

„Zeszyty Naukowe
Uczelni Jana Wyżykowskiego.
Studia z Nauk Technicznych”
2018 (7), s. 143–160. ISSN 2543-6740.

PIOTR KRYSIAK
Uczelnia Jana Wyżykowskiego

KRZYSZTOF KWIATKOWSKI
CEDO SP. Z O.O.

DAWID NOWICKI
WOJDYŁA NIERUCHOMOŚCI SP. Z O.O.

Modelowanie, wytwarzanie oraz porównawcze badania wytrzymałościowe wybranych elementów wykonanych w technologii Rapid Prototyping

Streszczenie: W pracy zaprezentowano wyniki badań dotyczących porównania wytrzymałości typowych elementów maszyn wykonanych z tworzyw sztucznych z elementami wytworzonymi w technologii Rapid Prototyping. Dla wybranych elementów wykonano modele wirtualne w oprogramowaniu CAD 3D. Następnie wytworzono elementy metodą FDM z różnych materiałów konstrukcyjnych oraz z różną strukturą i zawartością wypełnienia. W kolejnym kroku dla wytworzonych elementów przeprowadzono badania wytrzymałościowe.

Słowa kluczowe: modelowanie 3D, szybkie prototypowanie, badania wytrzymałościowe.

Modelling, generation and comparative strength tests of selected elements fabricated using Rapid Prototyping technique

Summary: The paper presents the results of tests comparing the strength of typical machines parts manufactured out of plastic with elements fabricated using the Rapid Prototyping technique. For selected elements, virtual models have been developed in CAD 3D software. Afterwards, using finite difference method (FDM), elements were generated using different structural materials, varying structure and distinctive types of filling. As the next step, strength tests have been performed for the manufactured elements.

Keywords: 3D modeling, Rapid Prototyping, strength tests.

1. Wprowadzenie

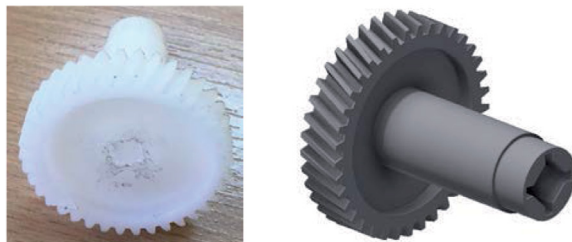
Technologia szybkiego prototypowania (ang. Rapid Prototyping – RP) polega na wytwarzaniu, warstwa po warstwie, trójwymiarowych obiektów fizycznych bezpośrednio z modeli komputerowych wykonanych przy użyciu oprogramowania CAD 3D. Proces ten określany jest również jako kształtowanie przyrostowe – metody addytywne. Szybkie prototypowanie jest technologią stosowaną od niedawna i ulega bardzo dynamicznemu rozwojowi. W porównaniu z konwencjonalnymi metodami produkcji zastosowanie metod RP umożliwia znaczne skrócenie procesu przygotowania i wykonywania modelu, prototypu czy finalnego wyrobu oraz jego łatwiejsze modyfikowanie we wczesnych stadiach rozwoju. Modele o bardzo złożonym kształcie zewnętrznym i wewnętrznym mogą być wykonywane w bardzo krótkim czasie, zwykle w ciągu kilku godzin, a największym polem ich zastosowań jest analiza rozwiązań konstrukcyjnych, montażu oraz badania funkcjonalne. Zastosowania te wymagają od prototypowych modeli dużej dokładności odwzorowania cech geometrycznych, implikujących z kolei właściwości użytkowe prototypowych części. Obecnie wiele metod RP zostało skomercjalizowanych, a urządzenia RP są produkowane seryjnie i stosowane w przemyśle. Z uwagi na uniwersalność zastosowań budowanych modeli w technice, najczęściej korzysta się z następujących metod Rapid Prototyping: stereolitografii (SLA), Solid GroundCuring (SGC), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) oraz Laminated Object Manufacturing (LOM) [1–5].

2. Porównawcze badania wytrzymałościowe wybranych elementów z wypełnieniem 100%

W ramach pracy zrealizowano badania dla trzech wybranych elementów konstrukcyjnych, takich jak: koło zębate, wkładka sprzęgła Oldhama oraz uchwyt mocujący pokrywę silnika. Na wstępie dokonano wyboru elementów do badań, a następnie, po ich wymiarowaniu i wykonaniu modelu 3D, wytworzono je techniką druku 3D metodą FDM. Do wykonania koła zębatego oraz wkładki sprzęgła zastosowano materiały: PLA (polilaktyd) oraz PET (politereftalan etylenu), natomiast do wykonania uchwyty użyto elastomeru TPU (termoplastyczny elastomer poliuretanowy).

2.1. Wytworzenie i badania koła zębatego

Modele wirtualne stworzone na podstawie oryginalnego koła zębatego (rys. 1) wydrukowano na drukarce Hbot 3D, będącej na wyposażeniu Laboratorium zaawansowanej grafiki komputerowej i projektowania CAD Uczelni Jana Wyżykowskiego. Jednym z głównych celów badań była analiza wpływu zastosowanego materiału, dlatego modele koła zębatego wydrukowano z materiałów PLA i PET. Przyjęte parametry druku przedstawiono w tabeli.



Rys. 1. Oryginalne koło zębate (z lewej) oraz model wirtualny (z prawej)

Źródło: oprac. własne.

