

# Wykorzystanie optycznej metody analizy odkształceń do oceny wybranych własności wytrzymałościowych materiału próbki drukowanej metodą FDM

Experimental testing of mechanical properties of 3D FDM printed material using optical, non-contact displacement measurement technology

MACIEJ PARAFINIAK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.578

Omówiono prace dotyczące przygotowania i realizacji badań eksperymentalnych próbek drukowanych metodą osadzania topionego materiału – FDM (*fused deposition modelling*), w tym metodykę pomiarów optycznych odkształceń z wykorzystaniem fotogrametrii oraz zastosowanie tej metody w próbie statycznego rozciągania. Porównano wyniki uzyskane na maszynie wytrzymałościowej i z pomiarów z wykorzystaniem metody fotograficznej, dotyczące własności mechanicznych materiału próbki wykonanej techniką druku FDM. Głównym celem prac było przygotowanie optycznej metody pomiarowej do badań materiałów niejednorodnych o dużych odkształceniach, zobrazowanie pól odkształceń oraz analiza zachowania się takich materiałów w złożonych stanach obciążeń.

**SŁOWA KLUCZOWE:** optyczne metody pomiarowe, fotogrametria, badania wytrzymałościowe, statyczna próba rozciągania, druk 3D, PLA, FDM

*This paper presents results of works, which concerned on proper sample preparation, testing methodology and analysis of material properties with application of optical displacement measurements. Later author compare result of measurements in performed tests and present 3D FDM printed material characteristic result. The goal was to prepare optical non-contact measurements methodology for examining properties of anisotropic and high deformable materials in complex loads condition.*

**KEYWORDS:** optical measurements, photogrametry, material testing, tension testing, rapid prototyping, 3D printing, PLA, FDM

Badanie właściwości mechanicznych współczesnych materiałów konstrukcyjnych jest wyzwaniem ze względu na ich złożoną budowę oraz niejednorodność struktury i cech. Dodatkową trudność sprawia prawidłowe obciążenie próbki wykonanej z takich materiałów, niezbędne do wywołania określonego, złożonego stanu naprężenia. Najtrudniejszy jest jednak pomiar rzeczywistych, miejscowych wartości odkształceń w złożonych stanach naprężenia, konieczny do weryfikacji obliczeń i symulacji.

Stosowane obecnie metody pomiarowe, wykorzystujące czujniki typu ekstensometry i tensometry (oporowe i optyczne), umożliwiają pomiar wartości uśrednionej na długości bazowej  $L_0$ , przy czym wymagają zapewnienia kontaktu ramion pomiarowych z próbką lub – w przypadku tensometrów – naklejenia ich na powierzchni próbki. Czujniki mają wpływ na wyniki, ponieważ ingerują w badany obiekt, a ponadto stwarzają wiele problemów technologicznych. Uzyskiwane wyniki często są niewystarczające, zwłaszcza gdy bada się przyczynę zniszczenia oraz miejscowe wartości odkształceń i naprężeń, a badany mate-

riał ma niejednorodną budowę (jak np. omawiana w artykule próbka materiału wykonanego metodą druku FDM).

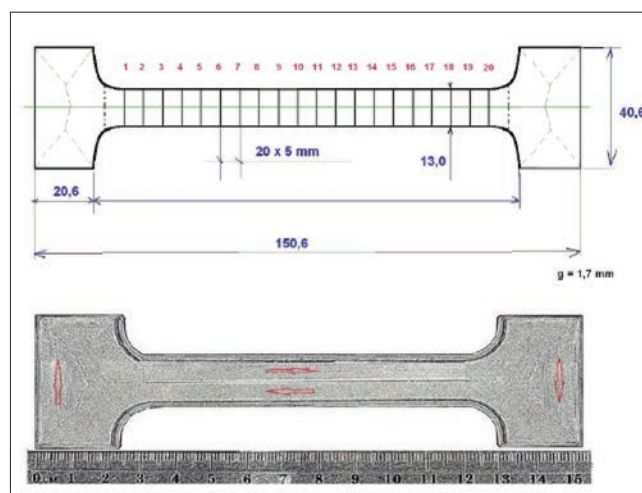
Rozwiązaniem mogą być optyczne, bezkontaktowe metody pomiarowe, wykorzystujące zalety współczesnych urządzeń optycznych, dostępny opis matematyczny i komputerowe metody obliczeniowe oraz zapewniające dokładność pomiarów i prezentację wyników w czasie rzeczywistym (nie tylko wartości uśrednionych, lecz także map lokalnych odkształceń itp.).

