

BADANIE PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH PRÓBEK Z TWORZYWA ABS WYKONANYCH ZA POMOCĄ DRUKARKI 3D W ZALEŻNOŚCI OD STOPNIA ICH WYPEŁNIENIA

Maciej Kotyk¹, Paweł Maćkowiak

1. WSTĘP

Drukarki 3D stają się coraz popularniejsze zarówno w kręgach naukowców, jak i w przemyśle. Urządzenia tego typu znajdują zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach, takich jak inżynieria mechaniczna, medycyna, architektura oraz wiele innych [Kopanicki 2012]. Jest to naturalna konsekwencja rozwoju zaawansowanych aplikacji graficznych typu CAD. Mimo tego, że „dokumentacja płaska” jest standardem w zakresie sposobu zapisu oraz transferu informacji o obiektach, to metody przestrzennego odwzorowania należą do skutecznych metod uzupełniających opis. Zwiększenie zainteresowania tego typu urządzeniami jest spowodowane między innymi:

- niższą, bardziej dostępną ceną drukarki,
- skróceniem czasu niezbędnego do wydruku,
- zwiększeniem liczby firm oferujących sprzedaż drukarki 3D,
- koniecznością coraz szybszego wytwarzania prototypów,
- niskim kosztem materiałów eksploatacyjnych,
- zwiększoną dokładnością opisywanych urządzeń,
- innymi czynnikami.

Aktualnie funkcjonuje wiele różnorodnych układów konstrukcyjnych drukarek 3D, szczególnie pracujących w technologii FDM.

W celu określenia, która z drukarek jest najbardziej właściwa do zdefiniowanych celów, oceny dokonuje się w 4 kategoriach: koszt drukarki, całkowity czas wydruku, jego jakość i parametry związane z obsługą [Kret 2010]. W kategorii związanej z kosztem nie chodziło wyłącznie o kwotę związaną z bezpośrednim zakupem urządzenia, lecz również o opłaty wynikające z dostosowania środowiska, w jakim obiekt ma pracować, tj. dostępność bieżącej wody, termoizolacja, odpowiednie wentylowanie pomieszczenia oraz materiały eksploatacyjne i chłonność energii elektrycznej.

Kolejnym parametrem porównawczym był czas. Parametr ten jest szczególnie istotny zwłaszcza w procesie przemysłowym, jednak nie należy cechy tej utożsamiać wyłącznie z samym drukowaniem detalu, ale z całym procesem, jaki temu towarzyszy, ponieważ ustawianie takich parametrów, jak: szybkość posuwu ekstrudera, kalibracja miejsc zerowych osi XYZ oraz uzyskanie odpowiedniej temperatury elementów roboczych drukarki 3D (głowicy i stołu urządzenia), to nieodzowne, długotrwałe etapy, nierozzerwalnie związane z eksploatacją opisywanych maszyn.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Następnym z rozpatrywanych czynników, będącym składową oceny końcowej, była jakość wykonanych elementów konstrukcyjnych. Intuicyjnie można byłoby przypuszczać, że jest to parametr wysoce subiektywny. W celu dokonania możliwie obiektywnej oceny zaproponowano kryterium, w którym brano pod uwagę dokładność wymiarową wydrukowanego obiektu jako całości, jakość warstwy wierzchniej oraz tej, którą to urządzenie wykonało jako charakterystyczną, pierwszą warstwę, a także liczbę wad związanych z przegrzaniem tworzywa i chropowatość powierzchni.

Ostatnią cechą braną pod uwagę podczas oceny był parametr określony jako obsługa. Oceniano tu głównie liczbę oprzyrządowania potrzebnego do definiowania zadań, które drukarka powinna wykonać, generowany hałas podczas pracy, ilość zanieczyszczeń wprowadzanych do otoczenia podczas pracy oraz produktów przypaleń materiału, z którym urządzenie pracowało i ostatecznie intuicyjność oraz szybkość pracy oprogramowania drukarki [Kret 2010].