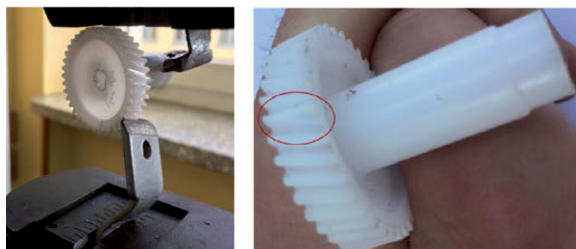
Tab. 1. Parametry druku 3D przyjęte przy wytwarzaniu koła zębatego z materiałów PLA i PET

Parametry druku	PLA	PET
Temperatura dyszy [°C]	210	250
Temperatura stołu [°C]	60	75
Prędkość druku [mm/s]	20	20
Wypełnienie [%]	100	100
Średnica filamentu [mm]	1,75	1,75

Źródło: oprac. własne.

W sumie do badań wykorzystano 11 próbek koła zębatego: pięć z PLA, pięć PET-u i jeden oryginalny. Ponadto wydrukowane koła poddano obróbce mechanicznej, polegającej na zdjęciu wypyłek i zeszlifowaniu większych nierówności. Próbki przygotowano w taki sposób, aby uzyskać zbliżone wymiary geometryczne i kształt koła zębatego oryginalnego.

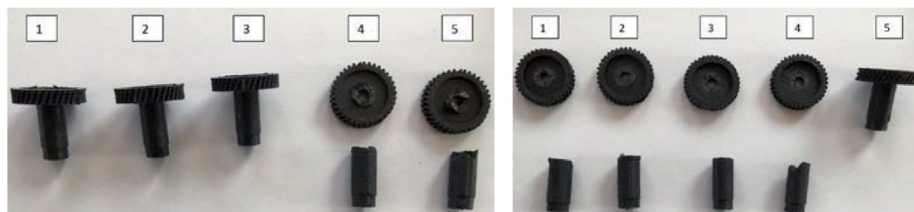
Podczas badań wytrzymałościowych próbki montowano w specjalnych uchwytach, które uniemożliwiały wysuwanie się koła w czasie obciążania (rys. 2). Następnie próbki mocowano w maszynie wytrzymałościowej TIME GROUP INC WDW 100E, będącej na wyposażeniu Laboratorium wytrzymałości materiałów Uczelni Jana Wyżykowskiego. Podczas testu w każdym kole obciążano jeden ząb w kierunku składowej obwodowej wzdłuż linii przyporu ze stałą prędkością 0,2 m/s, aż do momentu jego uszkodzenia.



Rys. 2. Sposób zamocowania próbki w uchwytach (z lewej) oraz przykłady uszkodzenia zęba (z prawej)

Źródło: oprac. własne.

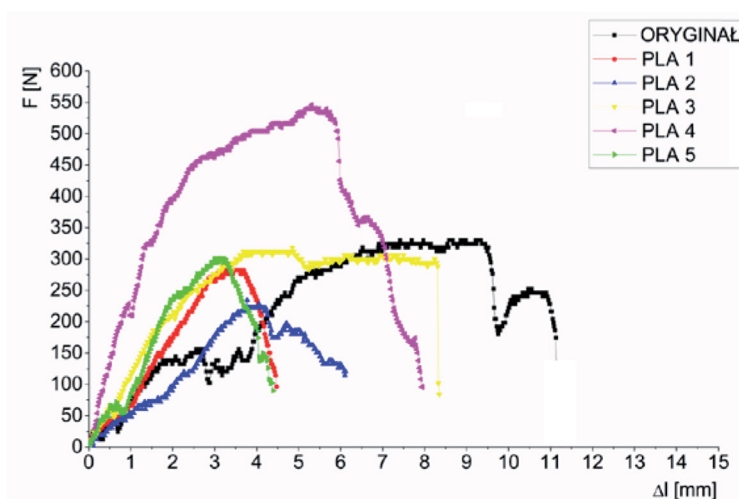
Wyniki uszkodzeń poszczególnych próbek koła zębatego wykonanych z materiału PLA i PET przedstawiono na rysunku 3. W dwóch próbkach z PLA oprócz uszkodzenia zęba wystąpiło również uszkodzenie wałka w miejscu połączenia z kołem zębatym. Natomiast w kołach zębatych wykonanych z PET-u takie uszkodzenie wystąpiło w czterech próbkach.



Rys. 3. Modele koła zębatego po badaniach: a) PLA (z lewej), b) PET (z prawej)

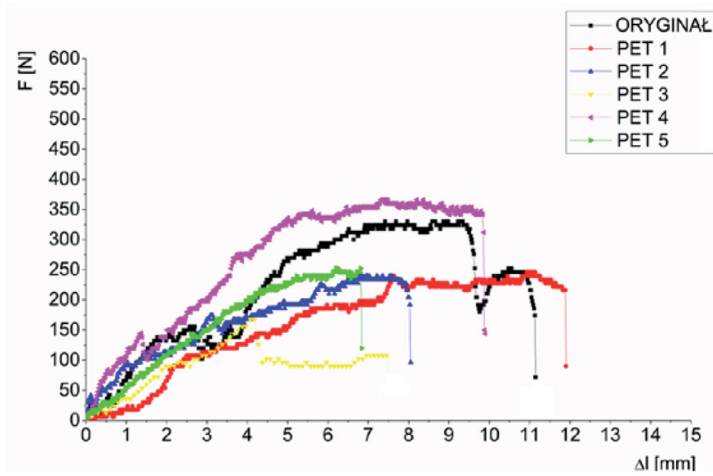
Źródło: oprac. własne.

