

**I Krajowa Konferencja Naukowa**  
**Szybkie prototypowanie**  
**Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary**  
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA  
RAPIDROM

## Wpływ kąta ułożenia warstw włókien elementu wykonanego metodą FDM na wytrzymałość na zginanie

The Influence of fibers layers angle of an element prepared by FDM technology on bending strength

MAŁGORZATA JOHN  
 MATEUSZ TYCZKA  
 GRZEGORZ KOKOT  
 WOJCIECH SKARKA\*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.566

Artykuł przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych, których celem było ustalenie wpływu kąta ułożenia warstw na wytrzymałość elementów. Przeprowadzono próbę trójpunktowego zginania na seriach próbek różniących się kątem ułożenia warstw składowych elementu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** próba trójpunktowego zginania, FDM, ABS, szybkie prototypowanie.

*The paper describes the results of a strength tests. The main goal of the reserches was to determine the impact of the fiber layers angle on the tested element strenght. The three-point bending test was performed for the sample series with the different fiber layer angle.*

**KEYWORDS:** three-point bending test, FDM, ABS, rapid prototyping.

### Wstęp

Szybkie prototypowanie stało się ostatnimi czasy bardzo popularne. Ten trend może być spowodowany zaletami tego typu rozwiązań.

#### Zalety Rapid Prototyping

-możliwość szybszego tworzenia skomplikowanych elementów niż w przypadku metod konwencjonalnych

-możliwość produkowania małych partii w celu

\*Mgr inż. Małgorzata John (malgorzata.john@polsl.pl), mgr inż. Mateusz Tyczka (mateusz.tyczka@polsl.pl), dr hab. inż. Grzegorz Kokot (grzegorz.kokot@polsl.pl), dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof.Pol.Śl. (wojciech.skarka@polsl.pl)

przeprowadzania badań, przy ponoszeniu relatywnie niewielkich kosztów

-możliwość szybkiego wprowadzenia zmian w modelu bez konieczności zmian formy produkcyjnej lub metod produkowania

-możliwość realizowania prawie dowolnego kształtu zewnętrznego i zależnie od techniki również wewnętrznego [1].

Szybkie prototypowanie dzięki tym zaletą nadaje się do wykonywania elementów konstrukcyjnych. Obecne techniki pozwalają na wytworzenie wytrzymałego elementu o specyficznym kształcie w relatywnie krótkim czasie. Metody tradycyjne przy produkcji małoseryjnej lub jednostkowej wykazują się wysokim kosztem stosowania [2]. W literaturze można znaleźć co raz to nowe trendy zastosowania technik szybkiego prototypowania [3,4,5].

Techniki stosowane w rapidprototyping opierają się na różnych metodach tworzenia element. Stereolitografia jest to laserowe utwardzanie żywicy fotopolimerowej. Laser obrysowuje na platformie zanurzonej w wannie z fotopolimerem kolejne przekroje poziome produkowanej części. Selective laser sintering jest podobną techniką do SLA, jednak w tym przypadku spiekane są proszki polimerowe. Zaletą tych technik jest brak potrzeby stosowania podpór konstrukcyjnych i późniejszego usuwania ich. 3D Printing jest techniką w której wykorzystuje się sproszkowane materiały np. gips, wosk. Materiał łączony jest za pomocą substancji klejącej.

Ciekłą żywicę akrylową stosuje się w technice PolyJet. Materiał nakłada się dyszami i następnie utwardzana światłem.

tem UV. Technologia MEM – Melted and Extruded Modeling – również wykorzystuje dysze do rozprowadzania materiału. W tym przypadku jednak materiał tłoczony jest w wysokiej temperaturze i następnie zastyga [6].

## Badanie

Znaleziono w literaturze podobne badania [7]. Sprawdzany jest wpływ wzajemnego ułożenia kolejnych warstw na własności otrzymywanych próbek. W artykule [7] przeprowadzono statyczną próbę rozciągania, próbę trójpunktowego zginania oraz zbudowano model numeryczny. Badania te zostały przeprowadzone na relatywnie małej ilości próbek. Badanie przeprowadzone np. na trzech próbkach wydaje nam się być niereprezentatywne. Taka ilość badanego materiału wydaje nam odpowiednia w przypadku próbek nieseryjnych np. wycinków tkanek ludzkich.

