

### Analiza wyników symulacji numerycznych badania statycznej próby rozciągania próbek otrzymanych metodą FDM przeprowadzonych za pomocą oprogramowania ABAQUS

Maksymilian Stępczak<sup>1</sup>, Maciej Roszak<sup>1</sup>, Mikołaj Kazmierczak<sup>1</sup>, Konrad Grzyb<sup>1</sup>, Mirosław Bocian<sup>1</sup>, Dariusz Pyka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Politechnika Wroclawska

email: maksymilian.stepczak@pwr.edu.pl, maciej.roszak@pwr.edu.pl, mikolaj.kazmierczak@pwr.edu.pl, miroslaw.bocian@pwr.edu.pl, dariusz.pyka@pwr.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Niniejsze badanie dotyczyło opisanie charakterystyki wytrzymałościowej ośmiu materiałów dostępnych na rynku materiałów stosowanych w technologii FDM (Fused Deposition Modeling). Wykorzystując drukarki Original PRUSA MK4, wytworzono próbki testowe składające się z dziesięciu próbek każdego z dwóch wybranych polimerów. Próbki te poddano ocenie mechanicznej za pomocą statycznych testów rozciągania i trójpunktowego zginania przy użyciu systemu MTS Bionix. Oceniono podstawowe właściwości mechaniczne, identyfikując stałe materiałowe w ramach modelu wytrzymałościowego Johnsona-Cooka. Ponadto przeprowadzono symulacje numeryczne w celu odtworzenia testów eksperymentalnych, mających na celu udoskonalenie modeli reologicznych związanych z tymi materiałami. Kryterium pęknięcia zostało ustalone przy użyciu hybrydowej metody FEM/SPH, zwiększając możliwość zastosowania istniejących bibliotek materiałów w symulacjach numerycznych i oceniając wrażliwość opracowanych modeli materiałowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** Wytrzymałość na rozciąganie, Technologie przyrostowe, FDM, Metoda Elementów Skończonych

#### 1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych dwóch różnych rodzajów filamentów wykorzystywanych w technologii druku 3D FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Przy użyciu drukarki Original PRUSA MK4 przygotowano po dziesięć próbek badanego filamentu i poddano je testom mechanicznym, w tym testom rozciągania, przeprowadzonym przy użyciu systemu MTS Bionix zgodnie z normą PN-EN ISO 527:1998 dotyczącą oznaczania właściwości mechanicznych tworzyw sztucznych przy statycznym rozciąganiu, określono warunki i metodykę przeprowadzania prób rozciągania materiałów.

Dodatkowo badania obejmowały również symulacje numeryczne przeprowadzone w oprogramowaniu Abaqus. Kryterium pęknięcia zostało opracowane przy użyciu połączonej metody MES/SPH, co pomogło w rozszerzeniu istniejących bibliotek materiałów do symulacji numerycznych i ocenie dokładności opracowanych modeli. Te szeroko zakrojone badania poszerzyły zakres modeli materiałowych dostępnych do celów obliczeniowych i zapewniły cenny wgląd w procesy rozwoju pęknięć.

#### 2. Materiał badawczy

Przedmiotem badań były filamenty stosowane do technologii przyrostowej typu FDM. Do badanych filamentów należały:

- PA+15CF - To kompozyt łączący zalety poliamidu 12 (nylonu) oraz włókien węglowych, co skutkuje powstaniem materiału o wyjątkowej wytrzymałości. Materiał ten charakteryzuje się łatwością druku oraz

niskim skurczem przetwórczym dzięki zawartości włókien węglowych.

- TPU - Tworzywo sztuczne, które łączy właściwości gumy i plastiku, co przyczyniło się do jego szerokiego zastosowania w różnych gałęziach przemysłu. TPU charakteryzuje się wysoką elastycznością, zachowując jednocześnie zdolność do przetwarzania metodami termoplastycznymi.

Charakterystyki materiałowe filamentów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry filamentów wykorzystanych w badaniach

Materiał	$E$ [GPa]	$\nu$ [-]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A$ [MPa]	$B$ [MPa]	$n$ [-]
PA + 15CF	1667	0,4	1070	30,04	90,17	0,3928
ROSA 3D						
TPU	26	0,4	1200	2,03	1,63	1,7230

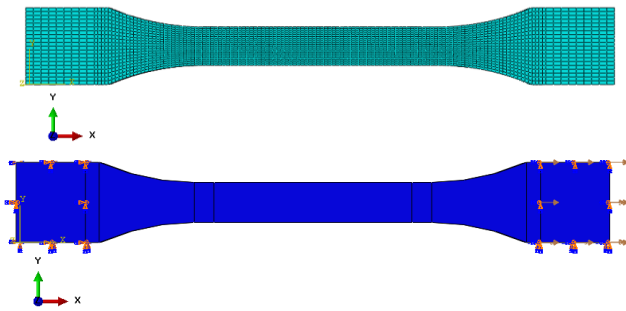
Gdzie:  $E$  – moduł Younga,  $\nu$  – współczynnik Poissona,  $\rho$  – gęstość,  $A$  – granica plastyczności materiału,  $B$  – stała umocnienia,  $n$  – wykładnik umocnienia.

#### 3. Analiza numeryczna

Przeprowadzone symulacje miały na celu odwzorowanie realnej próby rozciągania opisanej w normie EN ISO 527-3:2019-01 [2].

