

Zenon TARTAKOWSKI¹, Jan BURSA²,
Katarzyna MYDŁOWSKA¹

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Instytut Inżynierii Materiałowej (1)
Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki (2)

Właściwości elektryczne materiałów z PLA wytworzonych w technologii FDM

Streszczenie. Zastosowanie nowych technologii wytwarzania, takich jak druk 3D, stwarza nowe możliwości szybkiego wytwarzania wyrobów mogących mieć zastosowanie w przemyśle elektrotechnicznym. W pracy przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości elektrycznych materiałów wytworzonych z PLA poprzez druk 3D w technologii FDM. Dokonano analizy wpływu parametrów druku, tj. stopnia wypełnienia materiału, grubości warstw wierzchnich oraz starzenia w podwyższonej wilgotności i temperaturze na badane właściwości elektryczne. W wyniku analizy otrzymanych wyników badań uznano, że wytworzone tą technologią wyroby mogą znaleźć zastosowanie na wyroby elektrotechniczne pracujące w zakresie nn.

Słowa kluczowe: właściwości elektryczne, szybkie prototypowanie, FDM

Abstract. Application of new manufacturing technologies like 3D printing offers new possibilities for fast production of products that could be used in the electrical industry. The paper presents the results of selected electrical properties of materials made of PLA by 3D printing technology FDM. The analysis of the impact of printing parameters, ie. the degree fill of the material, the thickness of the surface layer and aging at an elevated temperature and humidity on the test electrical properties. As a result of analysis of the obtained results it was concluded that the products produced by this technology can be used for electrical products operating in the low voltage.

Keywords: electrical properties, rapid prototyping, FDM

Wstęp teoretyczny

Duże zapotrzebowanie na nowe wyroby, jak również na wyroby prototypowe stwarza potrzebę doskonalenia procesów przetwórczych. Takim rozwiązaniem są technologie zaliczane do szybkiego prototypowania (ang. rapid prototyping) oraz szybkiego wytwarzania (ang. rapid manufacturing). Umożliwiają one wykonywanie wyrobów bezpośrednio z trójwymiarowego modelu CAD bez dodatkowego oprzyrządowania oraz obróbki wykańczającej. Technologie te dają możliwość wyprodukowania funkcjonalnych prototypów w krótkim czasie od powstania modelu trójwymiarowego, bez występowania dodatkowych kosztów. Pozwala to w znaczny sposób usprawnić proces projektowania wyrobu. Znaczny rozwój urządzeń i materiałów do szybkiego prototypowania spowodował, że obecnie technologie te wykorzystywane są również do wykonywania wyrobów końcowych [1].

Jedną z technik szybkiego prototypowania jest technologia FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Jest to, tak jak wszystkie techniki druku 3D, technologia addytywna (ang. Additive Manufacturing Technologies) polegająca na warstwowym nakładaniu uplastycznionego tworzywa polimerowego zgodnie z ustalonym wzorem na platformę roboczą [2].

Aktualnie istnieje duża grupa materiałów polimerowych nadających się do użycia w charakterze budulca do druku: ABS (poli(akrylonitryl-co-butadien-co-styren)), PLA

(poli(kwas mlekowy)), PA (poliamid), PC (poliwęglan), PPSU (polifenylosulfon), PEI (polieteroimid), TPU (termoplastyczne poliuretany), PS (polistyren), PET (poli(tereftalan etylenu)), PVA (poli(alkohol winylowy)) oraz kompozyty wyżej wymienionych tworzyw z takimi wypełniaczami jak np. mączka drzewna lub kreda. Materiał wejściowy ma postać drutu (ang. filament) o określonej średnicy (1,75 mm lub 3 mm). Podawany on jest za pomocą systemu rolkowego do głowicy, w której następuje jego podgrzanie i uplastycznienie, a następnie wytłoczenie przez dyszę o okrągłym przekroju poprzecznym na platformę roboczą [3, 4].

Właściwości uzyskanych wyrobów zależą nie tylko od właściwości materiału budulcowego, ale również od przyjętych parametrów drukowania. W technologii FDM kluczowymi parametrami technologicznymi są: prędkość druku, grubość warstw zewnętrznych, stopień wypełnienia, rodzaj wypełnienia, orientacja wyrobu na platformie roboczej, temperatura druku, a także temperatura platformy roboczej [5].