W artykule opisano eksperyment, w którym pomiary optyczne oparte na rejestracji fotograficznej (fotogrametrii) posłużyły do określenia własności materiału (w zakresie wytrzymałości na rozciąganie) przygotowanego metodą druku FDM. Wyniki pomiarów optycznych porównano z danymi z próby rozciągania na maszynie wytrzymałościowej.

## Przygotowanie próbek do badań

Badaniom poddano próbki wykonane metodą drukowania FDM z materiału PLA (*Poly Lactic Acid*), czyli kwasu polimlekowego, o geometrii i układzie włókien pokazanych na rys. 1. Kształt próbki (tzw. wiorełko) wynikał z zaleceń normy dotyczącej badań tworzyw sztucznych [3] oraz posiadanych uchwytów montażowych do maszyny wytrzymałościowej.

Próbki wykonano z materiału typu PLA Barrus. PLA to biodegradowalne plastiki produkowane z naturalnych, odnawialnych surowców. PLA Barrus jest twardym, łatwym w użyciu, wysokiej jakości filamentem do zastosowania w drukarkach 3D, pozwalającym na drukowanie w niższych temperaturach. Jego zmodyfikowany skład powoduje, że materiał jest twardszy i mniej kruchy, a jednocześnie zachowuje wszystkie cechy typowe dla PLA.



Rys. 1. Szkice próbek do badań: a) wymiary, b) układ i kierunek włókien wynikający z ułożenia materiału – widoczne naddatki materiału charakterystyczne dla procesu wytwarzania usunięto przed badaniami

\* Dr inż. Maciej Parafiniak (maciej.parafiniak@simr.pw.edu.pl) – Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska

Ze względu na niski współczynnik skurczu wykazuje mniejszą podatność na odkształcanie. Deklarowane przez producenta parametry materiału zastosowanego do drukowania próbek zawarto w tabl. I.

**TABLICA I. Wymiary, właściwości fizyczne i termiczne filamentu PLA Barrus [6]**

Właściwość	Metoda testowa	Wartość typowa
Średnica, mm	–	1,75 ±0,05
Okrągłość, %	–	≥ 95
Ciężar właściwy, g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505	1,24
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	ASTM D882	110–145
Wydłużenie przy zerwaniu, %	ASTM D882	160 (MD)/100 (TD)
Moduł Younga, MPa	ASTM D882	3310 (MD)/3860 (TD)
Temperatura drukowania, °C	–	180–210
Temperatura topnienia, °C	ISO 294	210 ±10
Punkt topnienia, °C	ASTM D3418	145–160
Temperatura mięknienia wg Vicata, °C	ISO 306	±60

Próbki wykonano na drukarce 3D techniką FDM, z uwzględnieniem aspektów opisanych w pracach [2, 3, 7], dotyczących układu włókien materiału, oraz informacji ze strony twórcy tej metody – firmy Stratasys [5]. Technika FDM polega na budowaniu kolejnych warstw próbki przez nakładanie roztopionego materiału termoplastycznego z użyciem dyszy sterowanej w płaszczyźnie poziomej (w osiach X i Y). Materiał w postaci filamentu jest dostarczany do dyszy z podajnika (ekstrudera) umieszczonego nad termiczną głowicą. Dysza wraz z głowicą przemieszcza się jedynie w płaszczyźnie poziomej, a ruch pionowy (w osi Z) zapewnia platforma robocza (stolik). Warstwy materiału są nakładane zgodnie z geometrią budowanego modelu, przy czym droga głowicy zależy od sposobu zaprojektowania i możliwości oprogramowania projekto-sterującego. Kolejna nakładana warstwa materiału krzepnie i łączy się z poprzednią, tworząc materiał o ukierunkowanej budowie.

W badaniu wytrzymałości próbek skorzystano z wcześniejszych doświadczeń dotyczących testów wytrzymałości na rozciąganie opisanych w pracach [1, 4].

