

## Własności wytrzymałościowe komponentów wykonanych z materiałów polimerowych w technologii FFF

K. Topolska<sup>a</sup>, M. Król<sup>b</sup>

<sup>a</sup> - Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska  
e-mail: kat.topolska@gmail.com

<sup>b</sup> - Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska  
e-mail: mariusz.krol@polsl.pl

### Streszczenie:

Celem pracy było zbadanie własności wytrzymałościowych komponentów wytworzonych w technologii FDM/FFF określonych w metodzie statycznej próby rozciągania oraz pomiaru uderności metodą Izoda. Próbki zostały wykonane z pięciu materiałów polimerowych- ABS, PLA, PET-G, Nylonu oraz PP. W druku komponentów zastosowano jednorodne wypełnienie o wartości 90% z użyciem geometrii wypełnienia w postaci siatki o nazwie Triangles. Kolejno wykonane próbki zostały poddane obróbce cieplnej, po czym określono wpływ wyżarzania na właściwości mechaniczne komponentów wykonanych z różnych materiałów.

### Abstract:

The aim of the this work was to examine the mechanical properties of components manufactured in FDM/ FFF technology, determined in the tensile test and Izod impact measurement. The samples were made of five polymer materials - ABS, PLA, PET-G, Nylon and PP. The printing of components used a homogeneous filling of 90% using the mesh geometry called Triangles. Subsequent samples were subjected to heat treatment, after which the effect of annealing on the mechanical properties of components made of different materials was determined.

**Słowa kluczowe:** komponenty polimerowe, druk 3d, FDM/FFF, własności mechaniczne

**Keywords:** polymer components, 3d printing, FDM/FFF, mechanical properties

## 1. WSTĘP

Przemysł addytywnego wytwarzania obejmuje wiele form technologii i materiałów. Kiedy większość ludzi myśli o drukowaniu 3D, skojarzenia nie pokrywają się całkowicie z rzeczywistością, lecz koncentrują na prostych urządzeniach, takich jak podstawowe komputery PC czy laptopy. Na co dzień nie stosuje się produkcji addytywnej. Większość komponentów wytwarza się w dalszym ciągu za pomocą odejmowania materiału od większych form reprezentowanego przez technologie cięcia, wiercenia, frezowania lub za pomocą formowania odmierzonej ilości materiału poprzez odlewanie czy wtrysk. W druku

3D używa się dokładnie tyle materiału ile potrzeba do wyprodukowania danego prototypu. Przyrostowe prototypowanie można podzielić na druk metalowy, polimerowy, z użyciem tkanin, tworzyw biokompatybilnych, tkanek ludzkich czy nawet samego jedzenia. W związku z tym ważny jest fakt postrzegania pojęcia addytywnego modelowania jako tego, które ma zastosowanie w przeróżnych aplikacjach oraz znajduje użytek w wielu branżach przemysłowych. Najczęściej używanymi materiałami w technikach przyrostowych są tworzywa polimerowe, co oznacza, iż druk typu FDM/FFF jest dominującą formą drukowania przestrzennego. Proces druku 3D jest dziedziną techniki wymagającą dużego stopnia wiedzy i doświadczenia w zakresie doboru prawidłowych parametrów procesu. Wymaga również zaangażowania użytkownika pod kątem kontroli prototypowanych elementów w trakcie ich wytwarzania. Dzięki ciągłej kontroli użytkownik jest w stanie na bieżąco kontrolować powstałe błędy lub nieprawidłowo dobrane parametry w wyniku czego jest zdolny zminimalizować straty materiałowe, a co za tym idzie również pieniężne. Jeśli chcemy spojrzeć na proces druku 3D od strony technicznej to możliwe są również awarie maszyn, samego zasilania czy też nieprawidłowo nawinięty na szpulę materiał. Skutkuje to zatrzymaniem procesu wydruku lub niezadowolającym użytkownika skutkiem finalnym takim jak zła geometria elementu czy też jego mało estetyczne wykończenie. Najbardziej innowacyjni przedstawiciele branży intensywnie pracują nad tym aby wykorzystać pełnię nowych możliwości zapewnianych przez technologie przyrostowe. Korzyści wynikające z wykorzystania druku 3D mogą dotyczyć prostoty procesu technologicznego lub profitów związanych z projektowaniem części. Druk przestrzenny eliminuje wiele dotychczasowych ograniczeń geometrii produkowanych części i porównując do tradycyjnych technologii otwiera na wiele nowych możliwości [1-8].

## **2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ**

W celu addytywnego wytworzenia próbek do badań wytrzymałościowych statycznej próby rozciągania oraz próby udarności Izoda wykorzystano pięć różnych materiałów polimerowych. Były to kolejno:

- ABS,
- PLA,
- PET-G,
- Polymaker CoPA,
- PP.

Każdy z wyżej wymienionych materiałów występował w postaci żyłki filamentu o średnicy 1,75 mm. W związku z odmiennymi charakterystykami poszczególnych materiałów niezbędne było dobranie odpowiednich, odmiennych parametrów procesu wydruku dla każdego z nich. Dokonano tego w oparciu o informacje pochodzące od producentów oraz własne doświadczenie. Wspomniane parametry przedstawiono w tabelicy 1.

### **2.1. Kształtki do badań wytrzymałościowych**

Modele kształtek do badań statycznej próby rozciągania tworzyw sztucznych oraz oznaczenia udarności metodą Izoda dla tworzyw sztucznych zostały zaprojektowane w oparciu o normy ISO 527-2:2012 oraz ISO 180. W tym celu opracowano modele kształtek w postaci wioselka typu 1A oraz prostopadłościanu bez karbu typu 180/U.

W próbie udarności wybrano kształtkę typu 180/U bez karbu z powodu konieczności zachowania odpowiedniej geometrii wyrobu. Karb wytworzony za pomocą technologii FFF mógłby w znaczący sposób wpłynąć na wyniki pomiarów oraz miejsce koncentracji naprężeń.

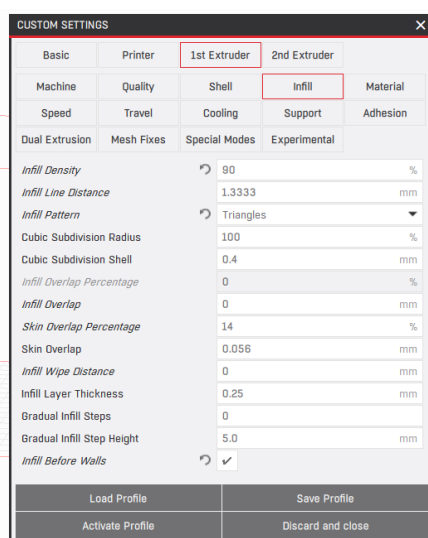
Powyżej przedstawione modele przeznaczone do statycznej próby rozciągania oraz próby uderności Izoda zapisano jako pliki o rozszerzeniu stl. i kolejno wczytano do oprogramowania 3DGence Slicer.

