

Karolina WILIŃSKA¹, Marta KOZUŃ²

¹KN BioAddMed, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

²Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

WPLYW WYBRANYCH PARAMETRÓW DRUKU NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE PRÓBEK WYKONANYCH Z MATERIAŁU ELASTOMEROWEGO

Streszczenie: Prezentowana praca dotyczy właściwości mechanicznych próbek wytworzonych z materiału typu elastomer (TPU) z użyciem addytywnych technik wytwarzania (metoda MJF). Do badań właściwości mechanicznych wykonano próbki o różnych grubościach oraz różnej orientacji względem platformy roboczej drukarki 3D. Właściwości mechaniczne wyznaczono z użyciem testu jednoosiowego rozciągania, który prowadzony był z prędkością obciążenia 100 mm/min. Przeprowadzone badania wykazały wpływ grubości, orientacji próbek oraz zastosowanej metody obliczania modułu sprężystości na właściwości sprężyste badanych próbek.

Słowa kluczowe: właściwości mechaniczne, elastomery, materiały wysoko odkształcalne, moduł sprężystości wzdłużnej

1. WSTĘP

Ciągły rozwój technik addytywnych sprawił, że są one coraz częściej wykorzystywane w wytwarzaniu wysokowydajnych komponentów na dużą skalę, które docelowo mają zastąpić elementy produkowane z użyciem konwencjonalnych metod wytwarzania w różnych branżach, w tym również w branży medycznej [2][3]. Najbardziej popularną grupą materiałów wytwarzanych z użyciem technologii przyrostowych są polimery nisko odkształcalne i metale. Dotychczas realizowane prace badawcze wykazały istotny wpływ orientacji próbek na ich właściwości mechaniczne w przypadku materiałów takich jak polilaktyd (PLA) [4] oraz dla metali [5]. Materiały elastomerowe należące do grupy materiałów wysoko odkształcalnych są przedmiotem analiz znacznie rzadziej, co znacząco ogranicza możliwości ich zastosowania. Ponadto właściwości sprężyste tych materiałów są najczęściej charakteryzowane poprzez podanie jednej wartości opisywanej jako „moduł Young’a”. W przypadku materiałów o nieliniowych charakterystykach naprężenie – odkształcenie niemożliwe jest jednoznaczne określenie wartości tego parametru mechanicznego. Ponadto istnieje kilka sposobów wyznaczania modułu sprężystości wzdłużnej (moduł cięciwy, moduł sieczny, moduł styczny) [1], podczas gdy w literaturze podając wartość tego parametru dla materiałów elastomerowych,

często pomija się sposób jego wyznaczenia. Charakteryzowanie sprężystości materiałów elastomerowych o nieliniowych charakterystykach naprężenie – odkształcenie poprzez podanie jednej wartości opisanej jako „modułu Young’a” jest więc nieprecyzyjne i wymaga zastosowania innego sposobu niż klasyczny [1].

Celem prezentowanej pracy jest scharakteryzowanie wpływu: (i) grubości próbek wytworzonych z użyciem technologii przyrostowej MJF oraz (ii) orientacji próbek względem platformy roboczej na ich właściwości sprężyste. Analizie poddano statyczny moduł sprężystości wzdłużnej, który wyznaczono jako moduł cięciwy i moduł styczny.