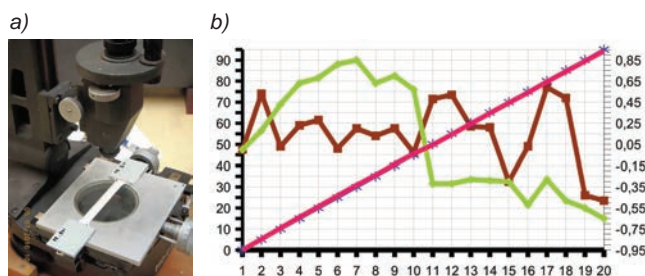
Wykonane próbki charakteryzowały się układem włókien, który wynikał z wyboru parametrów drukarki i sposobu sterowania ruchem głowicy przez oprogramowanie. Technologia wykonania spowodowała powstanie wad materiałowych (rys. 2).



Rys. 2. Układ linii drukowania próbki B01 oraz jej wady

### Przygotowanie pomiarów optycznych

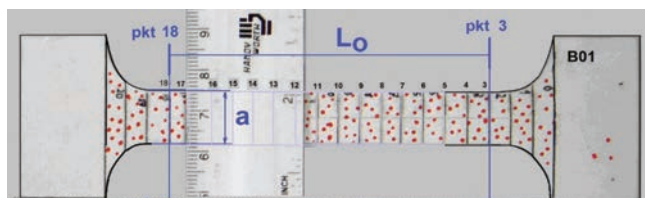
Pomiary optyczne przeprowadzono metodą fotografii, opisaną w [9]. Na potrzeby metody pomiarowej sprawdzono geometrię próbki, naniesiono linie i punkty pomiarowe oraz określono ich położenie z wykorzystaniem mikroskopu (rys. 3). Pozwoliło to na określenie skali zastosowanej do zobrazowania próbki na zdjęciach oraz na porównanie geometrii przed badaniami i po badaniach, a także ułatwiło oszacowanie dokładności zrealizowanych pomiarów optycznych.



Rys. 3. Pomiar mikroskopowy (a) oraz wykres położenia linii i punktów na próbce B01 – nieodkształconej (kolor brązowy) i po badaniach (kolor zielony); różowa linia przedstawia założone położenie wzorcowe (b)

### Odtworzenie skali odkształceń w jednostkach fizycznych

Na podstawie pomiarów i wykonanych zdjęć (rys. 4) dla próbki swobodnej i zamocowanej na maszynie wytrzymałościowej (przed obciążeniem) wykonano analizę skali odwzorowania próbek w celu przeliczenia wymiarów ze zdjęć (pikseli) na jednostki fizyczne (mm). Wyniki zamieszczono w tabl. II.



Rys. 4. Podstawowe wymiary próbki wykorzystane do określenia skali odwzorowania optycznego na zdjęciach

**TABLICA II. Podstawowe wymiary próbki B01 oraz obliczone współczynniki skali zobrazowania**

Wymiary próbki		Współczynnik skali	
		mm/px	px/mm
Szerokość a, mm	13	0,054	18,465
Długość pomiarowa L <sub>0</sub> , mm	75	0,047	21,274
Długość całkowita L <sub>c</sub> , mm	ok. 150,5	–	–
Grubość B, mm	ok. 1,75	–	–

### Badania na maszynie wytrzymałościowej i metodyka pomiarów optycznych

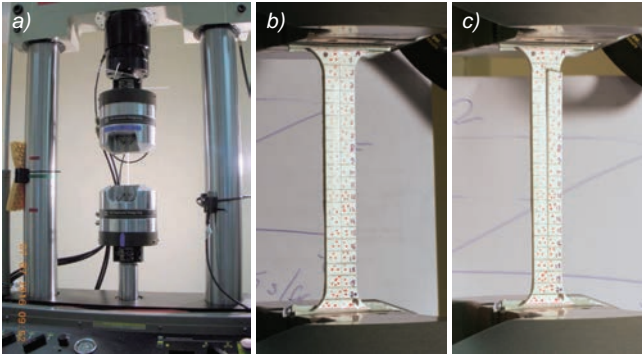
Badania zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej typu MTS 809 (rys. 5). Próby rozciągania prowadzono zgodnie z normą dotyczącą badania tworzyw sztucznych [8]. Próbki zamocowano za pomocą przekładek. Podczas doświadczenia sterowano ruchem głowicy, realizując posuw 0,01 mm/s. W plikach wynikowych zapisywano czas oraz pozostałe parametry próby: skok, siłę i wskazania ekstensometru. Wyniki te były prezentowane na ekranie, co umożliwiło śledzenie przebiegu i parametrów próby.