Tablica 1. Zestawienie głównych parametrów procesu wydruku

Parametr Wydruku	ABS	PLA	PET-G	Polymaker CoPA	PP
<b>Material</b>					
Średnica dyszy			0,4 mm		
Grubość warstwy			0,2 mm		
Prędkość wydruku			40 mm/s		
Temperatura stołu	90 °C	68 °C	75 °C	110 °C	100 °C
Temperatura głowicy	243 °C	240 °C	245 °C	250 °C	250 °C
Zastosowanie komory roboczej	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE
Zastosowanie materiału podporowego	TAK	NIE	NIE	TAK	TAK
Rodzaj materiału podporowego	HIPS	-	-	HIPS	BVOH

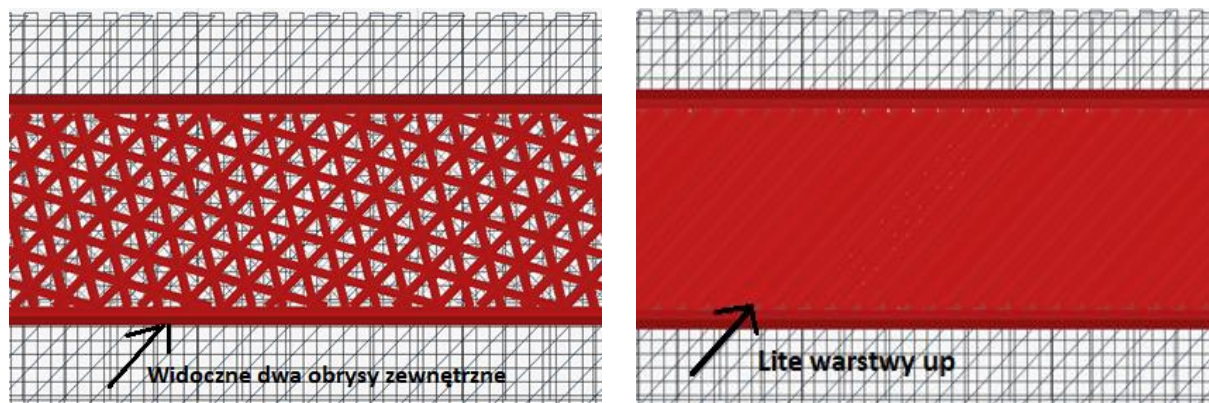
Za pomocą wspomnianego oprogramowania ustalono wszystkie niezbędne parametry wydruku, takie jak: rodzaj użytego materiału, rodzaj zastosowanego wypełnienia, wysokość warstwy, prędkość wydruku, temperatura stołu roboczego, temperatura ekstruzji, ilość litych warstw bottom, up oraz obrysów kształtek (rys. 1). W trakcie projektowania G-Code'ów i w nawiązaniu do wyników uzyskanych w wyniku poprzednio przeprowadzonych badań ustalono, iż modele posiadać będą kolejno:

- trzy warstwy up (górne)- o łącznej grubości 0,6 mm (rys. 2),
- trzy warstwy bottom (dolne)- o łącznej grubości 0,6 mm,
- dwa obrysy zewnętrzne- o łącznej grubości 0,4 mm (rys. 2).



Rysunek 1. Wizualizacja okienka w oprogramowaniu 3DGence Slicer w którym ustalone zostały parametry wypełnienia kształtek- 90% Triangles

Po wyborze ustalonych parametrów wytworzono oddzielne G-Code'y, które reprezentują ścieżki wydruku odczytywane przez drukarki.



Rysunek 2. Wizualizacje oznaczonych warstw up oraz obrysów zewnętrznych w oprogramowaniu 3DGence Slicer

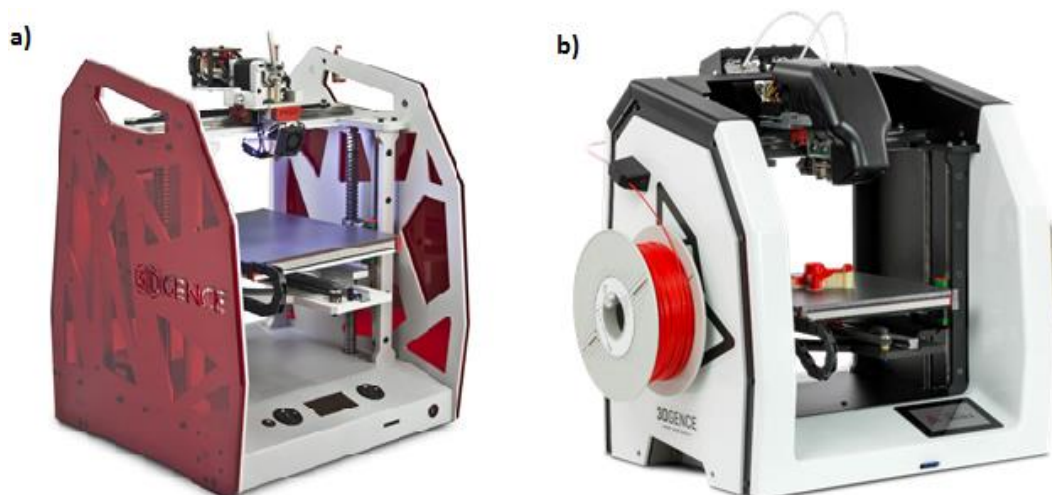
Wydruk większości próbek został zaprojektowany z użyciem materiału podporowego (HIPS lub BVOH), który zapewnia prawidłową adhezję do stołu ceramicznego drukarki na całej powierzchni próbki. Zapobiega również podwijaniu się materiału na końcach prototypowanych elementów.

Oprogramowanie 3DGence Slicer po wygenerowaniu ścieżki G-Code umożliwia użytkownikowi obserwację ułożenia próbek na stole roboczym oraz budowy modelu na przestrzeni czasu- warstwa po warstwie. G-Code'y zostały sformułowane w taki sposób, aby ścieżki ruchu głowicy nie przecinały próbek w inny sposób niż założona geometria wypełnienia. W przypadku wykonywanych wydruków łącznie osiągnięto ilość 20 nanoszonych warstw (łącznie z warstwami materiału podporowego).

## 2.2. Wydruk komponentów techniką FDM/FFF

Do wytworzenia zaprojektowanych kształtek do badań wytrzymałościowych wykorzystano trzech urządzeń drukujących w technologii FFF/FDM. Były to kolejno drukarki:

- 3DGence ONE (rys. 3a),
- 3DGence Double (rys. 3b),
- 3DGence F340 v.2 z wykorzystaniem modułu drukującego PRO.



Rysunek 3. a) Drukarka 3DGence ONE, b) Dwugłowicowa drukarka 3DGence Double

Z wcześniej opisanych materiałów oraz w oparciu o zastosowane parametry procesu wydrukowano po:

- 6 próbek do statycznej próby rozciągania z 5 różnych materiałów, łącznie 30 próbek;
- 10 próbek do próby uderzeniowej Izoda z 5 różnych materiałów, łącznie 50 próbek.

Czasy trwania wydruków pojedynczej kształtki z danego materiału wynosiły około:

- 52 minuty dla próbek do statycznej próby rozciągania,
- 19 minut dla próbek do próby uderzeniowej Izoda.

3 lub 5 próbek z poszczególnych materiałów pozostało w stanie nieobrobionym cieplnie natomiast pozostałe poddano obróbce cieplnej w kolejnym etapie badań.

### 2.3. Obróbka cieplna kształtek

Obróbkę cieplną przyrostowo wytworzonych próbek przeprowadzono w szczelnie zamkniętym piecu firmy Pol-eko z wewnętrzną cyrkulacją powietrza.