### ■ Przygotowanie

Próbki zostały wytworzone na drukarce 3D Makerbot Replicator 2X, która wykorzystuje metodę FDM. Metoda ta polega na tłoczeniu materiału do dyszy, gdzie materiał zostaje podgrzany i uplastyczniony, a następnie układany kolejnych warstw materiału w wytwarzanym elemencie. Istotnym czynnikiem wpływającym na efekt końcowy jest czas stygnięcia materiału oraz temperatura wewnątrz urządzenia.



Rys. 1. Próбка do próby trójpunktowego zginania

Próbki zostały wydrukowane zgodnie z polską normą odpowiadającą próbie trójpunktowego zginania dla materiałów polimerowych – PN-EN ISO 178. Wykonano je z materiału ABS. Stopień wypełnienia przyjęto na poziomie 100%. Zostało to ustalone w oprogramowaniu drukarki, gdzie użytkownik nie ma dużego wpływu na opcje wytwarzania. Trzeba założyć, że próbki nie są prostopadłościanami całkowicie wypełnionymi materiałem. Mogą się tam znajdować śladowe ilości powietrza, co wynika z samej techniki wytwarzania.

### ■ Badanie wytrzymałościowe

W celu poznania własności i zachowania się próbek wytwarzanych metodą szybkiego prototypowania FDM oraz wpływu ułożenia kolejnych warstw materiału na otrzymany element przeprowadzono próbę wytrzymałościową: próbę trójpunktowego zginania. Badanie wykonano dla warstw ustawionych pod kątem 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°.

Dla sprawdzenia powtarzalności wyników każda seria składała się z dziesięciu próbek. W przypadku, gdy w przeprowadzonej serii, nie powiodło się któreś badanie, czy to z winy operatora, czy maszyny, były wykonywane kolejne badania w celu posiadania dziesięciu dobrze wykonanych prób.

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 10 we współpracy Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn z Instytutem Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej.



Rys. 2. Widok stanowiska w trakcie próby trójpunktowego zginania wykonywanej na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 10

## Wyniki

Badania przeprowadzono dla pięciu serii, gdzie każda z nich składała się z próbek wykonanych pod innym kątem. Przy podejściu ogólnym do otrzymanych wyników, można powiedzieć, że próbki zachowują się podobnie. W momencie, gdy następuje przerwanie powłoki zewnętrznej, próbka przełamuje się w całej długości.

Gdy zajęto się analizą każdej z serii, zaobserwowano pewne różnice, które w przypadku większych elementów mogą okazać się istotne. W trakcie opracowywania wyników trzeba pamiętać, że badania zostały przeprowadzone dla elementów

Tab. 1. Statystyka dla serii próbek, których warstwy znajdują się pod kątem 90°

	PeakLoad (N)	PeakStress (MPa)	Strain At Break (mm/mm)	Moduł (MPa)
Średnia	100.840	20.7	0.088	352.797
Odchylenie standardowe	9.322	1.7	0.010	27.224

W tabeli 1 przedstawiono statystykę otrzymaną dla serii próbek, których warstwy były ułożone pod kątem 90°. Średnia siła zerwania próbki wyniosła 100.840N i okazała się być najniższą z otrzymanych. Można było zauważyć, że przełamanie wystąpiło w miejscu, gdzie stykają się kolejne warstwy. Otrzymany wynik jest zgodny z intuicyjnymi oczekiwaniami.

Tab. 2. Statystyka dla serii próbek, których warstwy znajdują się pod kątem 45°

	PeakLoad (N)	PeakStress (MPa)	Strain At Break (mm/mm)	Moduł (MPa)
Średnia	123.393	26.4	0.090	467.990
Odchylenie standardowe	4.160	1.3	0.018	21.415

Kolejna seria składała się z próbek wytworzonych z warstwami pod kątem 45°. Możemy zaobserwować znaczący wzrost maksymalnej siły i wyniosła ona 123.393N. Podczas obserwacji próbek po badaniu zauważono, że w większości

złamanie jest proste, w kilku przypadkach w ostatnim etapie zerwanie przyjmuje kształt jednej z warstw materiału.