W trakcie badań okresowo – co 5 s – wykonywano zdjęcia przy stałym położeniu aparatu fotograficznego (Canon EOS-M o rozdzielczości 18 Mpx z obiektywem 50 mm). W zdjęciu był zapisany czas jego wykonania (z dokładnością do 0,01 s), co umożliwiło połączenie danych z maszyny i metody optycznej.

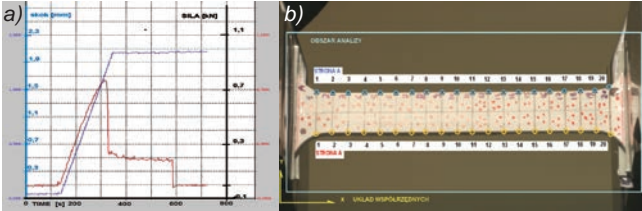
Do analizy wykorzystano zdjęcia kolejnych etapów obciążenia próbki z naniesionymi znacznikami. Umożliwia to określenie położenia punktów w chwili wykonywania zdjęcia i zobrazowanie przemieszczeń tych punktów. Zakres pola analizy jest związany z wielkością próbki i liczbą wybranych punktów pomiarowych.

Zapis fotograficzny rozpoczynano przed badaniem. Najpierw wykonywano zdjęcie zamocowanej na maszynie,





Rys. 5. Próbką zamocowana na maszynie (a) oraz widoki próbki przed badaniami (b) i zerwanej po badaniach (c)



Rys. 6. Zobrazowanie ekranu maszyny MTS z przebiegu próby (a) oraz typowe zdjęcie próbki do optycznej analizy odkształceń z naniesionym położeniem punktów pomiarowych i osi analizy (zdjęcie próbki w maszynie przed wykonaniem próby) (b)

nieobciążonej próbki, a potem – serię zdjęć (co 5 s) próbki obciążonej. Do momentu zerwania próbki wykonywano ok. 50 zdjęć. Na ich podstawie sporządzono arkusz zawierający dane o czasie wykonania zdjęć i położeniu punktów na obrazie, a następnie arkusz ten łączono z danymi z maszyny wytrzymałościowej MTS. Sporządzono mapę punktów z ich współrzędnymi na kolejnych zdjęciach. Dane wykorzystano do określenia przemieszczeń wybranych punktów i zobrazowania ich na wykresach dla całej próbki. Przebieg próby dodatkowo rejestrowano zapisem wideo.

**Prezentacja wyników**

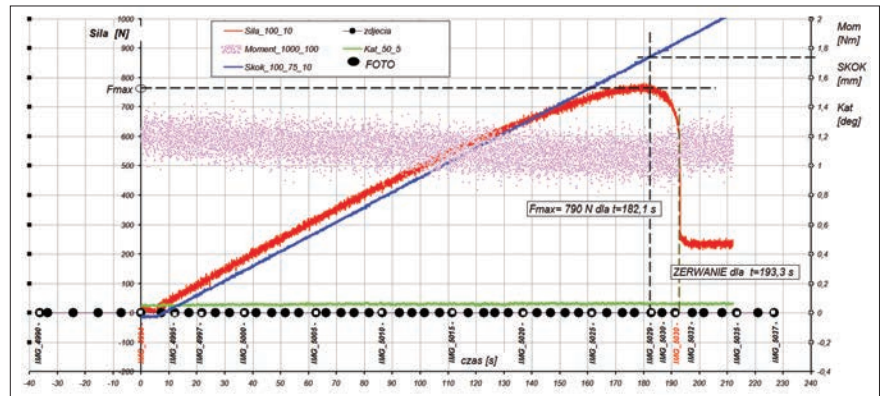
Wyniki prób rozciągania uzyskane z maszyny wytrzymałościowej MTS i zebrane w plikach danych połączono w programie Excel z danymi odczytanymi z kolejnych zdjęć, zawierającymi wyniki przemieszczeń wybranych punktów pomiarowych. Przebiegi poszczególnych parametrów w czasie zobrazowano na wykresach.

