

Igor DZIĘCIOŁOWSKI, Paweł MAĆKOWIAK

WERYFIKACJA WYBRANYCH KONSTRUKCJI RAMION DRONA WYTWARZANYCH W TECHNOLOGII FDM

Streszczenie: W pracy przedstawiono badania różnych typów konstrukcji ramienia drona wytworzonego w technologii FDM. Model ramienia jest wzorowany na oryginalnym elemencie drona DJI F550. Założono, że ostateczna konstrukcja powinna mieć taką samą lub zredukowaną masę przy jednoczesnym zachowaniu lub zwiększeniu sztywności ramion podczas eksploatacji. Przedstawiono i porównano wyniki ugięcia, sztywności oraz mas poszczególnych ramion zależnie od wypełnienia i konstrukcji, z zachowaniem jednakowych wymiarów zewnętrznych względem oryginału. W pracy wykazano możliwości wykorzystania technologii FDM w wytwarzaniu elementów docelowych jako rozwiązania alternatywnego względem innych technologii.

Słowa kluczowe: FDM (*fused deposition modeling*), szybkie prototypowanie, badania elementów konstrukcyjnych, badanie połączeń

1. WPROWADZENIE

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój urządzeń do szybkiego prototypowania. Technologia przyrostowa FDM (*fused deposition modeling*), która polega na nakładaniu kolejnych warstw tworzywa wytłaczanego przez głowicę, zyskała na znaczeniu m.in. w medycynie, prototypowaniu oraz wytwarzaniu docelowych przedmiotów. Przykładem są ramiona drona budowanego na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy. Zakłada się, że wytwarzane elementy powinny spełniać założenia stawiane zastępowanym elementom lub nawet cechować się lepszymi właściwościami. Proces udoskonalania elementu może wynikać np. z chęci zwiększenia sztywności elementu, obniżenia masy lub innych własności mechanicznych i fizycznych obiektu [2, 3].

Projektowane ramię musi spełnić kryteria wynikające z wytrzymałości, maksymalnego ugięcia i podatności na drgania. Ugięcie powstałe w wyniku działania obciążenia dla ramienia wytworzonego w technologii FDM powinno być równe lub mniejsze niż to powstające w produkcie rynkowym. Odształcenie ramienia, powstałe w wyniku siły ciągu wirnika, nie może być na tyle duże, aby powodować pracę silnika pod zbyt dużym kątem względem płaszczyzny poziomej lub powodować sytuację, w której sąsiednie śmigła zderzą się ze sobą (rys. 1).

Igor DZIĘCIOŁOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: igodzi002@utp.edu.pl
mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl



Rys. 1. Czarne okręgi – normalny zakres pracy łopat, czerwone okręgi – zakres pracy łopat przy zbyt dużym odkształceniu ramienia, powodującym uszkodzenie [8]
Fig. 1. Black circles – normal working range blades, red circles – blades working range with too much arm deformation, causing damage [8]

Trudność w oszacowania kryteriów konstrukcyjnych powoduje, że jedną z metod projektowania nowego ramienia może być porównanie jego właściwości z właściwościami ramion, które są powszechnie stosowane. Istnieje zatem konieczność przeprowadzenia doświadczalnego porównania konstrukcji.

W literaturze wymieniane są badania próbek wytwarzanych w technologii FDM oraz elementów docelowych. Garg oraz Bhattacharya badali na rozciąganie próbki w kształcie wiosełek, których warstwy ułożone były pod kątami: 0° , 90° , 0° i 90° naprzemiennie, 30° oraz 60° . Najbardziej odporne okazały się próbki, których warstwy ułożono pod kątem 30° lub 60° , z kolei próbki, których warstwy ułożono pod kątem 0° ulegały uszkodzeniu w wyniku kruchego pęknięcia, a próbki z warstwami ułożonymi pod kątem 90° – rozłączeniu sąsiednich warstw lub delaminacji [4, 5].

Domingo-Espin i in. utworzyli element na kształt kłamki za pomocą technologii FDM. Badali zależność ułożenia wewnętrznych warstw i zewnętrznych ścianek od podatności na zginanie, obciążając koniec kłamki. Badania wykazały, że najmniej podatnym elementem jest ten, w którym występują jedynie ścianki: dolna oraz górna, ułożone prostopadłe do ściany kłamki. Porównywalnymi właściwościami charakteryzuje się element o ściankach dolnej i górnej ułożonych równoległe do ściany kłamki. Większą podatność na zginanie zaobserwowano dla kłamki, która miała tylko ścianki boczne [1].