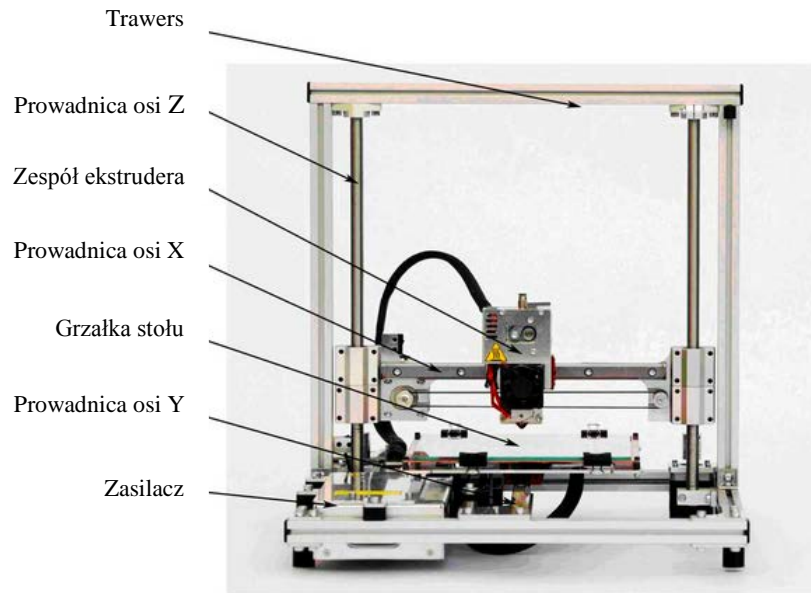
Przedstawione badania dotyczyły porównania drukarek 3D oraz materiałów (filamentu), jakie wykorzystuje się do drukowania gotowych elementów [Gościński i in. 2012]. W literaturze tematu niewiele jest prac dotyczących badań wytrzymałościowych elementów wykonanych za pomocą drukarek 3D.

Wytwory te mogą mieć charakter pokazowy, ale mogą być również elementami konstrukcyjnymi obiektów technicznych, przenoszącymi obciążenia wynikające z warunków pracy maszyny. Z tego powodu postanowiono wykonać badania monotonicznej próby rozciągania próbek wiosełkowych wykonanych w technologii druku 3D w celu lepszego poznania podstawowych właściwości wytrzymałościowych.

2. BUDOWA DRUKARKI TRÓJWYMIAROWEJ NA PRZYKŁADZIE URZĄDZENIA DIM 200

Bramowe drukarki trójwymiarowe pracujące na zasadzie nakładania cienkim strumieniem rozgrzanego tworzywa polimerowego (FDM) mają bardzo zbliżoną budowę. Zasadniczą różnicą występującą w drukarkach jest objętość komory ograniczającej przestrzeń roboczą urządzenia. Najprostsze układy konstrukcyjne nie są wyposażone w obudowaną czy też zamkniętą komorę grzewczą, co jest bardzo kłopotliwe ze względu na występowanie zjawiska skurczu. Podczas pracy drukarki, w otwartej przestrzeni roboczej wystarczy niewielki podmuch powietrza i drukowany element może odkształcić się od strony natarcia strumienia chłodnego powietrza. W przypadku gdy przestrzeń robocza jest zabudowana lub nawet zamknięta izotermicznym kontenerem, równomierna temperatura panująca wewnątrz komory roboczej poprawia w sposób znaczący jakość drukowanego elementu i pozwala na ograniczenie ryzyka związanego z wystąpieniem skurczu termicznego w drukowanym elemencie. Konstruktorzy bardzo często rezygnują ze wspomianej obudowy z dwóch powodów. Pierwszym z nich jest rzecz jasna zwiększenie kosztów oraz złożoności konstrukcji drukarki, drugim zaś jest konieczność przeniesienia elementów elektronicznych poza komorę, aby uniknąć ich termicznego przepalenia. Jednym ze sposobów uniknięcia odkształceń drukowanego detalu za pomocą urządzenia o niezabudowanej przestrzeni roboczej może być bardzo staranny dobór parametrów drukowania oraz ingerencja w kod programu drukującego.

