmə, +22°C	3D-Çap, +22°C	3D-Çap, -40°C
	Dartılmada möhkəmlik həddi, MPa		
ABS	54,0	-	-
SBS	21,4	14,42	20,70
PLA	89,0	-	-
HIPS	26,8	16,68	18,68
PETG	39,0	-	-

Cədvəl 2-dən belə nəticə çıxır ki, ənənəvi texnologiyalarla hazırlanmış məhsullar additiv texnologiya məhsullarını üstələyir. Bu halda, ABS, PLA və PETG materialları sınaq dövrünü dağılmadan keçmiş və maksimum yükə tab gətirmişdir və elastiklik zonasına çatmamışdır.

Daha sonra, cədvəl 3-də təqdim olunan materiallar üçün Yunq modulu hesablamaları verilmişdir (maksimum yükləmədə ABS, PLA və PETG materialları üçün). Cədvəl 3-dən belə nəticə çıxarmaq olar ki, Yunq modulu baxımından additiv texnologiya ilə hazırlanan materiallar ənənəvi qəlibləmə üsulları ilə hazırlanmış materiallardan orta hesabla 3,24 dəfə geri qalır. Ənənəvi qəlibləmədə Yunq modulunun minimum nəticəsi ilə müqayisədə ən az fərq ABS materialında (1,98 dəfə), ən böyük fərq isə SBS materialındadır (7,2 dəfə).

Yunq modulunun [7]-də əldə edilmiş sınaq nəticələri ilə təqdim olunan işin göstəriciləri müqayisə edildikdə, aralarındakı orta fərq 17% təşkil edir (aldığımız nəticələrdə 632 MPa, [7] materiallarında isə 526 MPa-dır). Bu da əldə edilmiş məlumatların kifayət qədər etibarlı olduğunu göstərir.

Ənənəvi qəlibləmə və additiv texnologiyaları ilə hazırlanmış nümunələrin müxtəlif temperaturalarda
 Yunq modulu sınaqlarının nəticələri

Material	Yunq modulu, MPa		
	Qəlibləmə, 22°C	3D-Çap, 22°C	3D-Çap, -40°C
ABS	1700–2930 [155]	857	1200
SBS	1800–2000 [156]	250	333
PLA	1300–1800 [157]	766	1125
HIPS	1300–2800 [158]	600	737
PETG	2000–3000 [159]	632	766

Nəticə. Aparılan tədqiqatlar nəticəsində, 3D çapda istifadə olunan ABS, SBS, PLA, HIPS və PETG polimerlərinin müxtəlif istismar rejimlərində (temperatur rejimlərində, +22°C, 0°C, -40°C) mexaniki xassələri müəyyən edilmişdir. Əyilmə sınaqlarında materialların möhkəmlik həddində temperaturdan asılı olaraq əhəmiyyətli dəyişikliklərin (otaq temperaturunda 16-60 MPa-dan mənfi temperaturlarda 44-118 MPa-a qədər) baş verməsi və temperatur azaldıqca kövrəkliyin artması müşahidə edilmişdir. Dartılma sınaqlarında isə temperatur azaldıqca gərginliklərin həddində cüzi artım (orta hesabla 1,2 dəfə) və uzanmada azalma (orta hesabla 1,3 dəfə) müşahidə edilmişdir. Yunq modulunun göstəriciləri temperatur artdıqca azalmışdır. Müqayisəli təhlil göstərir ki, additiv texnologiya ilə hazırlanan məhsullar ənənəvi qəlibləmə üsulları ilə hazırlanan materiallara nisbətən əyilmədə (orta hesabla 1,8 dəfə), dartılmada (orta hesabla 1,55 dəfə) və Yunq modulunda (orta hesabla 3,24 dəfə) geri qalır. Sınaqların yekununda gövdə materialı kimi PLA tövsiyə edilmişdir.

*Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir – **Grant № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01***

Ədəbiyyat

1. Свойства блок-сополимера стирола и бутадиена марки «Стиротэп-70» / А.В. Лобанов, Д.В. ряников, А.А. Алексеев, В.С. Осипчик // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. – Т. XXVI. – №4(133). – с. 32-36.
2. Мишкин, С.И. Полимерные композиты на основе акрилонитрилбутадиенстирола и полимолочной кислоты / С.И. Мишкин, Н.Н. Тихонов // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. XXV. – №3(119). – с. 19-24.
3. Экологические аспекты переработки отходов полиэтилентерефталата / Арламова Н.Т., Бурмистр М.В., Хохлова Т.В. [и др.] //Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. –2012. –№40. – с.146-150.
4. Биомеханические свойства хирургических нитей с функциональным покрытием /С.В. Шилько, П.Н. Гракович, В.Ф. Хиженко, С.В. Паркалов // Российский журнал биомеханики. – 2003. – Т.7. – №2. – с. 85-91.
5. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Дата введения: 1.10.2018. М.: Стандартиформ. – 24 с.
6. ГОСТ 4648-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Дата введения: 1.03.2015. М.: Стандартиформ. – 25 с.
7. Szykiedans, K. Selected mechanical properties of PETG 3D-prints / K. Szykiedans, W.Credo, D. Osiński // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 177. – P. 455-461.
8. ISO 527-2. Plastics – Determination of tensile properties. Part 2. Test conditions for moulding and extrusion plastics. Date of adoption: 1.06.2012. Deutsches Institut fur Normung e.V. – 6 p.

*Мəqalə qəbul olunub: 18.04.25
 Təvsiyə edib: prof. İsmayilov N.Ş.*