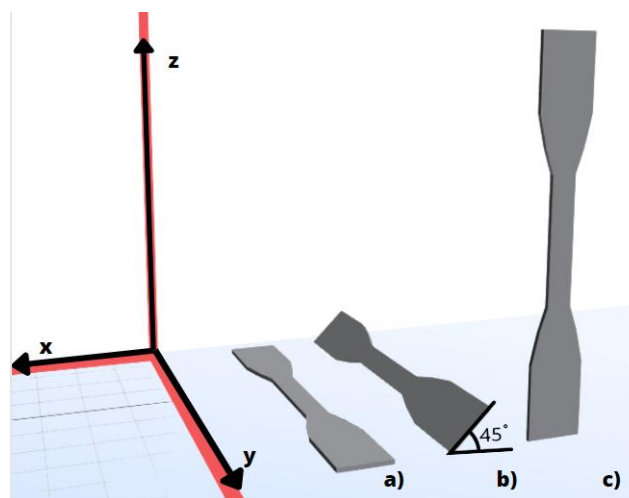
2. MATERIAŁ BADAWCZY

Materiał badawczy stanowił termoplastyczny poliuretan TPU. Do badań właściwości mechanicznych wytworzono próbki wiosełkowe o wymiarach zgodnych z normą ASTM D4482-11. Grubość próbek wynosiła 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1,0 mm. Próbki wytworzono z użyciem technologii przyrostowej MJF (Multi Jet Fusion), z użyciem drukarki HP Jet Fusion 3D 5210. Stosunek nowego proszku do używanego wynosił 20:80. Parametry druku zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1 Parametry wydruku próbek z użyciem drukarki HP Jet Fusion 3D 5210

<i>Parametr</i>	<i>Wartość</i>
<i>Wielkość komory</i>	<i>380x284x280 mm</i>
<i>Prędkość druku</i>	<i>5058 cm³/godz.</i>
<i>Wysokość warstwy</i>	<i>0,08 mm</i>
<i>Rozdzielczość</i>	<i>1200 DPI</i>
<i>Material</i>	<i>TPU</i>

Próbki zostały wytworzone w różnej orientacji względem platformy roboczej drukarki na której wykonywany jest wydruk, co zostało przedstawione na rysunku 1 (Rysunek 1). Po zakończeniu druku próbki zostały poddane obróbce mechanicznej tj. piaskowaniu w piaskarce DyeMansion z użyciem szklanych kulek o granulacji 300-400 mikronów.

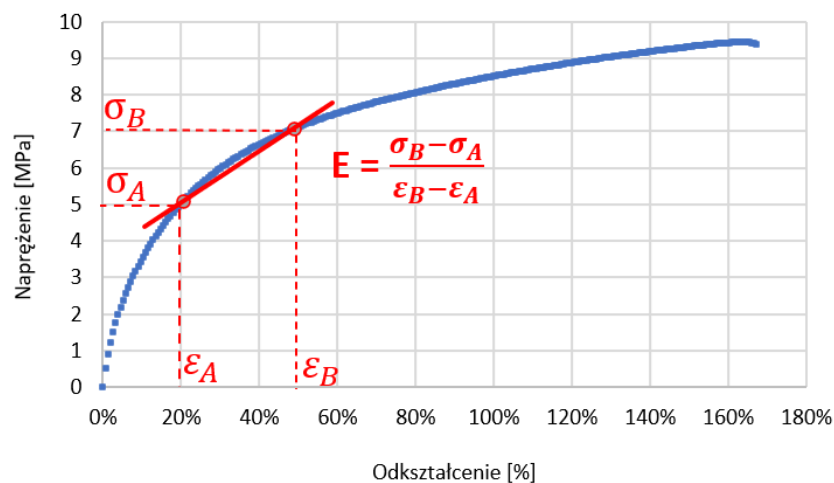


Rysunek 1. Orientacja próbek wytworzonych za pomocą technologii MJF. A) ułożenie poziome, b) ułożenie ukośne (45°), c) ułożenie pionowe.