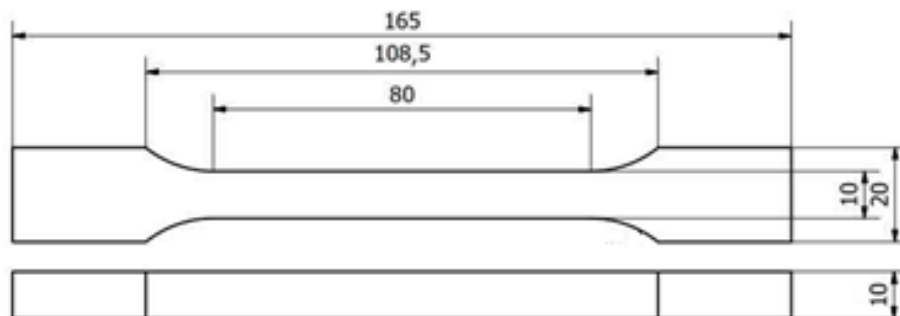
Najbardziej charakterystyczne elementy budowy drukarki 3D zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok typowej drukarki 3D ze wskazaniem [Instrukcja... 2014]

3. OBIEKT BADAŃ

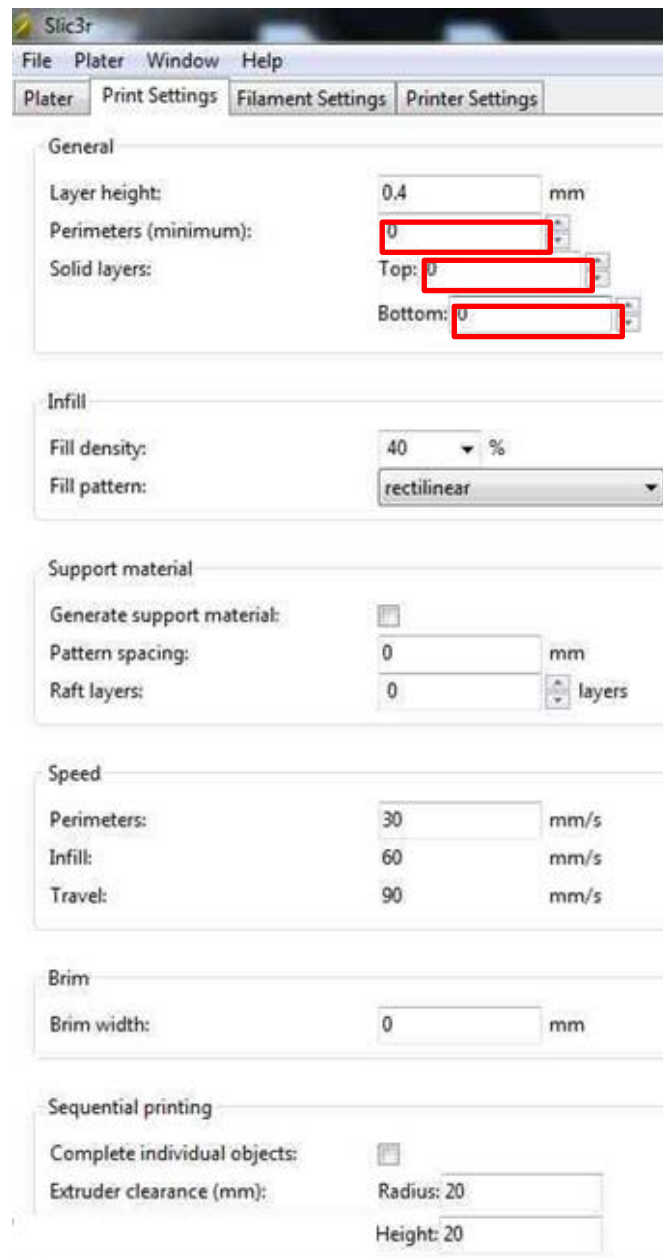
Obiektem badań były próbki wosłkowe wykonane z tworzywa polimerowego ABS za pomocą drukarki 3D DIM 200 wyprodukowanej przez firmę 3 Dimension, która została zmontowana w obiektach dydaktycznych Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Wymiary próbek, które wykorzystano do przeprowadzenia eksperymentu, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Podstawowe wymiary próbki [opracowanie własne]