Próbki były wprowadzane do urządzenia w pięciu seriach, każda seria dla jednego materiału, a parametry takie jak temperatura oraz czas wygrzewania zostały dobrane w oparciu o karty charakterystyk danych filamentów oraz informacje literaturowe (tab. 2). W odpowiednim dobraniu wspomnianych parametrów ważne było również uwzględnienie grubości próbek oraz ich przekrój poprzeczny. Temperatura wygrzewania musiała zostać ustalona w ten sposób, aby była niższa od wartości temperatury mięknienia Vicata.

Tablica 2. Parametry obróbki cieplnej dla wybranych materiałów [38,39]

Parametr wygrzewania	ABS	PLA	PET-G	Polymaker CoPA	PP
Temperatura wygrzewania [°C]	95	50	75	140	105
Czas wygrzewania [min]	60	90	90	120	160

## 2.4. Badania makroskopowe oraz ocena jakości wydruków

W ramach badań jakości powierzchni wydruków przeprowadzono obserwację powierzchni z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego ZEISS SteREO Discovery.V12 przedstawionego na rysunku 50 poniżej. Zdjęcia wykonano z wykorzystaniem powiększeń: x8, x10, x15, x25, x40, x80.

Uzyskane zdjęcia pozwoliły na ocenę próbek pod kątem dokładności, estetyki uzyskanych wydruków, prawidłowości nanoszenia warstw przez głowicę, stopnia wzajemnej adhezji warstw oraz kontroli ewentualnie powstałych nadlewek lub nieprawidłowo poprowadzonych przez drukarkę ścieżek.

## 2.5. Badania własności mechanicznych

Badanie statycznej próby rozciągania tworzyw sztucznych zostało wykonane z wykorzystaniem wszystkich próbek wiosełkowych A1 wydrukowanych za pomocą technologii FDM/FFF. Całe badanie, począwszy od projektu CAD i skończywszy na opracowaniu wyników zostało przeprowadzone zgodnie z normą ISO 527-2:2012. Ustalenia normatywne zalecają zachowanie jednakowych warunków otoczenia, takich jak temperatura, prędkość odkształcenia kształtek oraz wilgotność powietrza, co zostało zachowane w ciągu przeprowadzanych prób.

Do przeprowadzenia badania wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick model Z100, która wykonuje statyczne próby rozciągania dowolnych materiałów w temperaturze pokojowej jak i podwyższonej do 1200°C.

Wyniki uzyskane w rezultacie przeprowadzonych prób użyto do wyznaczenia i porównania wartości wytrzymałości na rozciąganie dla próbek nieobrobionych cieplnie oraz po obróbce cieplnej dla każdego z pięciu materiałów. W tym celu, w oparciu o instrukcję z normy ISO 527-2:2012 wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ) określono jako stosunek największej siły rozciągającej  $F_m$  uzyskanej w próbce, do pola powierzchni początkowego przekroju próbki  $S_0$ . Naprężenie normalne próbki  $R_m$  odpowiada największej uzyskanej sile  $F_m$  i jest opisywane wzorem:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Jednostką opisującą wartość  $R_m$  są MPa.

Badanie statycznej próby udarności metodą Izoda dla tworzyw sztucznych wykonano dla wszystkich kształtek nieobrobionych oraz obrobionych cieplnie w oparciu o normę PN-EN ISO 180. Do badania wykorzystano młot wahadłowy Zwick/Roell HIT 50.

## 4. Wyniki badań

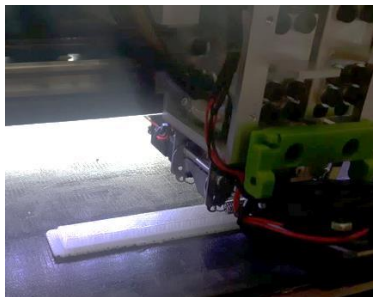
### 4.1. Druk FDM/FFF

W trakcie wytwarzania elementów za pomocą techniki FDM/FFF w celu uniknięcia błędów zwrócono uwagę na następujące aspekty:

- 1) Zastosowanie komory roboczej i utrzymywanie stałej temperatury środowiska dla wydruków z problematycznych materiałów, takich jak ABS w celu uniknięcia skurczu temperaturowego i odkształceń komponentów;
- 2) Zastosowanie materiału podporowego HIPS/BVOH dla wydruków z ABS, nylony oraz PP, co zapewniało poprawną adhezję pierwszych warstw kształtek nakładanych

na podłoże. W przypadku braku materiału podporowego i wydruków na drukarce jednogłowicowej zastosowanie specjalnego spay'u Dimafix zapewniającego prawidłową przyczepność do stołu roboczego (rys. 4);

- 3) Ciągła kontrola prędkości przepływu podawanego materiału w celu uniknięcia nadlewek materiałowych i osiągnięcia satysfakcjonującej estetyki wykonania. Kontrola prędkości nawiewu i chłodzenia materiału oraz komponentów w trakcie wytwarzania (rys. 5).



Rysunek 4. Kształtka z transparentnego materiału PP wytwarzana przyrostowo na materiale podporowym BVOH



Rysunek 5. Nadlewki materiału uzyskane w niezakceptowanej pod kątem jakości wykończenia próbce prototypowej (próbka górna) oraz kształtka z satysfakcjonującą jakością wykończenia po zmniejszeniu przepływu materiału (próbka dolna)

#### 4.2. Badania powierzchni za pomocą mikroskopu świetlnego oraz ocena jakości otrzymanych wydruków

Przed rozpoczęciem badań wytrzymałościowych na komponentach wytworzonych przyrostowo przeprowadzono obserwację powierzchni próbek nieuzbrojonym okiem oraz za pomocą mikroskopu świetlnego.

- 1) Próbki z materiału ABS charakteryzowały się:
  - gładką powierzchnią wykończenia (rys. 6),
  - brakiem skurczu materiałowego próbek wygrzewanych jak i nieobrobionych cieplnie,
  - jedna z białych próbek do badania udarności została odbarwiona na kolor czerwony po procesie wygrzewania w piecu (rys. 7).



Rysunek 6. Próbkki z ABS do statycznej próby rozciągania



Rysunek 7. Kształtka z ABS do próby udarności odbarwiona przez kształtki do statycznej próby rozciągania podczas wygrzewania w piecu

- 2) Próbkki z materiału PLA cechowały się:
- gładką powierzchnią wykończenia bez jakichkolwiek wad (rys. 8),
  - brakiem skurczu materiałowego wszystkich próbek.