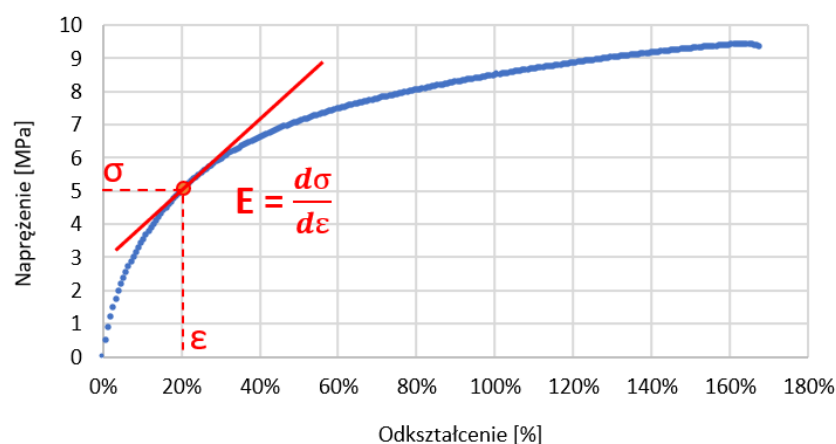
3. METODA BADAŃ

Badania właściwości mechanicznych obejmowały test jednoosiowego rozciągania w warunkach obciążeń statycznych, który przeprowadzono z prędkością rozciągania 100 mm/min. Badania prowadzono z użyciem maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion Model 41, w temperaturze otoczenia 23°C. Podczas badań rejestrowano wartości siły i przemieszczenia próbki, na podstawie czego wyznaczono krzywe naprężenie – odkształcenie. Na podstawie otrzymanych krzywych wyznaczono statyczny moduł sprężystości wzdłużnej tj. moduł cięciwy oraz moduł styczny. Moduł cięciwy wyznaczono jako nachylenie krzywej poprowadzonej między dwoma zadanymi punktami krzywej naprężenie – odkształcenie. Moduł cięciwy wyznaczono dla następujących zakresów odkształcenia względnego (ε_{wzgl}): od 10% do 20%, od 20% do 50%, od 50% do 70%, od 70% do 100%. Moduł styczny wyznaczono jako nachylenie krzywej naprężenie – odkształcenie dla wartości odkształcenia względnego wynoszących: 10%, 20%, 50%, 70%, 100%. Sposób wyznaczenia wyżej wymienionych parametrów przedstawiono na rysunku 2 (Rysunek 2).

A)



B)