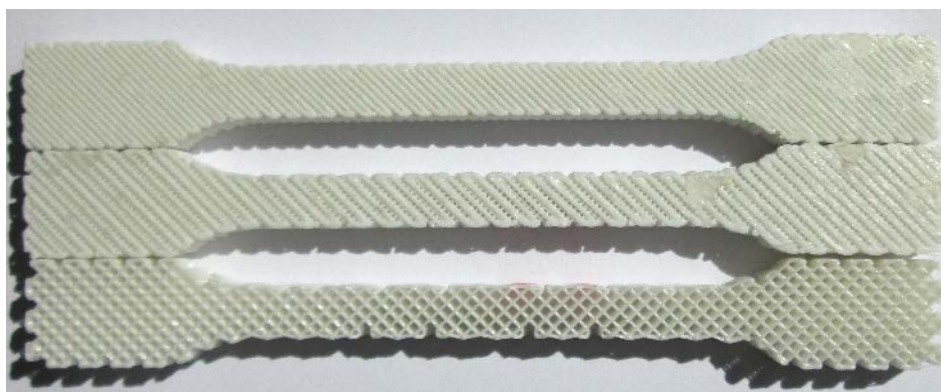
Oprogramowanie dedykowane do drukarki, za pomocą której wykonano próbki, pozwala na domyślne ustawienia, między innymi grubości warstwy wierzchniej i bocznej drukowanych elementów. Ustawienia takie nie gwarantują uzyskania różnorodnych próbek pod względem wypełnienia i nie dają podstaw do realizacji badań wytrzymało-

ściowych. W celu całkowitego wyeliminowania warstw wierzchniej i bocznej należało zaingerować w domyślne ustawienia drukarki i zmienić grubość opisywanych elementów tak, aby wynosiła ona 0 mm. Zrzut ekranu podczas wprowadzenia zmian został zaprezentowany na rysunku 3, gdzie kolorem czerwonym zaznaczono ustawienie warstwy wierzchniej, spodniej oraz bocznej jako 0 mm.



Rys. 3. Zrzut ekranu podczas ustawiania wydruku na drukarce 3D [opracowanie własne]

Badaniu podlegały próbki wykonane wyłącznie z wypełnienia, tj. bez ścianek bocznych oraz warstwy dolnej i wierzchniej. Wykonane próbki zostały zaprezentowane na rysunku 4. Należy zaznaczyć, że próbki różniły się między sobą stopniem wypełnienia materiałem filamentu.



Rys. 4. Próbkki wiosełkowe poddane badaniu o wypełnieniu kolejno 60%, 40% i 20% [opracowanie własne]

4. OPIS BADAŃ

Badania polegały na wykonywaniu następujących po sobie kolejnych prób monotonicznego rozciągania próbek wiosełkowych. Pomijając badania testowe i kalibrujące, każde z typów badanych próbek wykonano w 3 egzemplarzach, które później zostały poddane badaniom niszczącym na maszynie wytrzymałościowej.

Urządzeniem pozwalającym na wykonanie badań statycznej wytrzymałości na rozciąganie była maszyna wytrzymałościowa śrubowa Instron 5966. W celu określenia odkształceń do maszyny podłączono ekstensometr przystosowany do statycznych badań wytrzymałościowych, którego baza wynosiła 50 mm. Sterowanie maszyną oraz rejestracja sygnałów z niej wychodzących była możliwa dzięki oprogramowaniu Bluehill 2, zainstalowanemu na komputerze stacjonarnym podłączonym do stanowiska i stanowiącemu jego nieodzowny element.

Próbki zostały zamontowane w mechanicznych uchwytach maszyny tak, aby środek próbki znajdował się dokładnie w osi symetrii maszyny wytrzymałościowej. Końcówki robocze uchwytu maszyny zostały dobrane w taki sposób, żeby wysuw trzpienia uchwytu powodował permanentne zaciśnięcie badanej próbki w szczękach śrubowej maszyny wytrzymałościowej. Uniknięcie poślizgu badanej próbki w uchwycie osiągnięto dzięki karbowanej powierzchni końcówek roboczych. Zabieg ten miał na celu wyeliminowanie momentów gnących. Na części pomiarowej badanego obiektu umieszczano za pomocą sprężyn dociskowych ekstensometr do badań statycznych o bazie pomiarowej 50 mm, kompatybilny z układem pomiarowym urządzenia wytrzymałościowego. Zadaniem ekstensometru było mierzenie odkształcenia próbki wiosełkowej, wyrażonej w procentach, wskutek oddziaływania siły rozciągającej. Opisywany układ wraz z badanym obiektem przed rozpoczęciem próby zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 5. Mocowanie próbki [opracowanie własne]