Tab. 3. Statystyka dla serii próbek, których warstwy znajdują się pod kątem 0°

	PeakLoad (N)	PeakStress (MPa)	Strain At Break (mm/mm)	Moduł (MPa)
Średnia	120.019	27.4	0.105	446.959
Odchylenie standardowe	1.949	0.5	0.005	6.430

Trzecia z przebadanych serii składała się z próbek, z warstwami ułożonymi pod kątem 0° do poziomu. Maksymalna wartość siły wyniosła 120.019N, która okazuje się być niższa niż w przypadku serii omawianej powyżej. Mogło się wydawać, że właśnie dla tej serii zostanie otrzymana największa wartość. Okazało się, że było to błędne założenie. W miejscu zerwania próbek można zaobserwować spore odbarwienia materiału – wizualny efekt występujących naprężeń. Przełamanie ma kształt prosty.

Tab. 4. Statystyka dla serii próbek, których warstwy znajdują się pod kątem 22.5°

	PeakLoad (N)	PeakStress (MPa)	Strain At Break (mm/mm)	Moduł (MPa)
Średnia	103.566	22.4	0.093	387.438
Odchylenie standardowe	13.174	1.8	0.007	46.173

W następnej kolejności zostały przebadane próbki z warstwami ułożonymi pod kątem 22.5°. Przyjęto taką wartość do przebadania, gdyż wydało się, że właśnie dla tej wartości, jak również wartości 67.5, możliwe jest otrzymanie znacząco różnych wyników. W tabeli 4 przedstawiono statystykę wyników otrzymanych dla serii wytworzonej pod kątem 22.5°. Siła zerwania wyniosła 103.566 i jest ona niewiele większa od najmniejszej otrzymanej. Przeglądając się próbką po wykonanym badaniu, można zauważyć, że ani kształt przerwania powierzchni górnej, ani kształt przełamania nie są jednorodne. W przypadku badania tych próbek, najtrudniej było otrzymać powtarzalność wyników.

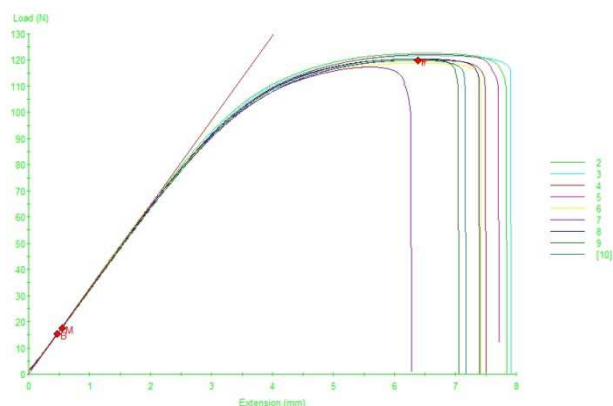
Tab. 5. Statystyka dla serii próbek, których warstwy znajdują się pod kątem 67.5°

	PeakLoad (N)	PeakStress (MPa)	Strain At Break (mm/mm)	Moduł (MPa)
Średnia	127.954	25.8	0.078	483.744
Odchylenie standardowe	3.118	0.6	0.004	4.637

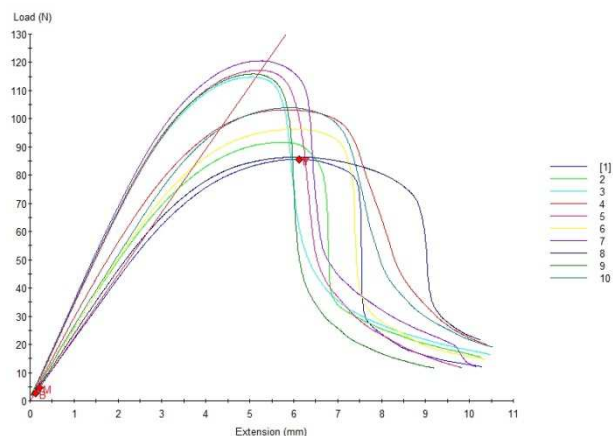
Największą wartość siły otrzymano w serii składającej się z próbek, gdzie warstwy znajdują się pod kątem 67.5°. Między dwoma najwyższymi wartościami nie zaobserwowano dużej zmiany wartości, jednak w odniesieniu do najgorszego wyniku, jest to już zauważalna różnica. Próbką zrywa się wzdłuż jednej z warstw znajdujących się w najbliższej odległości od podpory. Potwierdza się tutaj, że najłagodniejszym miejscem próbki w przypadku tej techniki są miejsca łączenia się kolejnych warstw.