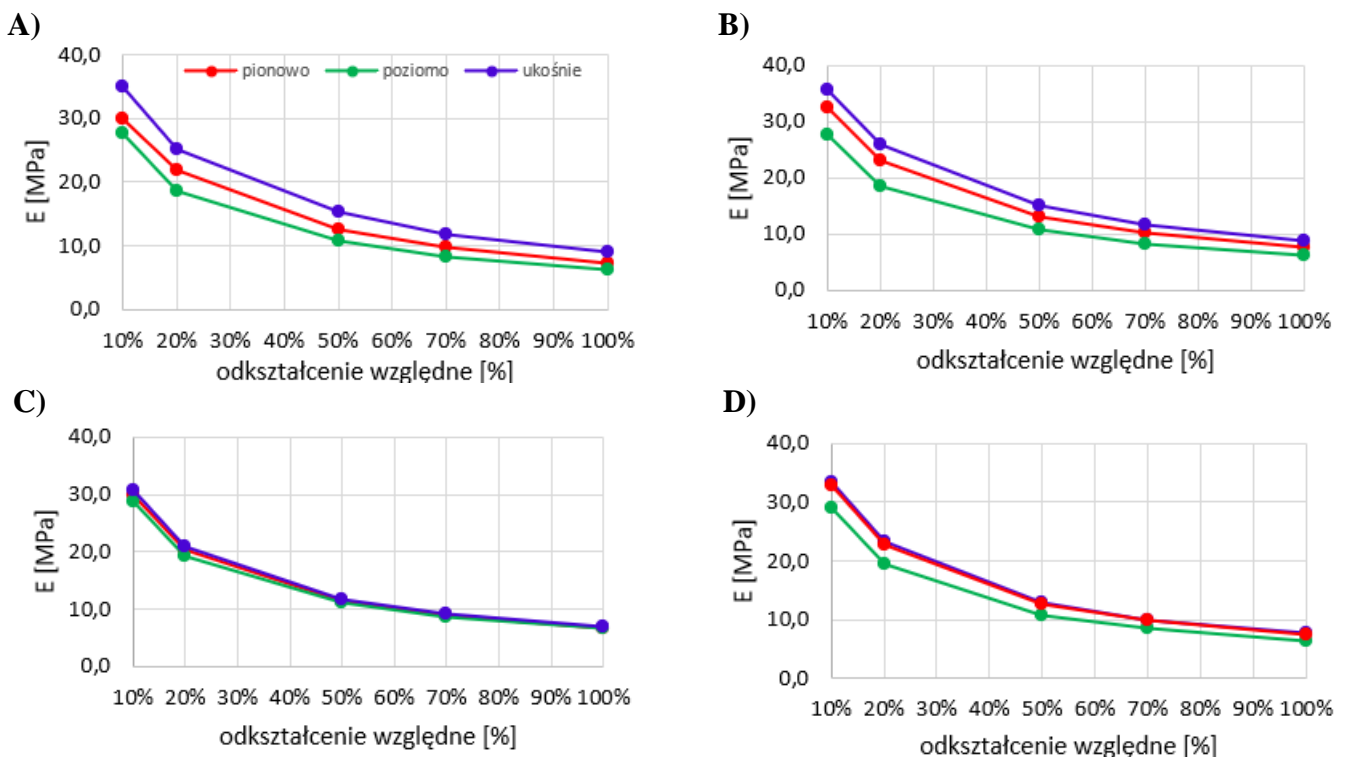


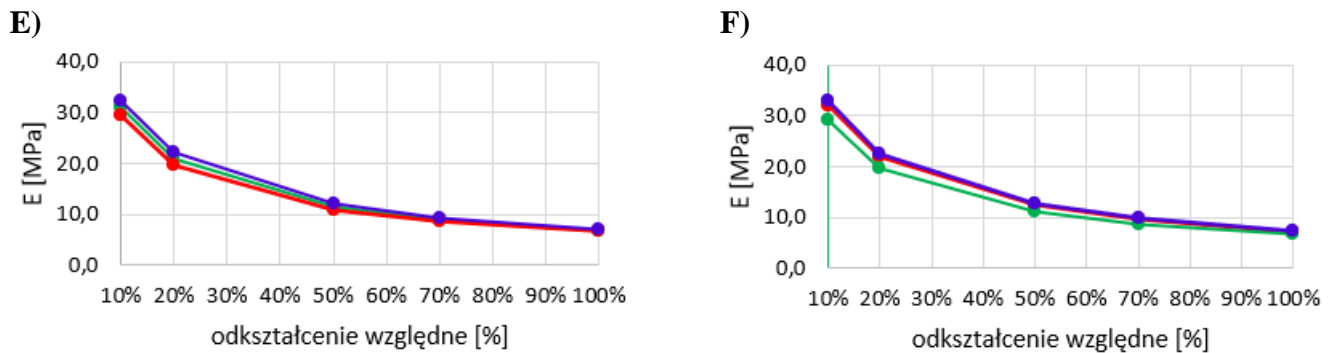
Rysunek 2. Sposób wyznaczenia statycznego modułu sprężystości wzdłużnej: A. moduł cięciwy oraz B. moduł styczny.

Uzyskane wartości parametrów mechanicznych potraktowano jako zmienne losowe, dla których przeprowadzono analizę statystyczną. Początkowo w celu identyfikacji wyników odstających przeprowadzono test Grubbs'a. Weryfikację normalności rozkładu analizowanych parametrów przeprowadzono z użyciem testu Shapiro-Wilka ($\alpha = 0,05$). Istotność statystyczną różnic pomiędzy grupami pomiarowymi testowano z użyciem jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA z testem Tukey'a oraz z użyciem testu Friedmana ($\alpha = 0,05$). Wartości wyznaczonych parametrów mechanicznych zaprezentowano jako medianę.