Na podstawie otrzymanych wartości przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej i odpowiadających im wartościom siły wyznaczono charakterystyki siły w funkcji przemieszczenia (rys. 4 i 5).



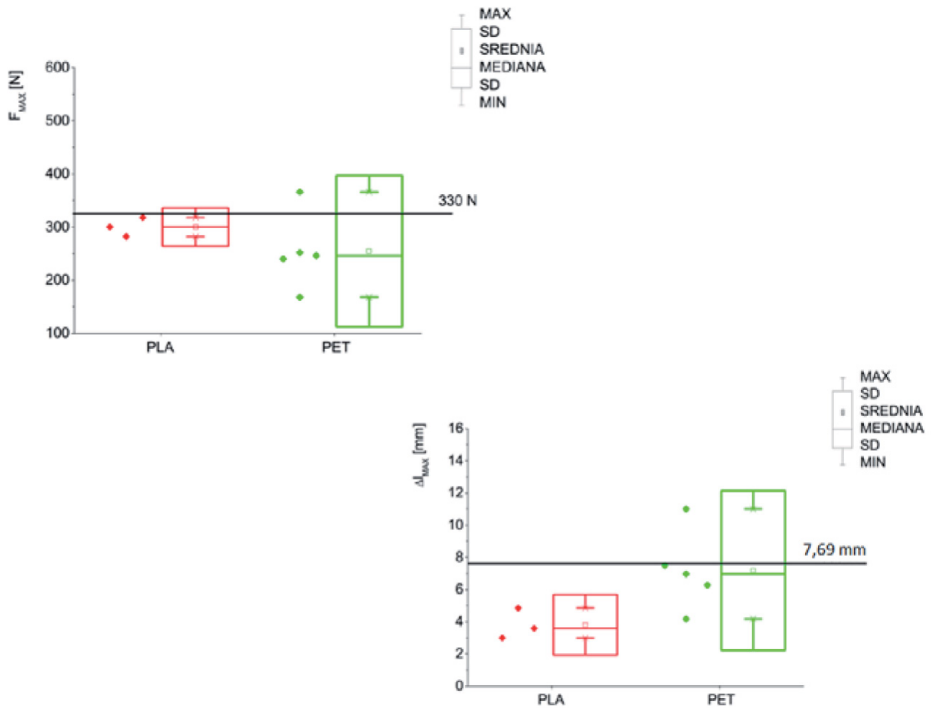
Rys. 4. Przebieg wartości siły w funkcji przemieszczenia dla próbek wykonanych z PLA względem oryginału

Źródło: oprac. własne.



Rys. 5. Przebieg wartości siły w funkcji przemieszczenia dla próbek wykonanych z PET-u względem oryginału

Źródło: oprac. własne.



Rys. 6. Porównanie wartości siły niszczącej (F_{max}) oraz wartości przemieszczenia (Δl_{max}) dla próbek wykonanych z PLA i PET-u w odniesieniu do wartości uzyskanych dla oryginalnego koła zębatego (linia czarna)

Źródło: oprac. własne.

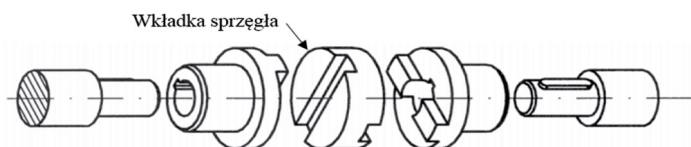
Następnie na podstawie wykresów określono wybrane parametry, tj. maksymalną siłę niszczącą (F_{max}) oraz maksymalne przemieszczenie przy zniszczeniu (Δl_{max}). Porównanie zestawiono na rys. 6.

Przebieg uzyskanych wartości wykazał różnice pomiędzy kolejnymi próbkami, jak i pomiędzy badanymi materiałami a próbką oryginalną. W przypadku próbek wykonanych z materiału PLA uzyskano mniejszą powtarzalność wyników niż w przypadku próbek wykonanych z PET-u. Ze względu na ten fakt odrzucono dwie skrajne wartości, a zatem średnia wartość siły niszczącej dla próbek z PLA wyniosła 300 ± 18 N i była większa w porównaniu do wartości dla próbek wykonanych z PET-u, która wyniosła 254 ± 71 N. Dla próbki oryginalnej wartość maksymalnej siły niszczącej wyniosła 330 N.

Jednocześnie przemieszczenie przy zniszczeniu przyjmuje wartości wyższe w próbkach z PET-u w porównaniu do tych wykonanych z PLA. W próbkach z PET-u wartość Δl_{max} wyniosła $7,18 \pm 2,48$ mm, natomiast dla próbek wykonanych z PLA: $3,81 \pm 0,94$ mm. W przypadku próbki oryginalnej wartość maksymalnego przemieszczenia niszczącego wyniosła 7,69 mm.

2.2. Wytworzenie i badania wkładki sprzęgła

Sprzęgło Oldhama składa się z dwóch pierścieni połączonych z wałem czynnym i biernym oraz umieszczonej między nimi wymiennej wkładki, z reguły wykonanej z innego materiału (rys. 7). Zadaniem wkładki jest przenoszenie momentu obrotowego pomiędzy elementem czynnym a biernym. Znajdujące się w elementach wpusty łączą się z rowkami znajdującymi się we wkładce pod kątem 90° . Budowa sprzęgła pozwala na kompensowanie niewielkich przesunięć promieniowych i osiowych osi wałów.



Rys. 7. Budowa sprzęgła Oldhama [6]

Źródło: oprac. własne.