Dostępnych jest wiele pozycji literaturowych, w których przedstawione zostały właściwości mechaniczne wyrobów wykonywanych technologią FDM [2, 6, 7, 8]. Badania te pokazały, że części drukowane wykazują wytrzymałość mechaniczną oraz udarność na poziomie porównywalnym do elementów wytwarzanych tradycyjnymi technologiami przetwórstwa tworzyw sztucznych. W literaturze brak jest jednak badań dotyczących właściwości elektrycznych drukowanych elementów. W celu określenia wpływu parametrów procesu drukowania na właściwości elektryczne przeprowadzono badania wpływu stopnia wypełnienia oraz grubości warstw powierzchniowych wykonanych z pełnym wypełnieniem na odporność wyrobów na działanie łuku elektrycznego małej mocy, rezystywność skrośną oraz wytrzymałość elektryczną. Wykonane próbki poddano procesowi starzenia w komorze WGS (środowisko wilgotne, gorące, stałe). Badania takie umożliwiają dodatkową ocenę materiału i przydatne są w prognozowaniu przyszłego zastosowania wyrobu [10]. Spośród stosowanych materiałów do badań wytypowano PLA (Poli(kwas mlekowy)) ze względu na jego dobre właściwości mechaniczne, przetwórcze i elektryczne.

Materiał badawczy

Do wykonania próbek wykorzystano drut firmy Plast-Spaw z PLA o średnicy 1,75 mm i gęstości 1,25 g/cm³. Przetworzono go z wykorzystaniem drukarki FDM Rapcraft firmy Omni3D. Wykonano dwa zestawy próbek w postaci okrągłych płytek o średnicy 100 mm i grubości 3 mm. Pierwszy zestaw, wykorzystany do określenia wpływu stopnia wypełnienia na właściwości elektryczne, wytworzono przy następujących parametrach druku:

- prędkość druku: 35 mm/s,
- temperatura druku: 200°C,
- temperatura stołu: 70°C,
- wysokość warstwy: 0,1 mm,
- grubość warstw powierzchniowych: 0,4 mm,
- stopień wypełnienia: 25, 50, 75, 100%.

Próbki te poddano procesowi starzenia w komorze z klimatem WGS przez okres 12 tygodni, a następnie określono ich właściwości elektryczne.

Na podstawie uzyskanych wyników do dalszych badań wytypowano materiał zawierający 50% wypełnienia.

Drugi zestaw o 50% wypełnieniu posłużył do określenia wpływu grubości warstw powierzchniowych na badane właściwości elektryczne. Zestaw ten wykonano przy następujących parametrach:

- prędkość druku: 20 mm/s,
- temperatura druku: 200°C,

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

- temperatura stołu: 70°C,
- grubość warstw powierzchniowych: 0,2; 0,4; 0,6 mm,
- stopień wypełnienia: 50%.

Tak jak poprzednio próbki poddano procesowi starzenia przez okres 6 tygodni w komorze z klimatem WGS, zaś zmiany właściwości badano co jeden tydzień.

Metodyka badań

Rezystywność skrośną zbadano umieszczając badaną próbkę pomiędzy dwie elektrody zasilane napięciem 300 V. Napięcie szczytowo z wykorzystaniem włączanego w układ miernika wartości rezystywności próbek wykonanych z różną grubością warstwy wierzchniej. Badania początkowo wykonywano co 7 dni, a w dalszej części co 14 dni.

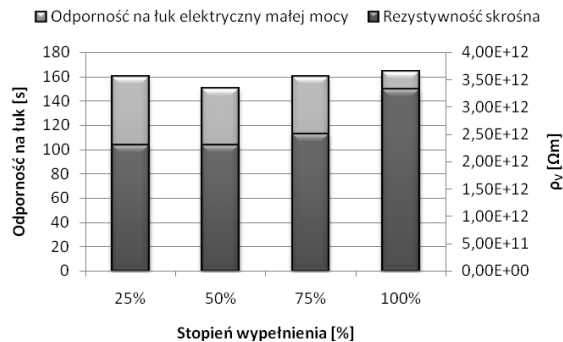
Odporność na działanie łuku elektrycznego małej mocy określono mierząc czas po jakim powstała ścieżka przewodząca w materiale lub doszło do zapalenia się materiału.