4. WYNIKI

Analiza uzyskanych wyników prowadzona była dwuetapowo. Początkowo analizowano wpływ grubości próbki na wartości modułu cięciwy i modułu stycznego oddzielnie dla próbek zorientowanych poziomo, pionowo i ukośnie. W przypadku modułu stycznego istotne statystycznie różnice pomiędzy próbkami o różnych grubościach uzyskano jedynie w przypadku próbek zorientowanych w kierunku ukośnym. Niezależnie od wartości odkształcenia względnego, dla którego wyznaczono moduł styczny, najwyższą wartość tego parametru uzyskano dla próbek o grubości 0,6 mm ($E = 35,7$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 10\%$, $E = 25,9$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 20\%$, $E = 15,1$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 50\%$, $E = 11,7$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 70\%$ oraz $E = 9,0$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 100\%$), a najniższą dla próbek o grubości 0,7 mm ($E = 30,7$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 10\%$, $E = 21,1$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 20\%$, $E = 11,8$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 50\%$, $E = 9,1$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 70\%$ oraz $E = 7,0$ MPa dla $\epsilon_{wzgl} = 100\%$) (Rysunek 3). W przypadku modułu cięciwy najwyższe wartości tego parametru mechanicznego uzyskano dla próbek o grubości 0,5 mm, a najniższe dla próbek o grubości 1mm (Tabela 2). W przypadku próbek zorientowanych w kierunku pionowym i poziomym różnice w wartościach modułu cięciwy i modułu stycznego uzyskane dla próbek o różnych grubościach nie są istotne statystycznie ($p > 0,05$).





Rysunek 3. Porównanie stycznego modułu sprężystości wzdłużnej uzyskanego dla próbek o grubościach: A. 0,5mm, B. 0,6mm, C. 0,7 mm, D. 0,8 mm, E. 0,9 mm oraz F. 1 mm dla wartości odkształcenia względnego wynoszących: 10%, 20%, 50%, 70% oraz 100%.

Tabela 2. Wartości (mediana) modułu cięciwy dla próbek o orientacji ukośnej

Grubość próbki [mm]	Zakres odkształcenia względnego			
	10 % - 20%	20% - 50%	50% - 70%	70% - 100%
0,5	15,4 MPa	7,6 MPa	3,8 MPa	2,5 MPa
0,6	15,1 MPa	7,1 MPa	3,6 MPa	2,4 MPa
0,7	11,9 MPa	5,4 MPa	2,8 MPa	1,9 MPa
0,8	12,4 MPa	5,8 MPa	3,0 MPa	2,0 MPa
0,9	12,2 MPa	5,7 MPa	2,9 MPa	1,9 MPa
1,0	11,5 MPa	5,3 MPa	2,6 MPa	1,8 MPa

Następnie analizie poddano wpływ orientacji próbek na ich właściwości mechaniczne. W przypadku modułu stycznego, niezależnie od wartości odkształcenia względnego, uzyskano istotne statystycznie różnice pomiędzy próbkami zorientowanymi poziomo i ukośnie jedynie dla grubości 0,5 mm, 0,6 mm i 1,0 mm. Niezależnie od grubości próbek nie uzyskano różnic istotnych statystycznie pomiędzy próbkami zorientowanymi pionowo i poziomo oraz pionowo i ukośnie ($p > 0.05$). W przypadku modułu cięciwy, dla zakresów odkształcenia względnego: 10%-20%, 20%-50% oraz 50%-70% uzyskano istotne statystycznie różnice dla próbek o grubościach 0,5 mm oraz 0,6 mm zorientowanych poziomo i ukośnie. Dodatkowo, dla zakresu odkształceń 70% - 100% uzyskano różnice istotne statystycznie pomiędzy próbkami zorientowanymi pionowo i poziomo dla grubości 0,9 mm i 1 mm oraz pomiędzy próbkami zorientowanymi pionowo i ukośnie o grubościach 0,8 mm i 0,9 mm.