Badania mechaniczne prowadzono dla wkładki sprzęgła o średnicy 25 mm. Na podstawie oryginału wykonano model wkładki w programie Autodesk Inventor (rys. 8).



Rys. 8. Sprzęgło: oryginał (z lewej) oraz model (z prawej)

Źródło: oprac. własne.

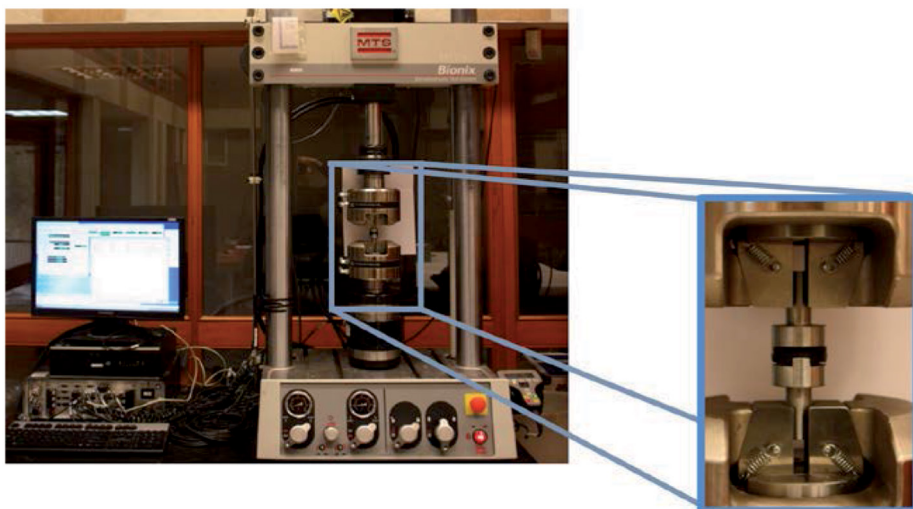
Przygotowane modele wirtualne wydrukowano za pomocą drukarki Hbot 3D z materiałów: PLA (cztery modele) i PET (cztery modele). Poszczególne próbki przygotowano w taki sposób, aby uzyskać zbliżone wymiary geometryczne i kształt sprzęgła. Przyjęte parametry druku przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry druku 3D przyjęte dla wkładki sprzęgła

Parametry druku	PLA	PET
Temperatura dyszy [°C]	210	250
Temperatura stołu [°C]	60	75
Prędkość druku [mm/s]	20	20
Wypełnienie [%]	100	100
Średnica filamentu [mm]	1,75	1,75

Źródło: oprac. własne.

Następnie wykonane wkładki wraz z oryginalną poddano badaniom przy użyciu maszyny wytrzymałościowej w próbie skręcania. Próbki montowano do specjalnie dopasowanych uchwytów, które uniemożliwiały wysuwanie się wkładki w czasie badań (rys. 9).



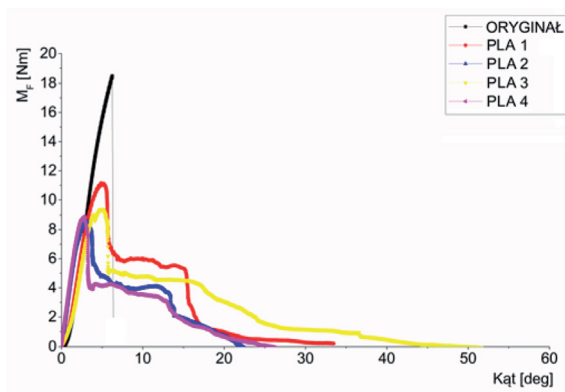
Rys. 9. Schemat sposobu zamocowania próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

Źródło: oprac. własne.

Następnie próbki mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej MTS 4 Bionix. Każdą próbkę poddano testowi na skręcanie ze stałą prędkością 0,5 mm/s, aż do momentu ich uszkodzenia.

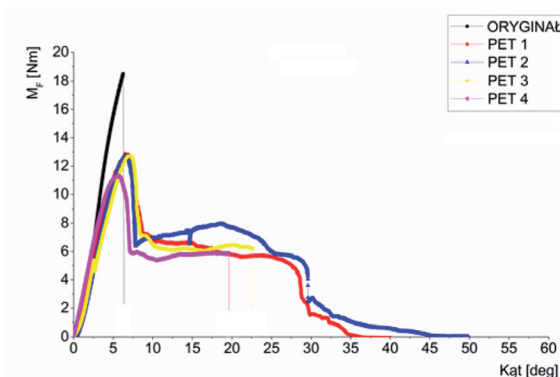
Na podstawie otrzymanych wartości wyznaczono charakterystyki wartości momentu siły w funkcji przemieszczenia kąowego, na podstawie których określono wybrane parametry: maksymalny moment siły niszczącej (M_F) oraz przemieszczenie kąowe przy zniszczeniu.

Charakterystyki momentu siły w funkcji przemieszczenia uzyskane dla próbki oryginalnej wkładki sprzęgła oraz dla ośmiu próbek wkładki wykonanej z materiałów PLA i PET przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Przebieg wartości momentu siły w funkcji przemieszczenia kąowego dla próbek wykonanych z PLA w odniesieniu do wartości uzyskanych dla wkładki oryginalnej

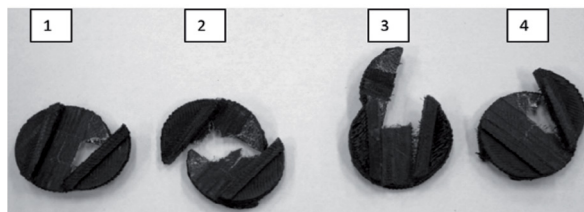
Źródło: oprac. własne.