W metodzie optycznej dla każdego zdjęcia odczytano, a następnie obliczono wartości współrzędnych X i Y wybranych punktów pomiarowych oraz zestawiono je w arkuszu obliczeniowym. Każdemu zdjęciu przyporządkowano czas i odpowiadający mu poziom siły obciążającej próbkę. Po uwzględnieniu skali zobrazowania obliczono rzeczywiste położenia i przemieszczenia punktów. Na podstawie analizy sporządzono wykresy położenia i przemieszczenia punktów podczas próby rozciągania

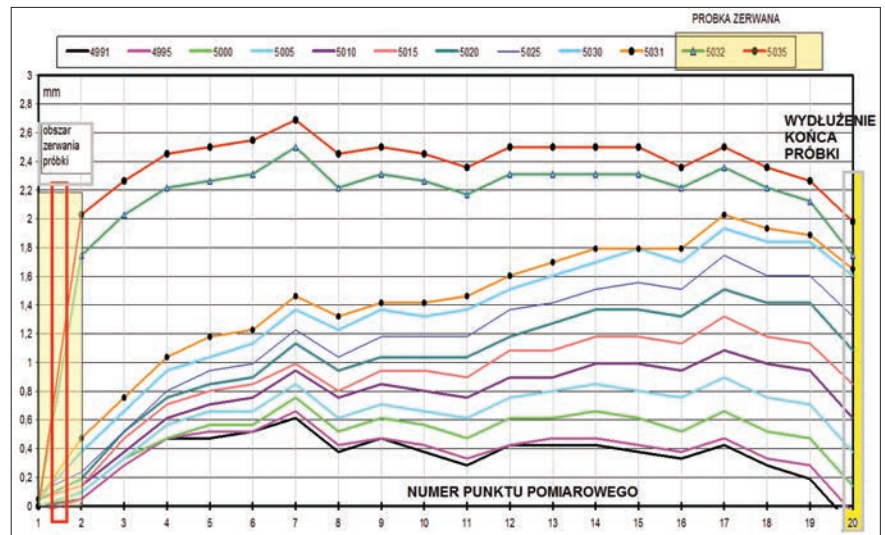
**TABLICA III. Zestawienie wyników z maszyny MTS i danych fotograficznych dla próbki B01**

Nr zdjęcia	Czas*, s	Czas**, s	Siła**, N	Skok**, mm	Opis
IMG_4990	-36,2	-	-	-	Start próby i rejestracji foto
IMG_4994	0	(0)	(17)	(0)	Foto przed rozpoczęciem rozciągania
-	(8,5)	8,5	35	0	Umowny start rozciągania
IMG_4995	12,0	(12)	(45,06)	(0,0)	Pierwsze zdjęcie po starcie rozciągania
IMG_5028	176,8	(176,8)	(763)	(1,68)	Zdjęcie przed osiągnięciem maksymalnego obciążenia $F_{max}$
-		182,1	790	1,74	Osiągnięcie $F_{max}$ w maszynie
IMG_5029	182,8	(182,8)	(782)	(1,75)	Zdjęcie ok. osiągnięcia $F_{max}$
IMG_5030	186,6	(186,6)	(729)	(1,79)	Zdjęcie po osiągnięciu $F_{max}$
IMG_5031	191,4	(191,4)	(668)	(1,84)	Zdjęcie przed zerwaniem próbki
-		193,3	247,1	1,86	Zerwanie próbki
IMG_5032	197,4	(197,4)	(235)	(1,89)	Zdjęcie zerwanej próbki
-		212,1	248,2	2,04 (**)	Koniec rejestracji na maszynie
IMG_5035	213,4	-	-	-	Zdjęcie po zakończeniu rejestracji na maszynie
IMG_5037	226,8	-	-	-	Ostatnie zdjęcie