Siła niszcząca różni się maksymalnie o prawie 27% w odniesieniu do wartości najniższej. Jest to znacząca różnica. Najlepsze wyniki - największe wartości siły - otrzymano dla próbek wytworzonych pod kątem 67.5°. Najniższą wartość siły niszczącej otrzymano dla próbek wytworzonych pod kątem 90°.

W przypadku próbek wytwarzanych pod kątem 90° i 0° po zerwaniu następuje gwałtowny spadek wartości, w przypadku pozostałych próbek zaobserwowano łagodniejszy spadek.



Rys. 3. Wykres zbiorczy siły dla serii próbek z warstwami pod kątem 90°



Rys. 4. Wykres zbiorczy siły dla serii próbek z warstwami pod kątem 22.5°

Kąt wytwarzania ma znaczący wpływ na jakość powierzchni wytworzonego elementu.

## Podsumowanie

Zaobserwowano różnice w wartościach sił niszczących. Są one w widocznie zależne od kąta ułożenia warstw. Wartości te różniły się nawet o 27%. W przypadku, gdy wytrzymałość na zginanie jest ważna dla wytwarzanego elementu, należałoby ustawić element tak, żeby kolejne warstwy materiału znajdowały się pod kątem 67.5° do poziomu.

W przypadku, gdy liczy się przede wszystkim jakość powierzchni, a co za tym idzie, wygląd końcowy, należy ustawić tak element, żeby największe powierzchnie płaskie, bez krzywizn, znajdowały się pod kątem 0° do poziomu. Dzięki takiemu ustawieniu istnieje największe prawdopodobieństwo uzyskania dobrego efektu wizualnego. Ustawienie warstw pod każdym innym kątem może spowodować, że będziemy musieli poważnie oczyścić element z nierówności powierzchni i chropowatości.

Zaobserwowano, że istotny wpływ na otrzymywane wyniki może mieć sam materiał. Nawet w przypadku, gdy stosowania materiału tylko typu ABS, można było zauważyć zmiany otrzymywanych wartości.

Dużym problemem w przypadku stosowanej techniki i posiadanego sprzętu wydaje się brak idealnej powtarzalności w trakcie wytwarzania elementów. Użytkownik nie posiada pełnego wpływu na jakość otrzymywanych próbek. Jest to dużym niedogodnieniem w przypadku, gdy wytworzony element chcemy zastosować w działającej konstrukcji.

#### LITERATURA

1. Oczóś Kazimierz: „Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów”. *Mechanik* (2004)4, s. 241-257.
2. Tyczka M., John M. Skarka W. “The problem of a preparing vertical elements by FDM technology” *XIV International Technical Systems Degradation Conference. Liptovsky Mikulas, 8-11 April 2015* (2015), s. 150-153.
3. Pham Due, Gault Rosemary “A comparison of rapid prototyping technologies” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (1998)38, s. 1257–1287.
4. Xue Yan, Gu Pei “A review of rapid prototyping technologies and systems”. *Computer-Aided Design*. (1996)4, s. 307-316.
5. Yongnian Yan, Shengjie Li, Renji Zhang, Feng Lin, Rendong Wu, Qingping Lu, ZhuoXiong, Xiaohong Wang. “Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends” *TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY* (2009)14, s.1-12.
6. <http://www.rapidpro.pl>
7. Bellini Anna Güçeri Selçuk “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling”. *Rapid Prototyping Journal*, (2003)9, s. 252 – 264.