Rys. 11. Przebieg wartości momentu siły w funkcji przemieszczenia kąowego dla próbek wykonanych z PET-u w odniesieniu do wartości uzyskanych dla wkładki oryginalnej

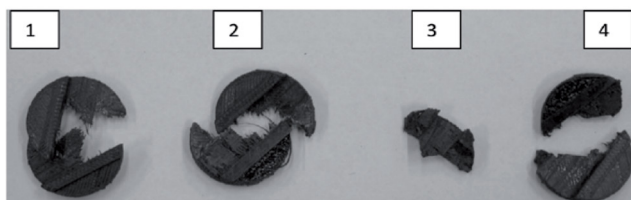
Źródło: oprac. własne.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono testowane wkładki po badaniach. Rodzaj zniszczenia wskazuje na charakter obciążenia próbek oraz sposób rozwarstwienia na powierzchniach drukowania.



Rys. 12. Modele wkładki sprężą wykonane z PLA po badaniach

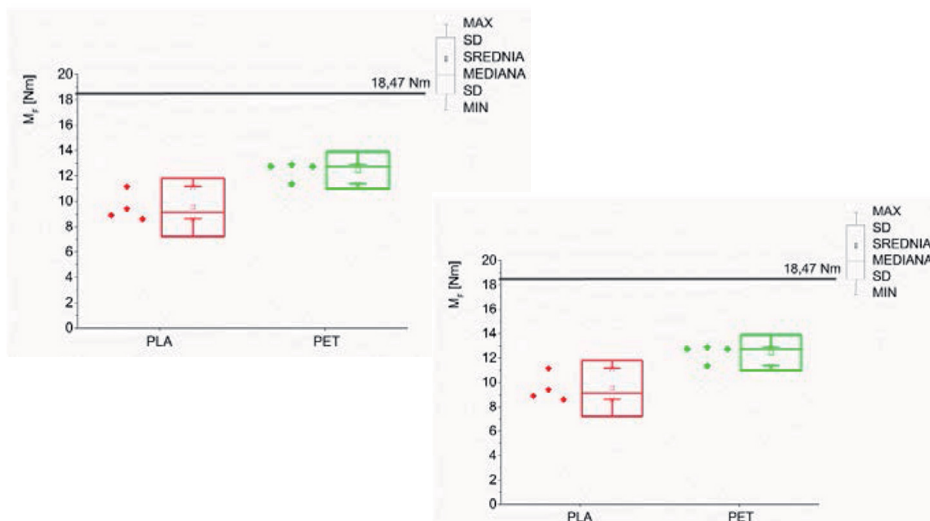
Źródło: oprac. własne.



Rys. 13. Modele wkładki sprężą wykonane z PLA po badaniach

Źródło: oprac. własne.

Uzyskane wartości wykazały znaczne różnice pomiędzy badanymi materiałami a próbką oryginalną. W przypadku próbek wykonanych z materiałów PLA i PET zaobserwowano pewną powtarzalność przebiegu charakterystyk uzyskanych wartości (rys. 10 i 11).



Rys. 14. Porównanie wartości momentu siły oraz przemieszczenia kątownego dla próbek wykonanych z PLA i PET-u w odniesieniu do wartości uzyskanej dla oryginalnej wkładki sprężą (linia czarna)

Źródło: oprac. własne.

W przypadku próbki oryginalnej wartość maksymalnego momentu siły przy zniszczeniu wyniosła 18,47 Nm. Wartość ta jest znacznie większa w porównaniu do elementów wykonanych z PLA ($9,51 \pm 1,14$ Nm) i PET-u ($12,44 \pm 0,73$ Nm).

Jednocześnie przemieszczenie kątowe przy zniszczeniu przyjmuje wartości wyższe w próbkach z PET-u ($6,42 \pm 0,63^\circ$) w porównaniu z próbkami z materiału PLA ($3,97 \pm 1,19^\circ$). Dla próbki oryginalnej wartość ta wyniosła $6,25^\circ$ (rys. 14).

2.3. Wytworzenie i badania uchwytu mocującego

Obiektem badań był uchwyt mocujący pokrywy silnika traktora URSUS C330, wykonany z elastomeru, o wymiarach gabarytowych: 118,5 x 45 mm. Na podstawie oryginału wykonano model wirtualny opracowany w programie Autodesk Inventur (rys. 15).



Rys. 15. Uchwyt mocujący: oryginał (z lewej), model wirtualny (z prawej)

Źródło: oprac. własne.

Przygotowane modele wydrukowano za pomocą drukarki 3D BQ Equipment. Do wykonania elementów zastosowano termoplastyczny elastomer poliuretanowy (TPU). Przyjęte parametry druku przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Parametry druku 3D przyjęte dla materiału TPU