Rysunek 8. Kształtki z materiału PLA, brak defektów

- 3) Kształtki wykonane z materiału PET-G opisywała:
- lśniące wykończenie powierzchni (rys. 9),

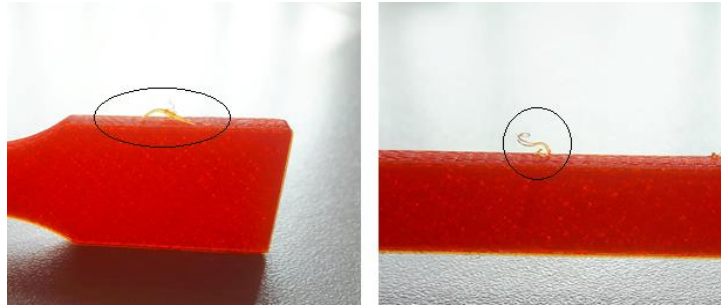


Rysunek 9. Kształtki z PET-G, charakterystyczne lśniące wykończenie powierzchni

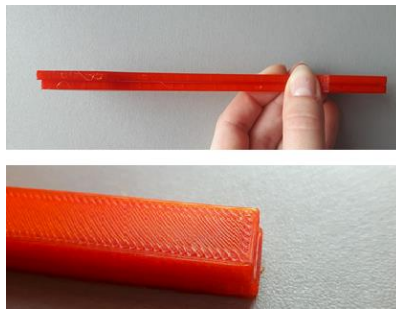
- niedoskonałości powstałe w procesie druku (rys. 10),



- skurcz próbek wygrzewanych cieplnie- kształtki do statycznej próby rozciągania- ok. 2mm, kształtki do próby udarności- ok. 1mm (rys. 11).

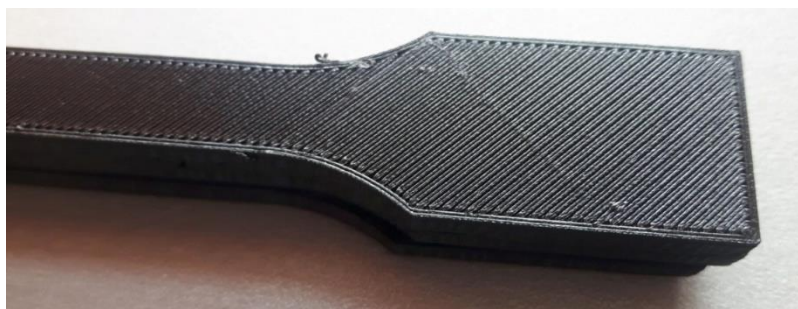


Rysunek 10. Niedoskonałości powstałe w trakcie procesu wydruku, nitki PET-G



Rysunek 11. Porównanie wymiarów próbek obrobionych cieplnie oraz bez obróbki- widoczny skurcz materiałowy

- 4) Kształtki wykonane z nylonu cechowały się:
- niewielkim skurczem materiałowym po procesie wydruku,
  - średnio estetycznym wykończeniu powierzchni (rys. 12),
  - nadlewkami materiału (rys. 13),
  - niewielkimi odkształceniami powierzchni po procesie wygrzewania (rys. 14).



Rysunek 12. Powierzchnia próbki z nylonu



Rysunek 13. Nadlewki materiałowe powstałe w trakcie procesu wydruku

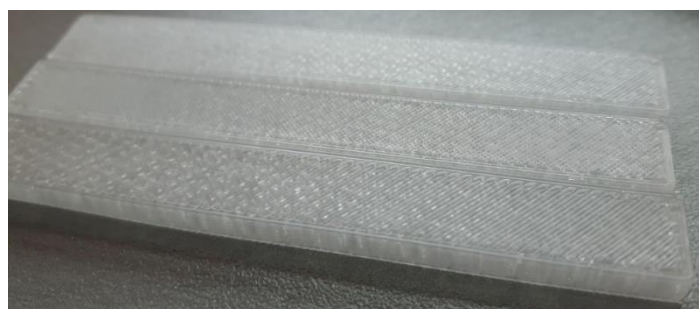


Rysunek 14. Lekko odkształcona próbka w wyniku obróbki cieplnej

- 5) Próbki wytworzone z PP charakteryzowały się:
- lśniącą powierzchnią (rys. 15, 16),
  - brakiem jakichkolwiek wad oraz odkształcenia czy skurczu po wygrzewaniu.

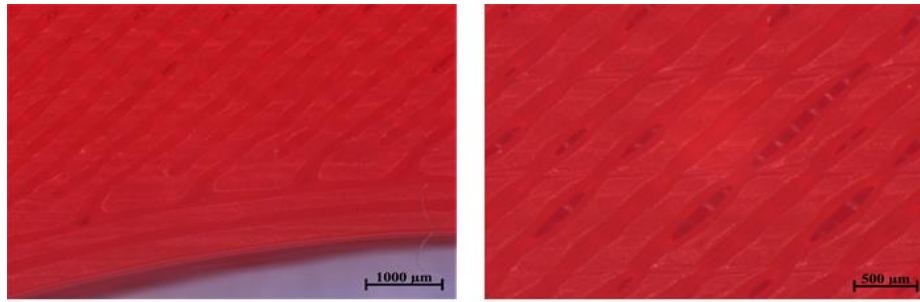


Rysunek 15. Powierzchnia kształtek wykonanych z PP- bez zastrzeżeń

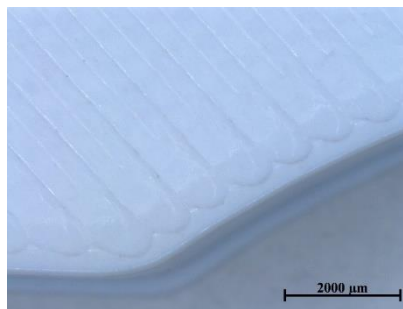


Rysunek 16. Kształtki do próby udarności- materiał PP

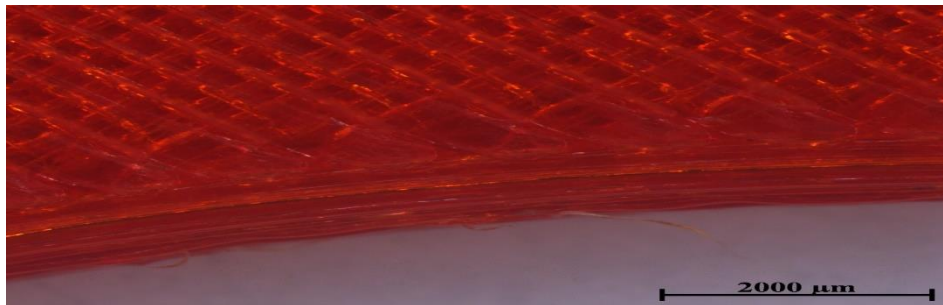
Wyniki obserwacji powierzchni z użyciem mikroskopu świetlnego zostały przedstawione na rysunkach 17-21 poniżej.



Rysunek 17. Powierzchnia up próbki z materiału ABS, powiększenia x25 i x40



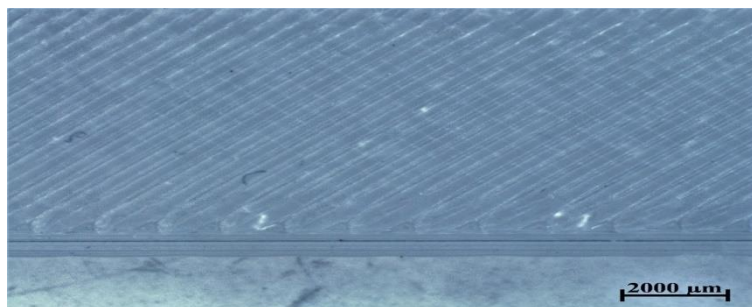
Rysunek 18. Powierzchnia próbki z PLA, powiększenie x20