Tak zamocowane próbki były obciążane osiową siłą do momentu zniszczenia. Sterowanie maszyną następowało poprzez obrót śruby napędowej i w efekcie przesunięcie trawersu ku górze. Prędkość posuwu wynosiła $0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, przy czym należy zaznaczyć, że materiał był mało rozciągliwy.

Podczas całego badania zniszczono dziewięć próbek, tj. po trzy z każdego z wybranych stopni wypełnienia.

5. WYNIKI BADAŃ

W celu odpowiedniej interpretacji wyników oraz uniknięcia pomyłek zaproponowano trzyczęściowy system oznaczeń. Pierwszy człon wskazuje kształt próbki, drugi stopień wypełnienia wiosełka polimerem ABS, trzeci zaś stanowi o kolejnym następującym po sobie numerze próbki. Zgodnie z powyższym podczas eksperymentu wyznaczono:

- PW_20_n - próbki wiosełkowe wypełnione w 20%,
- PW_40_n - próbki wiosełkowe wypełnione w 40%,
- PW_60_n - próbki wiosełkowe wypełnione w 60%.

gdzie:

n – jest kolejnym następującym po sobie numerem próbki.

Tabela 1 przedstawia otrzymane wyniki badań oraz podstawowe wartości statystyczne dla zbadanych próbek o wypełnieniu 20%.

W tabeli 2 również zawarto podstawowe własności mechaniczne oraz opracowanie statystyczne wyznaczone dla próbek o wypełnieniu 40%, a w tabeli 3 – dla wiosełek o wypełnieniu 60%.

Tabela 1. Otrzymane wyniki dla próbek o wypełnieniu 20% [opracowanie własne]

	Prędkość rozciągania [mm/s]	P_{\max} N	E_{\max} (zerw)	E przy P_{\max}	Średnia z P_{\max}	Odchyl. standard. P_{\max}
PW_20_1	0,05	184,6	28,7	26,3	191,2	10,6
PW_20_2	0,05	185,5	26,0	25,0		
PW_20_3	0,05	203,5	28,5	25,5		

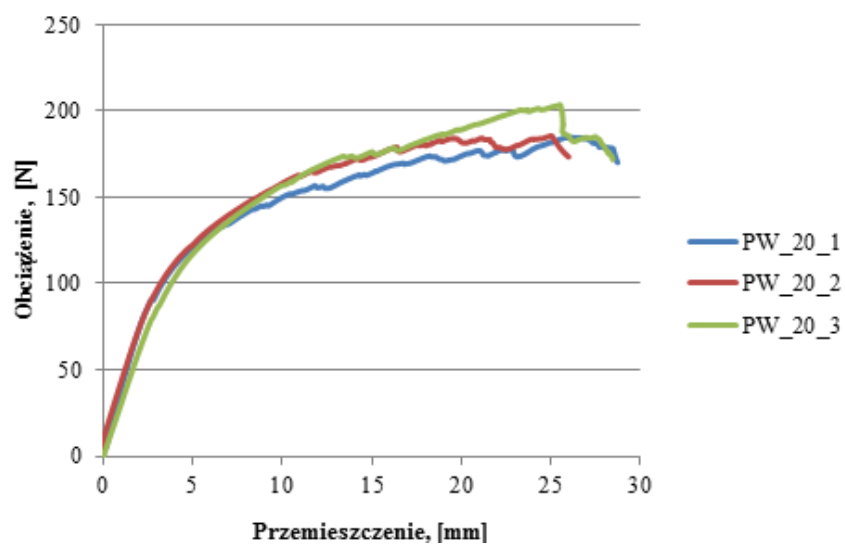
Tabela 2. Otrzymane wyniki dla próbek o wypełnieniu 40% [opracowanie własne]