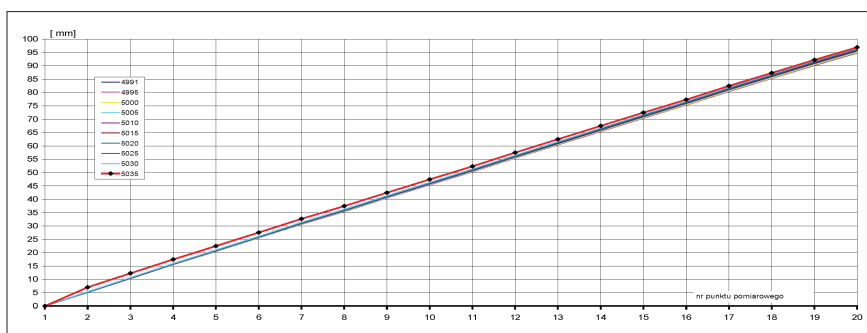
\* wg danych ze zdjęć  
 \*\* wg danych z maszyny  
 UWAGI: Wartości w nawiasach to dane odczytane z pliku wyników maszyny MTS wg umownego czasu foto. Maksymalny zarejestrowany skok maszyny (wydłużenie próbki) do zerwania wynosił 2,04 mm.



Rys. 7. Zobrazowanie wyników z maszyny MTS (dla próbki B01) z uwzględnieniem chwil zapisu fotograficznego



Rys. 8. Typowy wykres przemieszczenia punktów próbki (tu: próbki B01) na kolejnych etapach próby rozciągania (zdjęcie IMG\_4990 – start rozciągania, zdjęcie IMG\_5035 – zerwanie próbki)



Rys. 9. Wykresy położenia kolejnych punktów próbki wzdłuż jej osi w trakcie rozciągania (dane uzyskane na podstawie odczytu ze zdjęć)

(w jednostkach fizycznych). Na rys. 8 przedstawiono typowy wykres przemieszczeń punktów próbki na kolejnych etapach statycznego rozciągania, sporządzony na podstawie zdjęć. Położenie końca próbki (reprezentowanego przez 20. linię na rys. 8) odpowiada jej całkowitemu wydłużeniu na kolejnych etapach rozciągania i może być porównywane z wynikami uzyskanymi z maszyny MTS.

Na rys. 9 przedstawiono położenie kolejnych punktów próbki wzdłuż jej osi (zmierzone na podstawie odczytu ze zdjęć), na poszczególnych etapach rozciągania. Duże przemieszczenia punktu 2 (rys. 9) wynikają z zerwania próbki i rozsunięcia punktów materiału w końcowej fazie rozciągania.

## Podsumowanie

- W trakcie badań na maszynie wytrzymałościowej zastosowano opisaną w pracy metodykę postępowania przy realizacji pomiarów optycznych metodą fotogrametrii, z użyciem aparatu fotograficznego i oprogramowania Excel do analizy wyników. Dla każdej próby odczytano z kolejnych zdjęć położenie punktów próbki, a następnie zrealizowano pomiar i analizę przemieszczeń 20 charakterystycznych punktów próbki. Analiza większej liczby punktów do utworzenia mapy odkształceń wymagałaby komputerowej analizy obrazu.

- Zrealizowane pomiary optyczne pozwalają na określenie wydłużenia całkowitego próbki z dokładnością zbliżoną do pomiarów bezpośrednich na maszynie. Porównanie wyników odkształceń próbki na podstawie wyników z maszyny i metody optycznej prowadzi do wniosku, że uzyskane średnie wartości wydłużenia próbki określone w podobnych warunkach są zbliżone. Przykładowo, w momencie osiągnięcia  $F_{max}$  wydłużenie próbki wyniosło: ok. 1,75 mm – według danych z maszyny (rys. 7), ok. 1,65 mm – wartość zarejestrowana metodą optyczną (rys. 8).

- Pomiary optyczne oprócz uśrednionych wydłużeń próbki dostarczają informacji o przemieszczeniu wybranych punktów, co pozwala na tworzenie wykresów i map przemieszczeń. Pomiar odbywa się bezkontaktowo i bez obciążania próbki, w zakresie odkształceń niemożliwym do realizacji metodą tradycyjną. Metoda optyczna umożliwia pomiar przemieszczeń wzdłuż osi próbki (w kierunku rozciągania) oraz w poprzek.