Rysunek 19. Powierzchnia próbki z PET-G, powiększenie x20



Rysunek 20. Powierzchnia próbki z nylonu, powiększenie x20



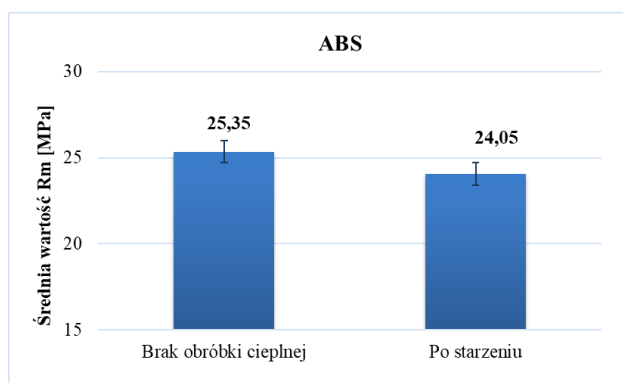
Rysunek 21. Powierzchnia próbki z PP, powiększenie x10

Na podstawie wykonanych badań makroskopowych stwierdzono, iż najmniej problematycznymi próbkami i jednocześnie posiadającymi najbardziej estetyczne wykończenie powierzchni były próbki z materiału PLA, PP. Kształtki wydrukowane z materiału ABS również charakteryzowały się brakiem defektów powierzchniowych lecz było to osiągnięte dzięki zastosowaniu odpowiednich warunków wytwarzania (komory) co może w niewielki sposób podnieść trudności wytwarzania. W momencie gdy użytkownik nie posiada komory temperaturowej bardzo ciężko jest zachować otrzymanie idealnie prostych powierzchni wydruków. Próbki wykonane z materiału PET-G posiadały liczne włoski, które były pozostałościami po ścieżkach prowadzonych przez głowicę. Bardzo często zdarza się, iż w trakcie wydruku należy przerywać ciągnące się linie filamentu za pomocą pęsety w celu zachowania wyższej estetyki wykończenia powierzchni. Kształtki z nylonu posiadały najgorsze wykończenie powierzchni drukowanej oraz liczne nadlewy.

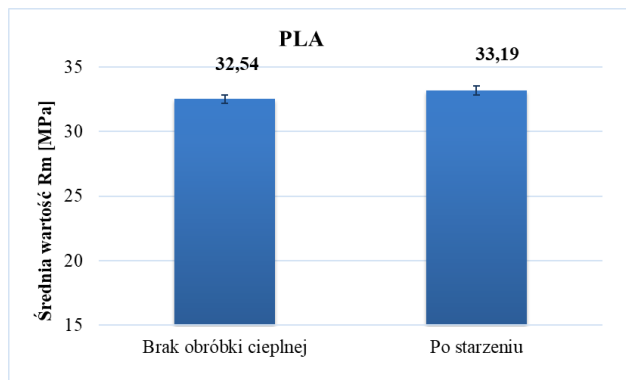
#### 4.3. Statyczna próba rozciągania

W oparciu o przeprowadzone badanie statycznej próby rozciągania materiałów polimerowych dla każdego z badanych tworzyw utworzono wykresy wydłużenie-naprężenie. W oparciu o wygenerowane wykresy odczytano wartości maksymalnego naprężenia uzyskanego dla poszczególnych próbek. Sporządzono również wykresy słupkowe obrazujące średnie wartości maksymalne naprężenia, obliczono wartości odchylenia standardowego i błędu pomiarowego dla wszystkich badanych materiałów. Uzyskane wyniki przedstawione zostały w tabelicy 3.

Na rysunkach 22-26 przedstawiono porównania średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek obrobionych i nieobrobionych cieplnie dla badanych materiałów.



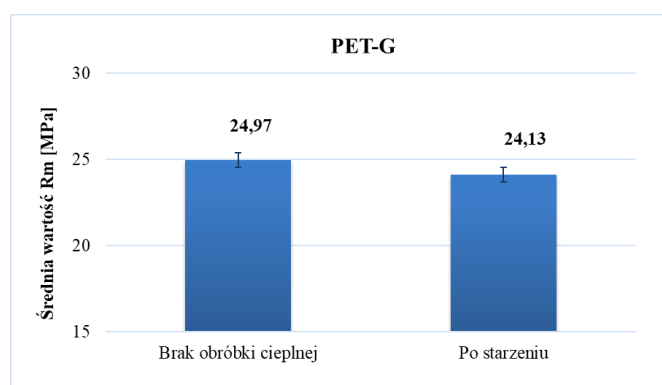
Rysunek 22. Porównanie średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek z ABS



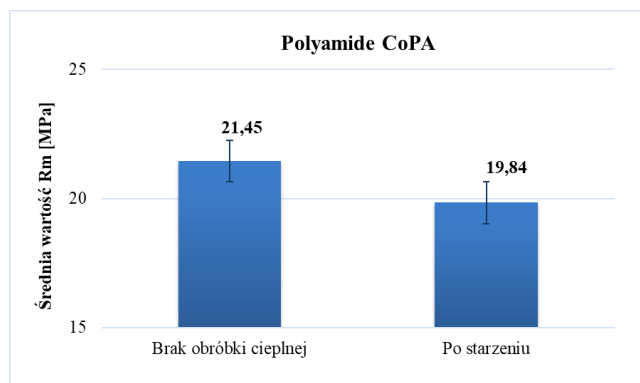
Rysunek 23. Porównanie średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek z PLA

Tablica 3. Wyniki Rm, odchylenia standardowe oraz błędy pomiarowe dla badanych materiałów

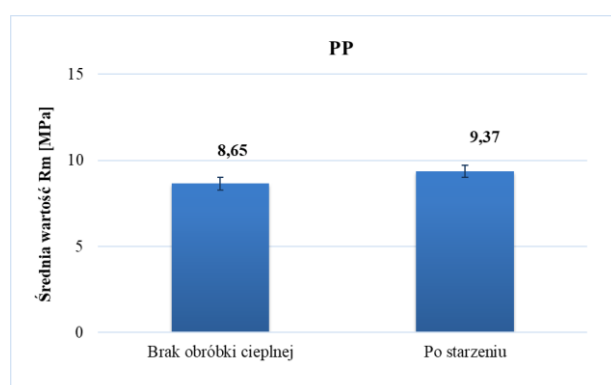
Rodzaj materiału	Zastosowana obróbka	Średnia wartość Rm [MPa]	Odchylenie standardowe	Błąd pomiarowy
ABS	brak	25,35	0,293	0,012
	wygrzewanie	24,05	1,478	0,062
PLA	brak	32,54	0,628	0,019
	wygrzewanie	33,19	1,231	0,037
PET-G	brak	24,97	1,017	0,041
	wygrzewanie	24,13	0,317	0,013
Polyamide CoPA	brak	21,45	4,970	0,232
	wygrzewanie	19,84	3,344	0,205
PP	brak	8,65	1,161	0,134
	wygrzewanie	9,37	1,148	0,123



Rysunek 24. Porównanie średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek z PET-G