Wytrzymałość elektryczną zbadano wykorzystując prąd przemienny o częstotliwości sieciowej. Napięcie na elektrodzie podwyższano o wartość wynoszącą 1 kV/s aż do wystąpienia przebiecia badanego materiału.

Wyniki badań

Poniżej przedstawiono w formie graficznej wybrane wyniki badań pokazujące wpływ parametrów druku na właściwości elektryczne wyrobów wytworzonych technologią FDM oraz zmianę tych właściwości w wyniku przeprowadzonego starzenia w komorze z klimatem WGS. Wpływ stopnia wypełnienia na właściwości elektryczne przedstawiono na rys. 1 - 3.

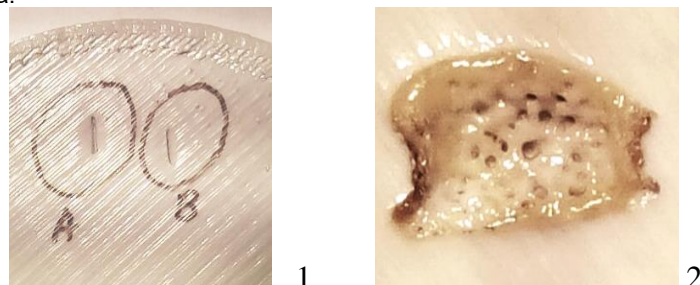
Odporność na łuk elektryczny małej mocy (rys. 1) jest zbliżona dla wszystkich badanych materiałów i zawiera się w przedziale 155-165 s. Jest to podyktowane tym, że grubość warstwy wierzchniej wszystkich próbek o wypełnieniu 25, 50 i 75% była taka sama.



Rys. 1. Porównanie odporności próbek na działanie łuku elektrycznego małej mocy oraz rezystywności skrośnej materiałów o różnym stopniu wypełnienia.

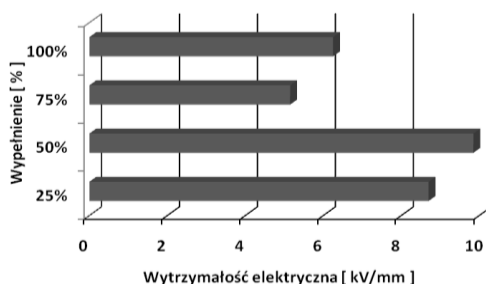
Kinetykę działania łuku na badany materiał o 25 % wypełnieniu po czasie 30, 60 i 150 s przedstawia rys. 2. Można zauważyć, że ślady łuku na powierzchniach materiału po 30 s i 60 s są podobne, natomiast po 150 s widoczna jest znaczna degradacja w miejscu działania łuku. Podobny przebieg zmian występuje dla wszystkich badanych materiałów bez względu na stopień ich wypełnienia.

Rezystywność skrośna badanych próbek uzależniona jest od stopnia ich wypełnienia, przy czym wyraźną różnicę widać dla materiałów o wyższym stopniu wypełnienia.



Rys. 2. Ślady na powierzchni badanego tworzywa (25% wypełnienia) po działaniu łuku elektrycznego małej mocy; 1 - A- 30 s, B – 60 s, 2 - 150 s.

Stopień wypełnienia w istotny sposób wpływa na wytrzymałość elektryczną badanych materiałów (rys. 3). Porównując wytrzymałość elektryczną badanych próbek można zauważyć, że przy 50% wypełnieniu jest ona największa. Porównując wytrzymałość elektryczną materiałów o 100% napełnieniu wykonanych technologią druku oraz wytworzonych technologią wtrysku można zauważyć, że wyroby drukowane posiadają niższą wytrzymałość elektryczną (obniżenie ok. 58%). Jest to efekt różnicy w strukturze materiału oraz w zachodzących procesach przemian fazowych warstw powierzchniowych



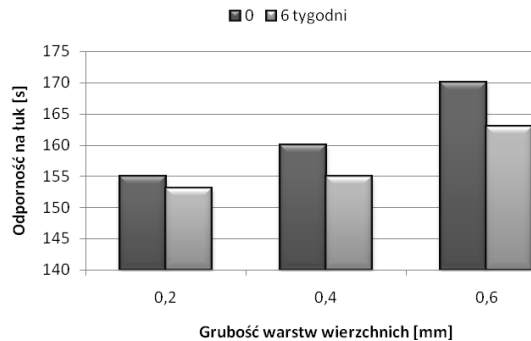
Rys. 3. Porównanie wytrzymałości elektrycznej materiałów o różnym stopniu wypełnienia.