Modele geometryczne przygotowane zostały w środowisku CAD, a następnie przygotowano model numeryczny próbki składający się z 11 000 elementów pierwszego rzędu typu Hexa (Rys. 1). Następnie zadane zostały warunki brzegowe w postaci podparcia dwóch części

chwytowych próbki oraz zadania wymuszenia w postaci prędkości na jedną z równoległych ścian próbki.



Rys. 1. Przedstawienie siatki elementów skończonych (góra) oraz warunków brzegowych nałożonych na model (dół)

Do odwzorowania zniszczenia materiału wykorzystano model SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Metoda ta została wybrana ze względu na ograniczenia tradycyjnych elementów Lagrange'a, które przy dużych wartościach odkształceń mogą powodować niestabilności numeryczne, które w ostateczności prowadzą do przerwania analizy. SPH umożliwia przekształcenie elementów skończonych w cząstki, zachowując masę i energię, pierwotnych elementów, co pozwala dokładniej modelować procesy zniszczenia bez konieczności kasowania elementów. Jako parametr determinujący zniszczenie próbki przyjęto wartość odkształcenia granicznego, która została wyznaczona w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych i zaadaptowana w środowisku numerycznym. Wartość ta odpowiada średniemu odkształceniu przy pękaniu próbki podczas testów i została przedstawiona w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wartości odkształcenia granicznego przyjętego dla filamentów

Materiał	$\epsilon_{gr}$ [-]
PA + 15CF ROSA 3D	2,860
TPU	0,082

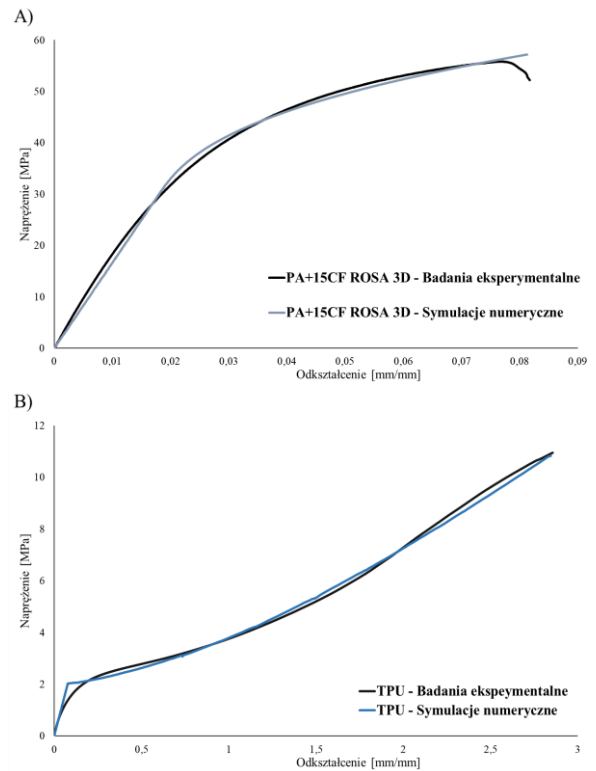
#### 4. Wyniki i dyskusja

Wyniki przeprowadzonych badań zarówno numerycznych, jak i eksperymentalnych w postaci wykresów (rys. 2) oraz odczytanych punktów charakterystycznych zestawiono poniżej (tab. 3).

Tabela 4. Otrzymane punkty charakterystyczne z wyznaczonych krzywych naprężenia

Materiał	$R_H$		$R_e$		$R_m$	
	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [-]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [-]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [-]
PA+15CF	14,71	0,01	20,03	0,01	56,57	0,07
TPU	0,69	0,04	1,97	0,28	10,96	2,96

Gdzie:  $R_H$  – granica proporcjonalności,  $R_e$  – granica plastyczności,  $R_m$  – wytrzymałość na rozciąganie,  $\sigma$  – naprężenie,  $\epsilon$  – odkształcenie.



Rys. 2 Wyznaczone charakterystyki badanych materiałów A) PA+15CF ROSA 3D, B) TPU

#### 5. Podsumowanie

W badaniach uzyskano dużą zgodność wyników MES z charakterystykami eksperymentalnymi. Dla filamentu PA+15CF ROSA 3D model materiałowy dokładnie koresponduje w całym zakresie charakterystyki eksperymentalnej. W filamencie TPU z bardzo dużą dokładnością odzwierciedlony został niemonotoniczny charakter w zakresie plastycznym. Największe rozbieżności wystąpiły natomiast przy przejściu ze stanu sprężystego w plastyczny, co było spowodowane bifurkacją wynikającą z estymacji w równaniu konstytutywnym. Uzyskane parametry materiałowe dla przyjętego modelu konstytutywnego są zadowalające i mogą być z powodzeniem stosowane w dalszych symulacjach numerycznych elementów wykonanych w technologii przyrostowej.

*Obliczenia przeprowadzono przy wsparciu Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowym, grant nr 452, (<http://www.wcss.pl>).*

#### Literatura

- [1] Udroui R., Braga C.I., *Polyjet technology applications for rapid tooling*, MATEC Web Conf. Vol. 112, e03011, 2017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011>.
- [2] ISO527-3:2019-01: *Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 3: Test Conditions for Films and Plates*. ISO: Geneva, Switzerland, 2019.
- [3] Paul R., and Anand S., *Optimal part orientation in Rapid Manufacturing process for achieving geometric tolerances*, J Manuf Syst, Vol. 30(4), pp. 214–222, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.010>
- [4] Bikas H, Stavropoulos P., Chryssolouris G., *Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review*, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 83, pp. 389–405, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>.