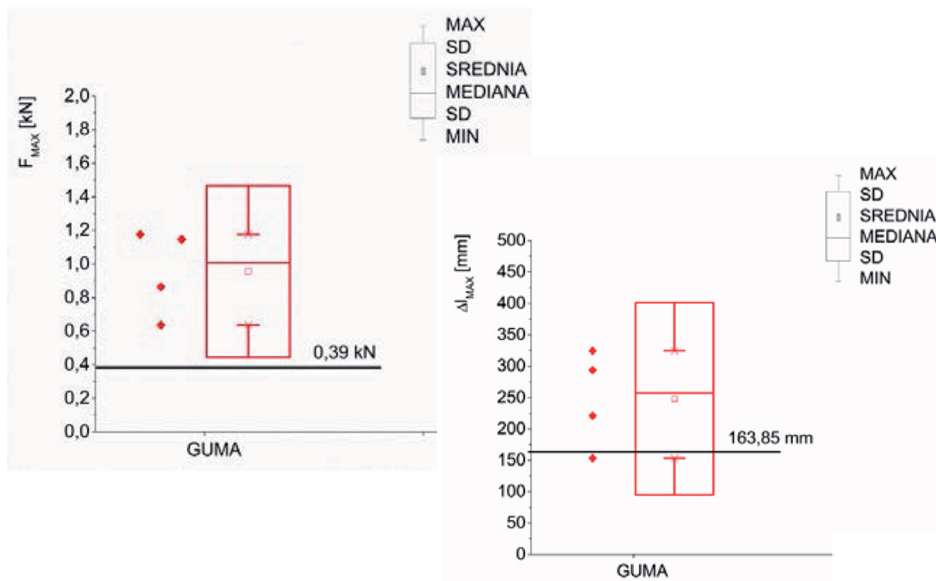
Parametry druku	TPU
Temperatura dyszy [$^\circ\text{C}$]	215
Temperatura stołu [$^\circ\text{C}$]	70
Prędkość druku [mm/s]	20
Wypełnienie [%]	100
Średnica filamentu [mm]	1,75

Źródło: oprac. własne.

W sumie przebadano pięć próbek uchwytu mocującego, w tym jeden oryginalny i cztery wydrukowane.

Próbki montowano w specjalnych uchwytach maszyny wytrzymałościowej, które uniemożliwiały wysuwanie się ich w czasie badań. Każdą próbkę poddano jednoosiowemu rozciąganiu ze stałą prędkością 0,5 m/s, aż do momentu ich zerwania.

Analizę zmierzonych wartości maksymalnych sił oraz przemieszczeń dla poszczególnych próbek przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Porównanie wartości siły (F_{max}) oraz wartości przemieszczenia (Δl_{max}) dla próbek wykonanych z TPU w odniesieniu do wartości uzyskanych dla elementu oryginalnego (linia czarna)

Źródło: oprac. własne.

Podczas badań wykazano, że średnia wartość siły przy zniszczeniu dla próbek z TPU wyniosła 960 ± 260 N. Dla porównania, próbka oryginalna uległa zniszczeniu przy wartości 390 N. Płynie z tego wniosek, że próbki wykonane technologią FDM są ponad dwukrotnie „mocniejsze” od oryginału.

Jednocześnie średnie przemieszczenie przy zniszczeniu ($248 \pm 76,6$) przyjmuje również wartości większe w próbkach wydrukowanych w porównaniu do próbki oryginalnej (163,85 mm), co dowodzi, że próbki wydrukowane są nie tylko bardziej wytrzymałe od oryginału, ale również cechują się większą elastycznością.

3. Porównawcze badania wytrzymałościowe wybranych elementów z różną strukturą i wypełnieniem

W drugiej części pracy zamodelowano, wytworzono i przeprowadzono badania wytrzymałościowe dla dwóch elementów (wieszaka tłumika oraz wodzika lewarka skrzyni biegów). Każdy element wykonano w liczbie trzech sztuk z zastosowaniem różnych materiałów oraz z różnymi wypełnieniami i strukturami:

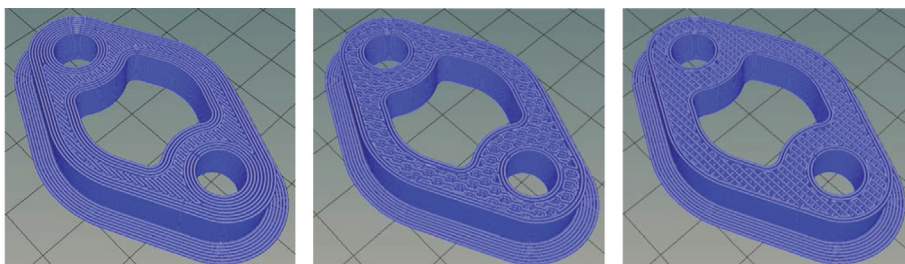
- wieszak tłumika (elastomer TPU) wykonano z wypełnieniem 100% ze strukturą liniową, 50% ze strukturą plastra miodu (ang. *honeycomb*) oraz 50% ze strukturą kratową (ang. *rectilinear*),
- wodzik lewarka skrzyni biegów (PET) wykonano z wypełnieniem 100% ze strukturą liniową, 50% ze strukturą plastra miodu (ang. *honeycomb*) oraz 50% ze strukturą kratową (ang. *rectilinear*).

Na rysunku 19 przedstawiono modele wirtualne zaprojektowanych elementów, natomiast na rysunku 20 przykładowe zdjęcia badanych struktur dla wieszaka tłumika podczas przygotowywania go do wydruku.



Rys. 19. Widok modeli badanych elementów. Wieszak (z lewej) oraz wodzik (z prawej)

Źródło: oprac. własne.



Rys. 20. Badane struktury (od lewej): struktura liniowa z wypełnieniem 100%, struktura *honeycomb* z wypełnieniem 50% oraz struktura *rectilinear* z wypełnieniem 50%

Źródło: oprac. własne.

3.1. Badania wieszaka tłumika

Wydrukowane modele wieszaka tłumika końcowego umieszczono osiowo w uchwytach maszyny wytrzymałościowej oraz zbadano ich wytrzymałość na rozciąganie w jednakowych warunkach (prędkość rozciągania 20 m/s, temperatura podczas testów 18°C). Na rysunku 21 przedstawiono przykładowy wieszak podczas badań oraz po badaniach.