Na podstawie uzyskanych wyników do dalszych badań wytypowano materiał zawierający 50% wypełnienia, na podstawie którego określono wpływ grubości warstwy powierzchniowej na badane właściwości jak również analizowano wpływ procesu starzenia na właściwości elektryczne próbek (różna grubość warstw powierzchniowych). Wybrane wyniki tych badań zostały przedstawione na rys. 4 ÷ 6.

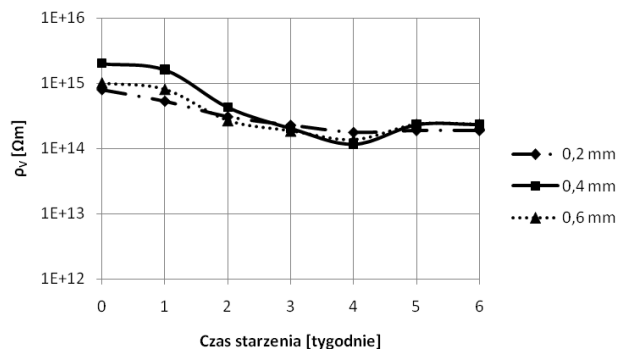
Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań odporności na łuk elektryczny małej mocy materiałów o różnej grubości warstwy powierzchniowej przed i po procesie starzenia w klimacie WGS (6 tygodni). Wraz ze wzrostem grubości warstwy powierzchniowej wzrasta odporność na działanie łuku. Proces starzenia materiału powoduje obniżenie odporności na łuk elektryczny dla wszystkich badanych materiałów. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla materiału o grubości warstw powierzchniowych 0,6 mm.

Przebieg zmian rezystywności skrośnej próbek o różnej grubości warstw powierzchniowych przed i po procesie starzenia przedstawia rys. 5.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



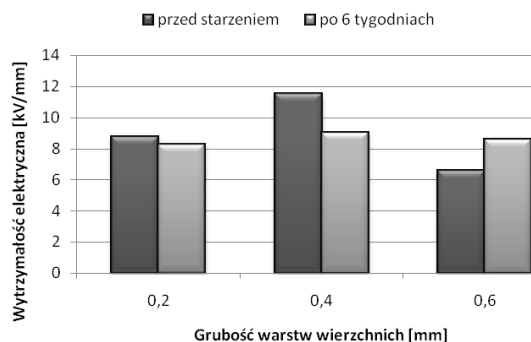
Rys. 4. Wpływ grubości warstw wierzchnich oraz procesu starzenia w komorze WGS na odporność próbek na łuk elektryczny małej mocy.



Rys. 5. Wpływ grubości warstw wierzchnich oraz procesu starzenia w komorze WGS na rezystywność skrośną próbek.

W wyniku starzenia w klimacie WGS wartości rezystywności znacznie się obniżyły. PLA należy do grupy tworzyw polimerowych zawierających w swoim łańcuchu wiązania estrowe (poliestry), których obecność związana jest ze znaczną chłonnością wody. Wszystkie próbki wykazywały rezystywność powierzchniową na porównywalnym poziomie. Średnia wartość rezystywności próbek przed procesem starzenia wynosiła: $1,15 \cdot 10^{15} \Omega$. Po piątym tygodniu przebywania w komorze WGS następuje stabilizacja właściwości materiału (ρ_v w następnych tygodniach ma taką samą wartość).

Przebieg zmian wytrzymałości elektrycznej materiałów przed i po procesie starzenia przedstawia rys. 6. Można zauważyć, że w przypadku Ep najwyższą wartość uzyskano dla materiałów mających grubość warstw powierzchniowych 0,4 mm zaś dalszy wzrost grubości prowadzi do nieznacznego obniżenia wytrzymałości elektrycznej. Może to wynikać ze struktury materiału oraz zachodzących procesów wynikających z procesu nakładania kolejnych warstw.