5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Celem pracy było scharakteryzowanie wpływu: (i) grubości próbek wytworzonych z użyciem technologii przyrostowej MJF oraz (ii) orientacji próbek względem platformy roboczej na ich właściwości sprężyste (moduł cięciwy oraz moduł styczny). Przeprowadzone

w pracy badania wykazały, że poddane analizie parametry tj. orientacja oraz grubość próbek wpływają na ich właściwości sprężyste. Nie mniej jednak należy podkreślić, że:

- grubość próbek wpływa na ich właściwości sprężyste w przypadku próbek zorientowanych ukośnie. Różnice w wartościach modułu sprężystości pomiędzy próbkami o różnych grubościach uzyskane dla próbek zorientowanych pionowo i poziomo nie są istotne statystycznie ($p > 0,05$).

- uzyskane wartości modułu sprężystości różnią się w zależności od metody ich wyznaczania (moduł styczny, moduł cięciwy). W przypadku modułu stycznego najwyższą wartością tego parametru charakteryzują się próbki o grubości 0,6 mm, a najniższą próbki o grubości 0,5 mm. Dla modułu cięciwy najwyższą wartość uzyskano w przypadku próbek o grubości 0,6 mm, a najniższą dla próbek o grubości 1 mm.

- kierunek zorientowania próbek wpływa na ich właściwości mechaniczne dla próbek o grubościach 0,5 mm, 0,6 mm oraz 1 mm. Nie można jednak wskazać orientacji próbek, która charakteryzuje się najniższymi lub najwyższymi wartościami analizowanych parametrów. Uzyskane wartości są zależne od przyjętej metody (moduł styczny, moduł sieczny) oraz od odkształcenia względnego, co dowodzi, że właściwości sprężyste elastomerów są w dużym stopniu zależne od ich wydłużenia. Podobne wnioski uzyskał Bednarz [1] dla materiałów elastomerowych uzyskanych z użyciem tradycyjnych technologii wytwarzania.

LITERATURA

- [1] Bednarz J., The new methodology for assessing of the applicability of elastomeric materials in the vibration isolation systems of railway lines. *Archives of Acoustics*, 2016, p. 573-578.
- [2] Berry, E., Brown, J. M., Connell, M., Craven, C. M., Efford, N. D., Radjenovic, A., & Smith, M. A. Preliminary experience with medical applications of rapid prototyping by selective laser sintering. *Medical engineering & physics*, vol.19, no.1, 1997, p.90-96.
- [3] Liu, Z., Zhang, P., Yan, M., Xie, Y., & Huang, G. Additive manufacturing of specific ankle-foot orthoses for persons after stroke: A preliminary study based on gait analysis data. *Math. Biosci. Eng.*, vol.16, no.6, 2019 p. 8134-8143.
- [4] Othman, Z., Misran, M., Khamisan, Z., Study on Mechanical Properties of Pla Printed using 3D Printer. *J. adv. res. appl. mech.*, vol.59, no.1, 2019 p. 10-18.
- [5] Xu T., Shen W., Lin X., Xie Y.M., Mechanical Properties of Additively Manufactured Thermoplastic Polyurethane (TPU) Material Affected by Various Processing Parameters, *Polymers*, vol. 12, no. 12, 2020, p.3010

EFFECT OF SELECTED PRINTING PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SAMPLES MADE OF ELASTOMERIC MATERIAL

Abstract: The presented paper concerns the mechanical properties of samples manufactured from elastomer type material (TPU) using additive manufacturing techniques (MJF method). For the study of mechanical properties, specimens of different thicknesses and different orientation with respect to the working platform of the 3D printer were produced. The mechanical properties were determined using a uniaxial tensile test, which was conducted at a loading rate of 100 mm/min. The

tests conducted showed the influence of the thickness and orientation of the samples on their elastic properties. In addition, the effect of the method of determining the longitudinal modulus of elasticity, on the elastic properties of the produced specimens, was demonstrated.