Badania przeprowadzono na dziewięciu próbkach, po trzy dla każdego rodzaju wypełnienia. Wyniki badań zestawiono w tabeli 4.



Rys. 21. Widok próbki (wieszaka tłumika) podczas badania (z lewej) oraz po badaniu (z prawej)

Źródło: oprac. własne.

Tab. 4. Wyniki badań dla wieszaka tłumika

Nr próbki	Materiał: elastomer TPU			
	Prędkość rozciągania: 20m/s			
	Wypełnienie [%]	Struktura	Siła przy zerwaniu [N]	Przemieszczenie przy zerwaniu [mm]
1	100	liniowa	1722	185,8
2	100	liniowa	1780	194,6
3	100	liniowa	1740	186,4
4	50	plaster miodu	990	94,9
5	50	plaster miodu	1050	86,2
6	50	plaster miodu	1038	98,6
7	50	kratka	984	126,0
8	50	kratka	942	188,2
9	50	kratka	1026	159,7

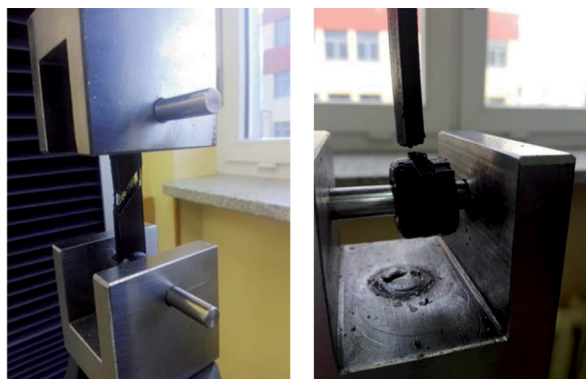
Źródło: oprac. własne.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że średnia wartość siły przy zniszczeniu dla próbek „pełnych” wyniosła 1747 ± 30 N, dla próbek ze strukturą „plastra miodu” 1026 ± 32 N, a dla próbek ze „strukturą kratki” 984 ± 42 N.

Jednocześnie średnie przemieszczenie przy zniszczeniu dla próbek „pełnych” wyniosło 189 ± 5 mm, dla próbek ze strukturą „plastra miodu” 93 ± 6 N, natomiast dla próbek ze „strukturą kratki” 158 ± 31 N.

3.2. Badania wozzika lewarka skrzyni biegów

Wydrukowane modele wozzika lewarka skrzyni biegów umieszczono osiowo w uchwytach maszyny wytrzymałościowej oraz zbadano ich wytrzymałość na rozciąganie w jednakowych warunkach (prędkość rozciągania 20 m/s, temperatura podczas testów 18°C). Na rysunku 22 przedstawiono przykładowe wozziki podczas badań.



Rys. 20. Widok próbek (wozzików lewarka skrzyni biegów) podczas badań
Źródło: oprac. własne.

Tab. 5. Wyniki badań dla wozzika lewarka skrzyni biegów

Nr próbki	Materiał: PET			
	Prędkość rozciągania: 20m/s			
	Wypełnienie [%]	Struktura	Siła przy zerwaniu [N]	Przemieszczenie przy zerwaniu [mm]
1	100	liniowa	3012	4,2
2	100	liniowa	2988	4,5
3	100	liniowa	2856	4,2
4	50	plaster miodu	1734	3,5
5	50	plaster miodu	1626	3,1
6	50	plaster miodu	1680	3,4
7	50	kratka	1426	5,2
8	50	kratka	1596	5,0
9	50	kratka	1542	4,2

Źródło: oprac. własne.

Badania przeprowadzono na dziewięciu próbkach, po trzy dla każdego rodzaju wypełnienia. Wyniki badań zestawiono w tabeli 5.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że średnia wartość siły przy zniszczeniu dla próbek „pełnych” wyniosła 2952 ± 84 N, dla próbek ze strukturą „plastra miodu” 1680 ± 54 N, natomiast dla próbek ze „strukturą kratki” 1521 ± 87 N.

Jednocześnie średnie przemieszczenie przy zniszczeniu dla próbek „pełnych” wyniosło $4,3 \pm 0,2$ mm, dla próbek ze strukturą „plastra miodu” $3,3 \pm 0,2$ N, zaś dla próbek ze „strukturą kratki” $4,8 \pm 0,5$ N.

4. Podsumowanie i wnioski

Wnioski dotyczące wytwarzania

Zastosowana w pracy metoda FDM należy do szybkich metod wytwarzania, ale należy zwrócić uwagę, że wytwarzanie pojedynczych elementów na potrzeby niniejszej pracy trwało od 0,5 do 1 godziny. Dla potrzeb wydruku konieczne było również zamodelowanie i wykonanie podpór, aby wydrukować warstwy znajdujące się w innej płaszczyźnie niż płaszczyzna stołu (tzw. sufity). Jakość takiego wydruku nie jest też idealna, widoczne były spojenia poszczególnych warstw, a elementy trzeba było poddać dodatkowej kosmetycznej obróbce mechanicznej. Należy pamiętać, że jakość jest ściśle związana z prędkością wydruku.

Kolejnym elementem, na który należy zwrócić szczególną uwagę, są parametry wydruku. Główne z nich to prędkość wydruku oraz temperatura głowicy i stołu. Podczas drukowania elementów korzystano z ustawień programowych, jednak okazało się, że jakość wydruku jest niezadowalająca. Zaobserwowano odklejanie się warstw i modeli od stołu, zapychanie się głowicy i w rezultacie nieukończenie wydruku. Problem rozwiązało manualne skonfigurowanie ustawień w opcjach zaawansowanych oprogramowania Cura i Silc3r.