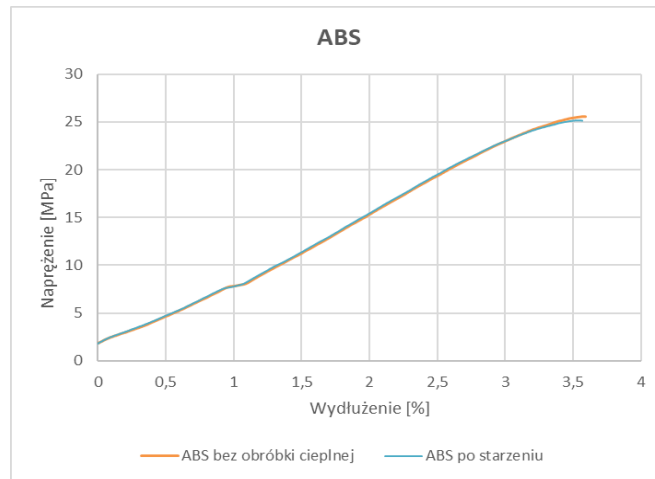
Rysunek 25. Porównanie średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek z Polyamide CoPA



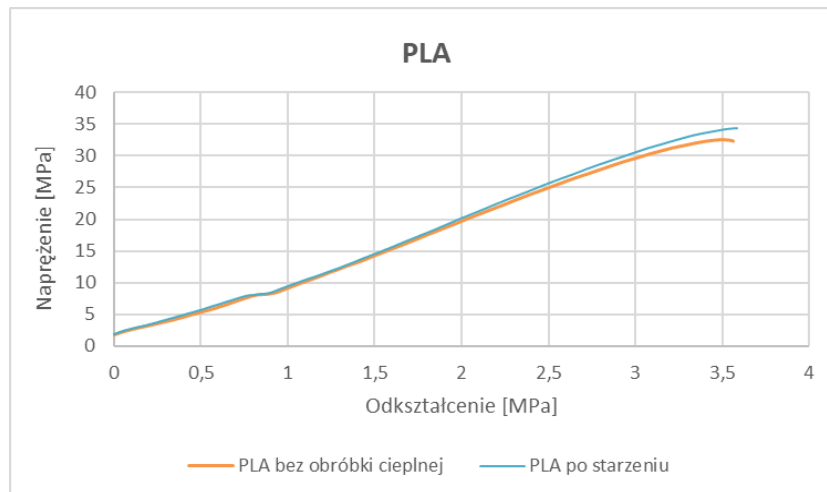
Rysunek 26. Porównanie średniej wytrzymałości na rozciąganie dla kształtek z PP

W oparciu o wyniki uzyskane w trakcie badania statycznej próby rozciągania kształtek wskazano materiały, które charakteryzowały się największą oraz najmniejszą wartością  $R_m$  osiągniętą w trakcie prób. Najniższą wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie - 8,65 MPa - uzyskały kształtki nieobrobione cieplnie wykonane z PP, kolejną najmniejszą wartością charakteryzowały się próbki wykonane z Nylonu obrobione cieplnie, których średnia wartość wytrzymałości wynosiła 19,84 MPa. Z kolei największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzowały się kształtki wykonane z materiału PLA poddane obróbce cieplnej. Średnia wartość wynosiła 33,19 MPa. Wnioskuje się, iż obróbka cieplna wydruków miała pozytywny wpływ jedynie na komponenty wytworzone z materiałów PLA oraz PP. Stopień w jakim wpłynęła na własności wytrzymałościowe jest niewielki, w związku z czym nie jest opłacalnym stosowanie jej, gdyż generuje dodatkowe nakłady czasowe obróbki oraz koszty. Z racji pozytywnie otrzymanych wyników warto skupić dalsze badania pod kątem wpływu parametrów obróbki cieplnej na własności wytrzymałościowe wydruków i dobrać je w taki sposób aby możliwe było osiągnięcie dzięki nim wyższych wartości wytrzymałości na rozciąganie, szczególnie w przypadku materiału PLA.

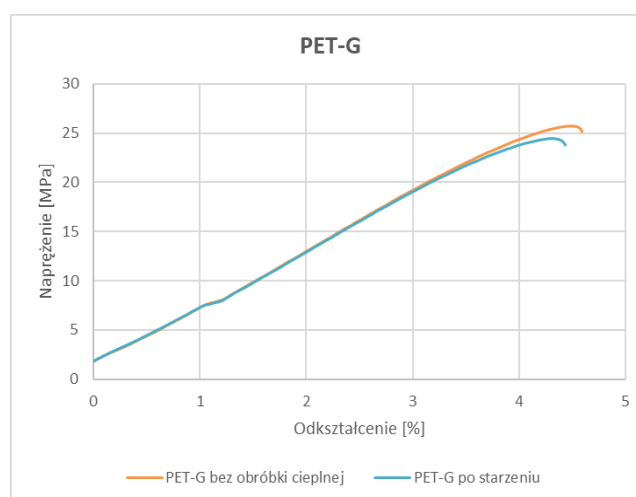
Na wykresach wydłużenie- naprężenie przedstawiono porównanie próbek nie poddanych obróbce cieplnej oraz tych po starzeniu dla każdego z materiałów (rys. 27- 31).



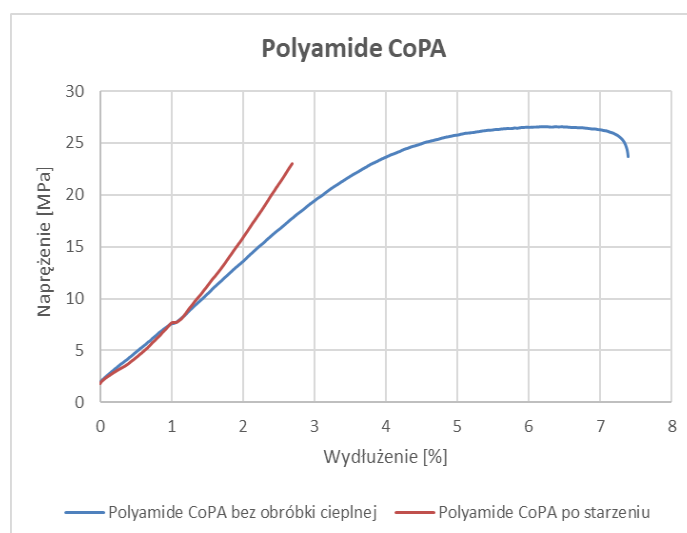
Rysunek 27. Wykresy wydłużenie- naprężenie dla próbek wytworzonych z ABS



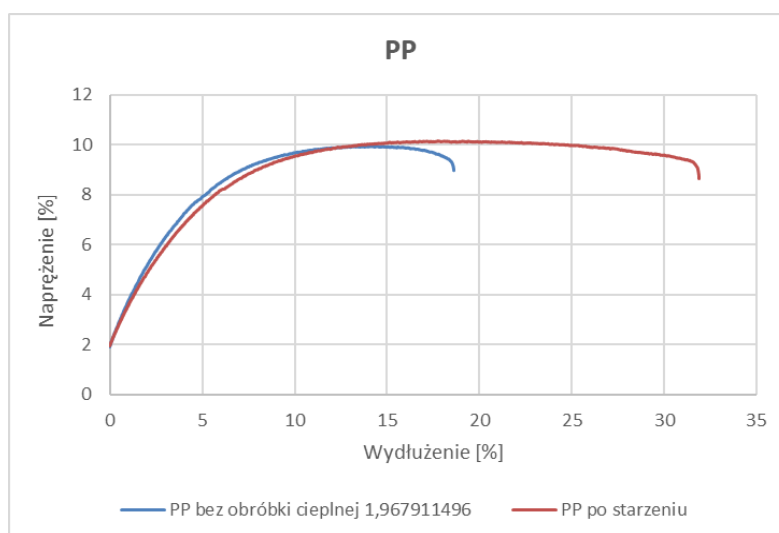
Rysunek 28. Wykresy wydłużenie- naprężenie dla próbek wytworzonych z PLA