Rys. 6. Wpływ grubości warstw wierzchnich oraz procesu starzenia w komorze WGS na wytrzymałość elektryczną próbek.

Na podstawie badań wytrzymałości elektrycznej materiałów o różnej grubości warstw wierzchnich stwierdzono, że najkorzystniejsze właściwości elektryczne posiadają materiały wykonane przy grubości wynoszącej 0,4 mm. Wykazują one najwyższą wytrzymałość, zarówno po jak i przed procesem starzenia.

Wnioski

1. Najwyższą wytrzymałością elektryczną charakteryzują się próbki z warstwą wierzchnią wynoszącą 0,4 mm posiadające wypełnienie 50%.
2. Najwyższą odpornością na działanie łuku elektrycznego małej mocy po i przed procesem starzenia charakteryzują się próbki posiadające warstwę wierzchnią o grubości 0,6 mm.
3. Znacznemu spadkowi uległa rezystywność próbek, co było efektem działania wchłoniętych cząsteczek wody, których absorpcja związana jest z obecnością wiązań estrowych w PLA.
4. Wytrzymałość elektryczna oraz odporność na działanie łuku elektrycznego małej mocy nie ulegają znacznej zmianie w trakcie procesu starzenia.
5. Przeprowadzone badania wykazały, że przy zastosowaniu technologii FDM można wykonać wyroby zawierające 50% wypełnienia pracujące w zakresie niskich napięć, z uwzględnieniem ich procesu starzenia.

Literatura

1. Miecielica Mirosław, *Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping*, Przegląd mechaniczny, 2010, 2, str. 39-45.
2. Bellini Anna, Güceri Selcuk, *Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling*, Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(4), str. 252-264.
3. Czerwiński Krzysztof, Czerwiński Michał, *Drukowanie w 3D*, Wydawnictwo Infoaudit, Warszawa 2013, str. 21-34.
4. Oczos K. E., *Rozwój urządzeń i materiałów do kształtowania przyrostowego wyrobów*, Mechanik, 2010, 2, str. 81-84.
5. Renaud J. E., Rodriguez J. F., Thomas J. P., *Maximizing the strength of fused deposition ABS plastic parts*, 10th Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Austin 1999, str. 335-342.
6. Górski Filip, Wichniarek Radosław, Andrzejewski, Jacek, *Wpływ orientacji części na wytrzymałość modeli z ABS wytwarzanych techniką modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym*, Przetwórstwo Tworzyw, 2012, 18, 428-435.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

7. Tartakowski Zenon, Mydlowska Katarzyna, *Wpływ parametrów druku na wybrane właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM*, XVIII Profesorskie Warsztaty Naukowe, str. 72-73.
8. Tartakowski Zenon, Mydlowska Katarzyna, *Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM*, Przetwórstwo Tworzyw, 2015, 2, str. 75-79.
9. Tartakowski Zenon, Mydlowska Katarzyna, *Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu*, Przetwórstwo Tworzyw, 2015, 6, str. 467-472.
10. Bursa Jan, Tartakowski Zenon, Kosyl Mateusz, *Biodegradowalne kompozyty PLA do zastosowań na wyroby elektrotechniczne*, VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna, Innowacyjne Materiały i Technologie w Elektrotechnice, Nauka dla przemysłu – Przemysł dla nauki, iMitel 2012, Przytęsko k. Gorzowa Wielkopolskiego, 18-20 kwietnia 2012.
11. Bohatyrewicz Patryk, *Badanie wybranych właściwości elektrycznych materiałów z PLA wytworzonych w technice druku 3D*, praca dyplomowa, Szczecin, ZUT, 2014.
12. Juzyszyn Wojciech, *Badanie właściwości elektrycznych materiałów termoplastycznych wykonanych w technice druku 3D*, praca dyplomowa, Szczecin, ZUT, 2014.

Autorzy: Dr hab. inż. Zenon Tartakowski, profesor ZUT; Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, e-mail: zenon.tartakowski@zut.edu.pl
dr inż. Jan Bursa; Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: jan.bursa@zut.edu.pl
mgr inż. Katarzyna Mydlowska; Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, e-mail: katarzyna.mydlowska@zut.edu.pl