	Prędkość rozciągania [mm/s]	P_{\max} N	E_{\max} (zerw)	E przy P_{\max}	Średnia z P_{\max}	Odchyl. standard. P_{\max}
PW_40_1	0,05	437,3	37,0	437,3	564,5	111,0
PW_40_2	0,05	614,5	38,1	614,0		
PW_40_3	0,05	641,6	40,1	641,6		

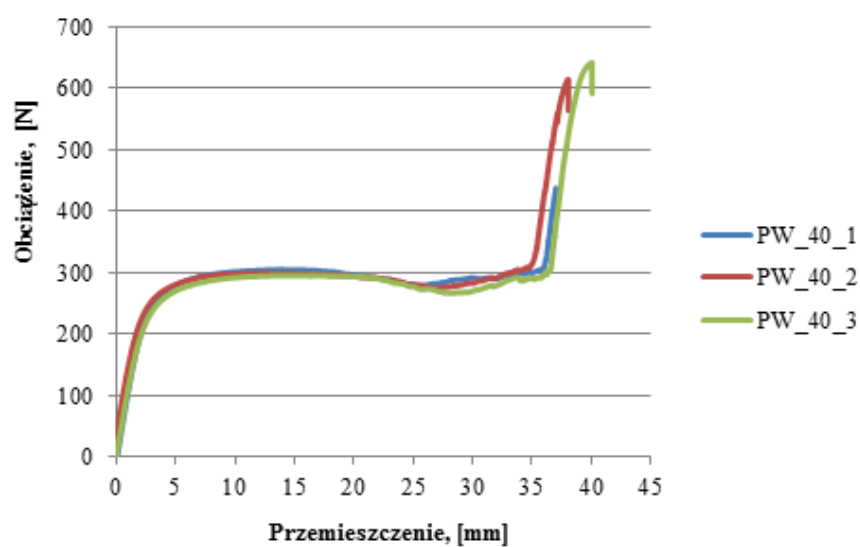
Tabela 3. Otrzymane wyniki dla próbek o wypełnieniu 60% [opracowanie własne]

	Prędkość rozciągania [mm/s]	P_{\max} N	E_{\max} (zerw)	E przy P_{\max}	Średnia przy P_{\max}	Odchyl. standard. P_{\max}
W_60_1	0,05	581,1	14,2	3,3	567,4	19,8
PW_60_2	0,05	544,8	19,0	4,7		
PW_60_3	0,05	576,3	11,3	3,7		

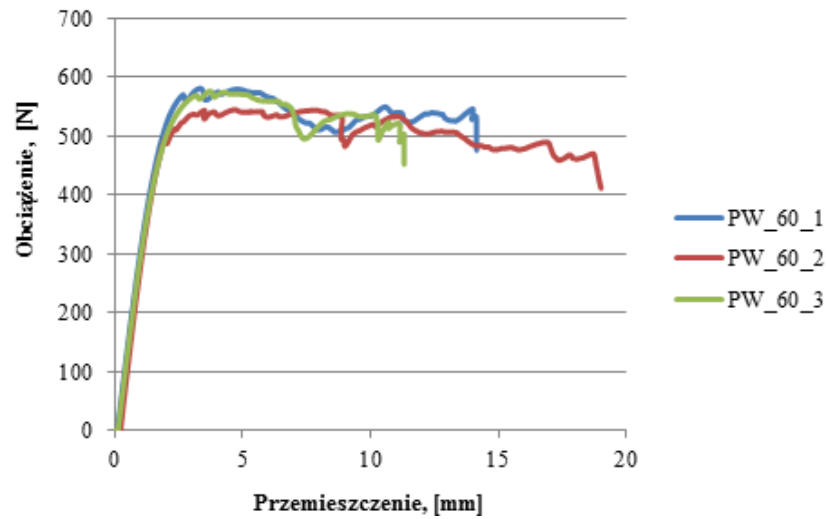
Ilustracja oznaczona numerem 6 przedstawia zależność pomiędzy odkształceniem próbki a wskazaniem siłomierza podczas wykonywania prób na wiosełkach o wypełnieniu 20%, natomiast rysunek 7 przedstawia graficzną zależność pomiędzy obciążeniem a odkształceniem próbek o wypełnieniu 40%. Na rysunku 8 – adekwatnie do rysunków 6 oraz 7 – również znajduje się zależność pomiędzy siłą a odkształceniem, z tym, że zrywane były próbki wiosełkowe wydrukowane na drukarce 3D o wypełnieniu 60%. Rysunek 9 zawiera porównanie badanych cech dla wybranych próbek z wszystkich stopni wypełnienia. Należy zaznaczyć, że poszczególnymi kolorami zróżnicowano poszczególne próbki w tej samej serii badań.