- Niepewność i błąd metody wynikają z: wielkości najmniejszej jednostki obrazu przypadającej na piksel matrycy (podczas badań  $1 \text{ px} = \text{ok. } 0,05 \text{ mm}$ ), dokładności skali zobrazowania i wpływu błędów optyki (przeprowadzono skalowanie znanej geometrii próbki), wpływu czasu rejestracji zdjęcia (dla migawki 0,1 s przemieszczenie uchwytu wynosiło 0,005 mm, a więc było pomijalne), korekty niedokładności wykonania znaczników – przy wykonaniu ręcznym maksymalnie ok.  $\pm 10\%$  ( $\pm 0,5 \text{ mm}$ ), dokładności

skali czasu (odczyt chwili czasu realizacji zdjęcia odbywał się z dokładnością  $\pm 0,01 \text{ s}$ ). Uzyskana podczas analizy niedokładność pomiaru przemieszczenia wynosiła ok.  $\pm 0,15 \text{ mm}$ .

- Na podstawie badań przeprowadzonych z zastosowaniem optycznej analizy odkształceń wyliczono wartości parametrów wytrzymałościowych, uwzględniając optycznie określone wartości średnich odkształceń i dane o obciążeniach z maszyny MTS. W tabl. IV zestawiono dane dotyczące materiału PLA uzyskane w wyniku

badania próbek i od producenta. Dane te różnią się od siebie, co może wynikać zarówno z niedokładności metody pomiarowej, jak i ze zmian własności materiału w próbce, spowodowanych technologią wykonania próbki, wadami materiałowymi, układem włókien lub nieznanym sposobem pracy materiału (wymaga to dalszych badań).

TABLICA IV. Zestawienie uzyskanych danych materiałowych i danych producenta wg [6]

Parametr	Wyniki badań	Dane wg [6]
Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa	33,8	110–145
Umowna granica sprężystości $R_{e0,05}$ , MPa	21,4	–
Wydłużenie procentowe po zerwaniu $Z$ , %	2,5	100–160
Moduł Younga $E$ , MPa	1603	3310–3860

- Użyta technika pomiarowa pozwala na określenie przemieszczeń wybranych do analizy punktów badanej próbki w zakresie umożliwiającym zobrazowanie w postaci mapy odkształceń, a następnie naprężeń, co daje dokładniejsze informacje o pracy materiału. Ponadto możliwe było wyliczenie globalnych parametrów próbki określających mechaniczne własności materiału, takie jak umowna granica plastyczności czy moduł Younga, do czego potrzebna jest znajomość wartości odkształceń.

- Podczas badań wybrano zbyt duże pole obserwacji, co wpłynęło na zmniejszenie dokładności pomiarów, ale umożliwiło śledzenie pracy całej próbki.

- Niezbędna jest automatyzacja pomiarów, w tym komputerowa analiza obrazów (ze względu na pomiar przemieszczeń wielu punktów pomiarowych), oraz wykorzystanie oprogramowania do analizy i prezentacji wyników w postaci map odkształceń i naprężeń.

## LITERATURA

- Siemiński P., Tomczuk M. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania”. *XI Forum Inżynierskie ProCAX*. Sosnowiec, 2012.
- Siemiński P., Rajch A. „Wpływ orientacji warstw i wypełnienia wnętrza na sztywność części wykonywanych techniką FDM z tworzywa ABS oraz wpływ wymiarów geometrii STL na występowanie szczelin we wnętrzu modelu”. *XII Forum Inżynierskie ProCAX*. Kraków, 2013.
- Skawiński P., Siemiński P., Błazucki P. „Zastosowanie przyrostowej metody FDM/FFF do wytwarzania kół przekładni zębatych”. *Mechanik*. 3 (2015).
- Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik*. 7 (2015).
- www.stratasys.com.
- Dane producenta materiału PLA Barrus (<http://barrus.pl/pla-3>).
- Choi J., Medina F., Kim Ch., Espalin D., Rodriguez D., Stucker B., Wicker R. “Development of a mobile fused deposition modeling system with enhanced manufacturing flexibility”. *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011): pp. 424–432.
- PN-EN ISO 527:1998 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.
- Zarys fotogrametrii, <http://home.agh.edu.pl/~awrobel/resources/Zarys%20fotogrametrii.pdf>.