Rysunek 29. Wykresy wydłużenie- naprężenie dla próbek wytworzonych z PET-G



Rysunek 30. Wykresy wydłużenie- naprężenie dla próbek wytworzonych z Polyamide CoPA

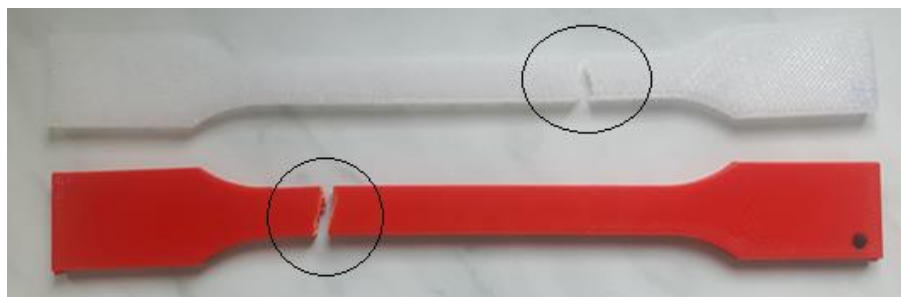


Rysunek 31. Wykresy wydłużenie- naprężenie dla próbek wytworzonych z PP

Na podstawie wyżej przedstawionych wykresów wydłużenie-naprężenie warto zauważyć, iż zarówno materiał o najwyższej wytrzymałości oraz o najniższej został zerwany zaraz po osiągnięciu wspomnianej, maksymalnej wartości  $R_m$ . Stwierdza się, iż wartość naprężenia maksymalnego była zbliżona wartością do naprężenia zrywającego. Wytrzymałość na rozciąganie dla materiałów ASB, PLA oraz PET-G po obróbce cieplnej zmieniła się w bardzo niewielkim stopniu. Osiągnięte wartości naprężenia oraz wydłużenia są do siebie zbliżone, aczkolwiek w przypadku PLA osiągnięte naprężenia były większe. Materiał Polyamide CoPA który pozostał bez obróbki cieplnej posiadał trzykrotnie większe wydłużenie niż materiał po starzeniu. Materiał po obróbce cieplnej charakteryzował się większą kruchością, natomiast bez obróbki wyższą plastycznością. Wprost przeciwnie do nylonu zachowały się kształtki wytworzone z PP- po obróbce cieplnej posiadały one dwukrotnie większe wydłużenie niż przed obróbką cieplną. Reasumując, obróbka cieplna w nieznacznym stopniu poprawiła własności wytrzymałościowe dla materiału PLA oraz zwiększyła plastyczność materiału PP.



Po wykonaniu badania zaobserwowano, iż wszystkie próbki zostały zniszczone w części pomiarowej (rys. 32), co świadczy o tym, iż były one poprawnie zamontowane w maszynie wytrzymałościowej, a ich wewnętrzna geometria była jednorodna, gdyż skupiała naprężenia w odpowiednich miejscach.



Rysunek 32. Miejsca zerwania próbek z ABS oraz PP

#### 4.4. Próba udarności metodą Izoda

W trakcie przeprowadzania próby udarności Izoda dla próbek bez karbu wykorzystano młot E=5,5 J. Zmierzono pracę potrzebną do złamania kształtki, której wyniki przedstawiono w tabelicy 4.

Tablica 4. Wyniki próby udarności metodą Izoda przedstawione w postaci pracy potrzebnej do złamania kształtki [J]. Znak „-” oznacz kształtki nieobrobione cieplnie, natomiast „+” kształtki po obróbce cieplnej.

	ABS		PLA		PET-G		Polyamide CoPA		PP	
Obróbka cieplna	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Średnia praca potrzebna do złamania próbki [J]	<b>0,312</b>	<b>0,296</b>	<b>0,396</b>	<b>0,452</b>	<b>0,198</b>	<b>0,252</b>	<b>0,327</b>	<b>0,221</b>	<b>1,560</b>	<b>1,272</b>
Odchylenie standardowe	0,032	0,033	0,023	0,118	0,057	0,056	0,148	0,042	0,343	0,337
Błąd pomiarowy	0,104	0,114	0,058	0,262	0,290	0,225	0,454	0,191	0,220	0,265

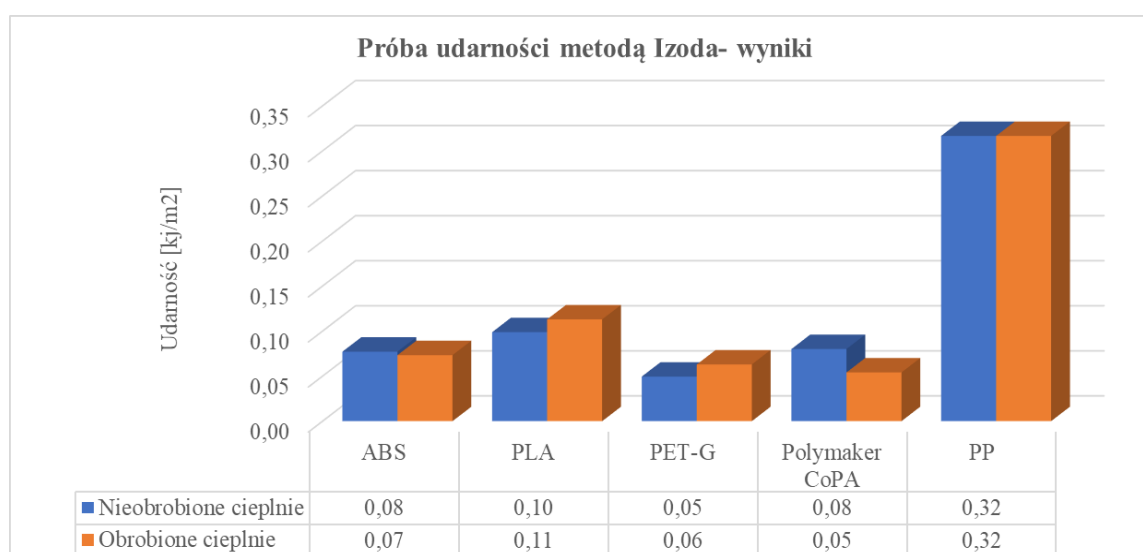
W tabelicy 5 zamieszczono wyniki obliczeniowe udarności kształtek oraz sposób w jaki zostały uszkodzone. Uszkodzenia opisano w nawiązaniu do oznaczeń pochodzących z normy w sposób następujący:

- C- złamanie całkowite,
- P- złamanie częściowe,
- N- brak złamania.

Oznaczenia uszkodzenia dopisane w nawiasach oznaczają literę odpowiadającą drugiemu pod względem częstotliwości występowania rodzajowi uszkodzeń dla danego typu kształtek.