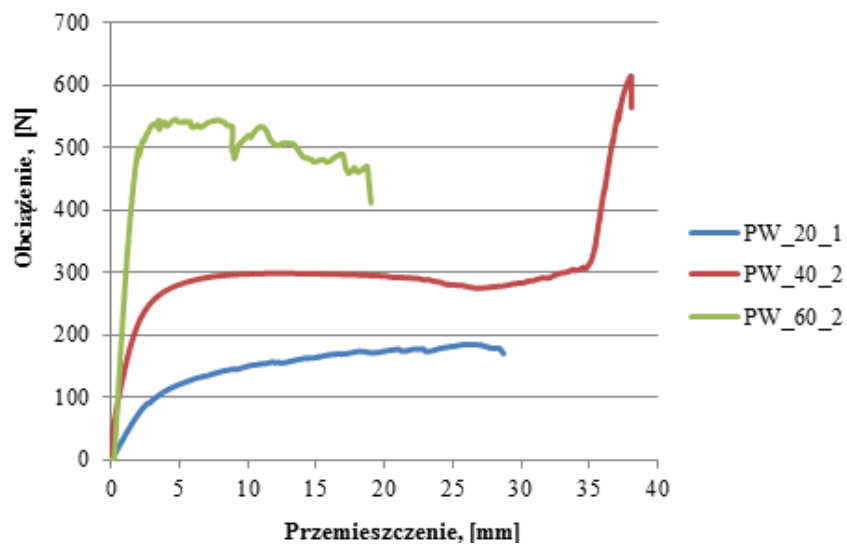
Rys. 6. Wyniki pomiarów otrzymanych podczas próby monotonicznego rozciągania dla próbek wiosekowych o wypełnieniu 20% [opracowanie własne]



Rys. 7. Wyniki pomiarów otrzymanych podczas próby monotonicznego rozciągania dla próbek wiosekowych o wypełnieniu 40% [opracowanie własne]



Rys. 8. Wyniki pomiarów otrzymanych podczas próby monotonicznego rozciągania dla próbek wiórkowych o wypełnieniu 60% [opracowanie własne]



Rys. 9. Porównanie wyników pomiarów badanych cech dla próbek o różnym stopniu wypełnienia [opracowanie własne]

6. WNIOSKI

1. Gwałtowny wzrost siły zrywającej w przypadku próbek o wypełnieniu 40% był spowodowany skasowaniem luzu pomiędzy poszczególnymi włóknami w materiale.

2. Nieregularna charakterystyka wykresu monotonicznej próby rozciągania dla próbek o wypełnieniu 60% jest spowodowana pojawieniem się kolejnych pęknięć poszczególnych włókien materiału wypełnienia.
3. Optymalnym rozwiązaniem, ze względu na czas wykonywania próbek oraz wytrzymałość, jest stosowanie wypełnienia o wartości 40%.

LITERATURA

Gościański M., Ciechacki R., Dudziak B., 2012. Technologiczne uwarunkowania procesu klejenia elementów z terpolimeru ABS w aspekcie wykonywania modeli metodą FDM. *J. Res. Appl. Agric. Engng.* 15.

Kopanicki J., 2012. Przydatność konsumenckich drukarek 3D w technologii FDM do tworzenia modeli architektonicznych. *Przestrzeń i Forma* 18.

Kret M., 2010. Drukarki 3D – porównanie. *Mechanik* 11.

Instrukcja montażu drukarki DIM 200, 2014. 3Dimension 2014.