Wnioski z badań wytrzymałościowych wybranych elementów z wypełnieniem 100%

Badania wykonane dla kół zębatach prowadzą do wniosków, iż materiał PET jest zbyt kruchy do ich wytwarzania. Dodatkowo jakość wykonanych elementów znacząco odbiegała od oryginału, co mogło wpłynąć na właściwości mechaniczne (występowanie karbu) oraz uzyskane wyniki. Próbkę wykonaną z materiału PLA były lepsze pod względem jakości. Również średnia wartość siły niszczącej dla wykonanych elementów z PLA (300 N) była porównywalna z oryginałem (330 N).

Badania wkładki sprzęgła Oldhama, w odróżnieniu od koła zębatego, wykazały większą wytrzymałość w przypadku materiału PET w porównaniu do PLA. Wartość momentu siły przy zniszczeniu dla próbek PLA wyniosła $9,51 \pm 1,14$ Nm, natomiast dla próbek z PET-u $12,44 \pm 0,73$ Nm. Maksymalny moment siły oryginalnego elementu wyniósł 18,47 Nm i jest to wartość większa niż wskazywana przez producenta (13 Nm). W związku z tym można stwierdzić, iż wkładki z materiału PET wykonane metodą druku 3D można stosować zamiennie z oryginałem.

Badany uchwyt mocujący podobnie jak oryginał wykonany został z elastomeru, jednak przyjęty sposób druku mógł znacząco wpłynąć na zwiększenie wytrzymałości mechanicznej drukowanych elementów, ze względu na liniowe ułożenie filamentu wzdłuż kierunku rozciągania. Do produkcji oryginalnego elementu wykorzystano metodę wtrysku, co spowodowało, że materiał jest możliwie jednorodny w całej objętości struktury.

Średnia wartość maksymalnej siły przy zniszczeniu dla wydrukowanych elementów z TPU wyniosła 960 ± 26 kN i była prawie 2,5 raza większa od wartości uzyskanej dla oryginału (390 kN).

Wnioski z badań wytrzymałościowych wybranych elementów z różną strukturą i wypełnieniem

Wyniki badań wskazują, że największą wytrzymałość na rozciąganie posiadają modele wykonane z wypełnieniem 100%.

Przy badaniu wieszaka z TPU dla wypełnień 50% wyższe parametry wytrzymałościowe (o 5%) uzyskano dla próbek ze strukturą „plastra miodu” w porównaniu do struktury „kratki”. Średnie przemieszczenie przy zerwaniu było natomiast o 30% wyższe dla struktury „kratki”, co dowodzi, że struktura ta jest bardziej elastyczna. Porównując wypełnienie 50% „plastra miodu” do wypełnienia 100% uzyskano wytrzymałość niższą o 40% przy redukcji masy o połowę.

Różnice w wytrzymałości pomiędzy strukturami z wypełnieniem 50% dla wodzika wykonanego z PET-u

są również niewielkie. Wyższą wytrzymałość (o 10%) uzyskano dla próbek ze strukturą „plastra miodu” w porównaniu do „kratki”. Średnie przemieszczenie przy zerwaniu było natomiast o 30% wyższe dla struktury „kratki”. Porównując wypełnienie 50% „plastra miodu” do wypełnienia 100%, uzyskano wytrzymałość niższą o 45% przy redukcji masy o połowę.

Elementy wykonane metodą RP mogą zastępować części maszyn lub urządzeń w celu przeprowadzenia weryfikacji budowy modelu czy w przypadku, gdy dane elementy są nieosiągalne, np. przy odtwarzaniu zabytkowych samochodów.

Wybór odpowiedniej techniki druku uzależniony jest od stawianych wymagań. Drukowane elementy mogą być zamiennikami części wykonanych inną technologią, jednak przy ich produkcji należy dobrać odpowiedni materiał oraz parametry wydruku.

Przykładem zastosowania wydrukowanego modelu 3D i zastąpienia nim oryginalnego elementu jest wieszak tłumika końcowego, który został zamontowany w pojeździe ok. 12 miesięcy temu i do dnia dzisiejszego spełnia swoją funkcję.

Literatura

- [1] Miecielić M., *Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping*, „Przegląd Mechaniczny” 2010, nr 2.
- [2] Mager A., Moryson G., Cellary A., Marciniak L., *Zastosowanie technik Rapid Prototyping do wytwarzania wyrobów metalowych*, „Postępy Nauki i Techniki” 2011, nr 8.
- [3] Duc-Truong Ph. i Dimov S., *Rapid Prototyping: a time compression tool. Technology and innovation. Manufacturing engineering centre*, Cardiff University. <https://www.ingenia.org.uk/getattachment/Ingenia/Issue17/Rapidprototyping/Pham.pdf>.
- [4] Aman K., Suman K., Parveen K., *Rapid Prototyping Technologies and Applications in Modern Engineering – A Review*, „International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science” 2015, Vol. 4.
- [5] Kordowska M., Musiał W., Stefanowicz K., *Wykorzystanie systemów Rapid Prototyping do modelowania części samochodowych*, „Autobusy” 2014, nr 6.
- [6] Felis J., *Zapis i podstawy konstrukcji mechanicznych*. <http://home.agh.edu.pl/~kmtmipa/dydaktyka/automatyka/1/elkonstrukcyjne.pdf>.