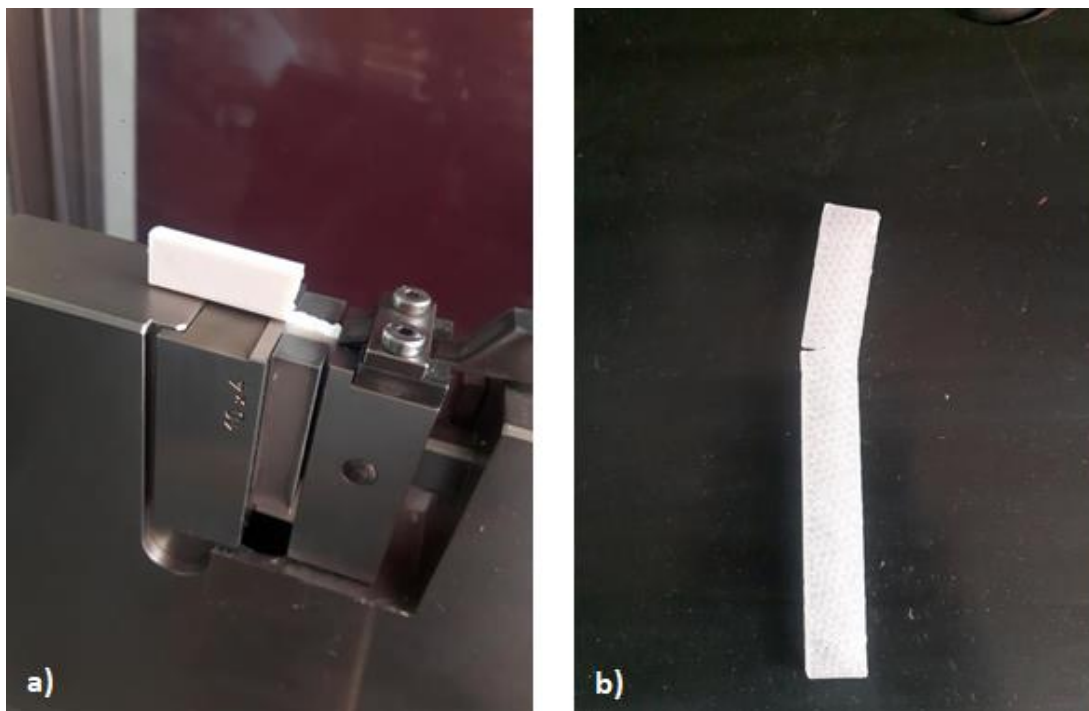
Tablica 5. Udarność zbadanych próbek z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń

Material	ABS		PLA		PET-G		Polyamide CoPA		PP	
Obróbka cieplna	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Typ złamania	C	C	C	C	C	C	H (C)	H (C)	P (N)	P (N)
Udarność [J/cm <sup>2</sup> ]	0,01	0,007	0,009	0,011	0,01	0,006	0,008	0,005	0,031	0,031
Udarność [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,08	0,07	0,098	0,112	0,049	0,062	0,080	0,054	0,316	0,316



Rysunek 33. Wyniki próby udarności

Na podstawie opisanych wyników stwierdzono, iż obróbka cieplna zwiększyła udarność dla próbek wykonanych z PLA (rys. 33) oraz PET-G, natomiast dla materiałów ABS oraz Polymaker CoPA udarność została zmniejszona. Wartość parametru pozostała niezmienna dla materiału PP. Materiał PP jednocześnie cechował się zdecydowanie wyższą udarnością niż pozostałe kształtki. Spowodowane może być to jego brakiem podatności na kruche łamanie- żadna z próbek wytworzonych z PP nie została złamana całkowicie, następowały jedynie niewielkie złomy-przykładowy przedstawiony na rysunku 34. Stopień zwiększenia udarności w materiałach w których został osiągnięty nieznacznie wpłynął na poprawę ich własności. Osiągnięta wartość wzrosła w tak niewielkim stopniu w związku z czym wnioskuje się, iż proces obróbki cieplnej nie jest opłacalny do poprawy udarności komponentów wytworzonych technologią FDM/FFF.



Rysunek 34. a) Kształtka z PLA złamana częściowo (zdecydowana większa część), b) Kształtka z PP złamana w bardzo niewielkim stopniu

## 6. Wnioski

1. W oparciu o wykonane badania stwierdzono, że najlepszymi własnościami wytrzymałościowymi cechują się próbki wykonane z materiału PLA oraz poddane obróbce cieplnej. Średnia wartość  $R_m$  dla tego filamentu wynosiła 33,1 MPa. Najniższe naprężenia rozciągające osiągnięto dla próbek wytworzonych z PP- 8,65 MPa. Najwyższy wynik otrzymany dla pojedynczej kształtki wynosił 34,453 MPa i był reprezentowany przez wygrzany materiał PLA.
2. Obróbka cieplna spowodowała wzrost wytrzymałości na rozciąganie dla materiałów PLA (średnio o 0,65 MPa) oraz PP (średnio o 0,72 MPa), obniżyła tę wartość dla ABS (średnio o 1,3 MPa) i Nylonu (średnio o 1,61 MPa). Wyniki dla PET-G pozostały na jednakowym poziomie.
3. Najwyższą udarność odznaczały się próbki wytworzone z PP- 0,316 kJ/m<sup>2</sup>, drugą w kolejności zaś próbki PLA- 0,112 kJ/m<sup>2</sup>. Kształtki z PP charakteryzowały się ponad trzykrotnie większą udarnością od pozostałych materiałów. Może być to spowodowane faktem, gdyż jako jedyne nie posiadały złomu całkowitego ani nawet częściowego. Łamane były przez młot w niewielkich częściach co mogło spowodować brak rzetelnych wyników.
4. Proces wygrzewania pozytywnie wpłynął na materiał PLA oraz PET-G, natomiast wartość udarności obniżona została dla ABS i Nylonu obrobionych cieplnie. Własność ta dla materiału PP pozostała na poziomie bez zmian.
5. Obróbka cieplna elementów wytworzonych w technologii FDM/FFF jest wciąż bardzo nowym zagadnieniem, które wymaga dokładniejszych badań, z naciskiem na większą liczbę zmiennych oraz parametrów w celu ich unormowania.
6. Wytwarzanie z wykorzystaniem technologii 3D oraz doświadczenie w zakresie doboru odpowiednich dla danego materiału parametrów druku gwarantuje możliwość wytworzenia elementów o wysokiej estetyce i dokładności wykończenia powierzchni,

a także o możliwości zmniejszenia kosztów i czasu wytwarzania w porównaniu do formowania wtryskowego czy odlewania do form elementów polimerowych.

## **7. Literatura**

1. P. Siemiński, G. Budzik: Techniki przyrostowe. Druk 3D, drukarki 3D, Oficyna Wydawnicza, 2015.
2. J. Horvath: Mastering 3D Printing, Apress, 2014.
3. S. N. Bernier, B. Luyt, T. Reinhard: 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions 1st Edition, Maker Media, 2015.
4. K. Czerwiński, M. Czerwiński: Drukowanie w 3D, Wydawnictwo Infoaudit, Warszawa 2013.
- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing, Wydawnictwo Springer.
- A. Kaziunas France: Świat druku 3D. Przewodnik, Wydawnictwo Helion, 2014.
5. M. Miecielica: Techniki szybkiego prototypowania- rapid prototyping, Przegląd Mechaniczny, 2010, nr. 10.
6. L. A. Dobrzański: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, WNT, Warszawa 2002,  
7. s. 947-1051
8. Ż. Brocka-Krzemińska, G.W Ehrenstein: Materiały polimerowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2016.