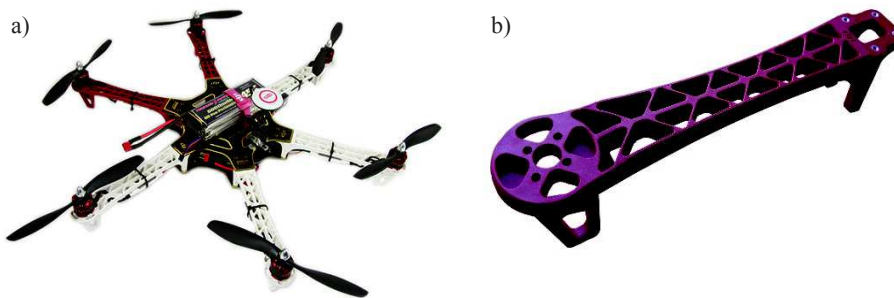
Badania podjęto w celu weryfikacji różnych możliwości kształtowania ramienia drona w technologii FDM i porównania ich właściwości z rynkowym produktem wytwarzanym w technologii wtrysku. Kryteria porównania stanowiły: masa, ugięcie w wyniku pracy śmigła, zdolność do przeniesienia określonej wartości obciążenia, a także koszty produkcji. Wymiary zewnętrzne porównywanych konstrukcji były jednakowe.

2. OBIEKT I METODA BADAŃ

2.1. Obiekty badań

2.1.1. Obiekt wytwarzany w technologii formowania wtryskowego

Dron, którego użyto jako modelu bazowego, to DJI F550 (rys. 2a). Sklasyfikowano go jako mały bezzałogowy statek powietrzny do cywilnego i komercyjnego użytku o zasięgu 2 km oraz maksymalnej wysokości lotu 600 m. Ma sześć ramion wykonanych z PA66+GF30 – tworzywa będącego produktem polikondensacji kwasu adypinowego i heksametylodiaminy, wzmocnionego włóknem szklanym, którego zawartość wynosi 30%. Ramiona przykręcone są do płytek drukowanych (PCB), zastępujących okablowanie, co odciąża model.



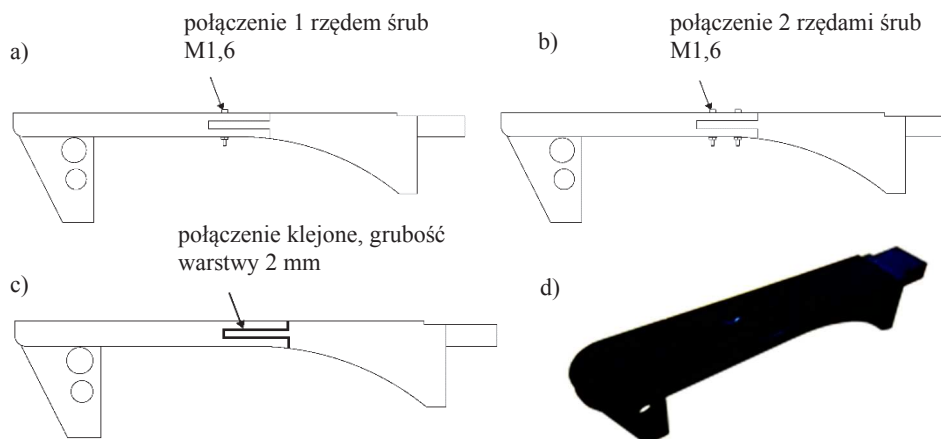
Rys. 2. Dron DJI F550 użyty jako wzorzec (a) [9], badane ramię (b) [7]
Fig. 2. Drone DJI F550 used as a base object (a) [9], tested arm (b) [7]

Ramię (rys. 2b) będące elementem rynkowym jest wytworzone za pomocą formowania wtryskowego. Odciążenie konstrukcji ramienia uzyskano poprzez zastosowanie otworów tworzących kratownicę oraz przewężenie w połowie długości ramienia. Na końcach ramienia występują otwory, w które wtopione są nakrętki do mocowania silnika oraz montażu ramienia do płyt PCB. Maksymalny moment gnący działający na ramię może występować w sytuacji lądowania, gdy podparcie zapewni pojedyncza podpora, lub gdy dron zostanie podniesiony przez osobę trzymającą go tylko za jedno ramię. W takich przypadkach obciążenie działające w środku ciężkości konstrukcji drona wynosi do 5 kg, co stanowi maksymalną masę drona po rozbudowaniu. Powstający w tych sytuacjach moment gnący może osiągać wartość 1,45 Nm.

2.1.2. Obiekty wytwarzane w technologii FDM

Ramiona wytworzone w technologii przyrostowej różniły się budową – były to konstrukcje jednoczęściowe oraz dwuczęściowe. Przebadano łącznie sześć różniących się między sobą obiektów. Konstrukcje jednoczęściowe różniły się ilością wypełnienia elementu (40%, 33%, 26%), przez co osiągnęto redukcję masy ramienia. Konstrukcje dwuczęściowe miały równą wartość wypełnie-

nia – 60%, różniły się natomiast techniką łączenia elementów: klejenie, skręcanie jednym rzędem śrub, skręcanie dwoma rzędami śrub (rys. 3, 4).

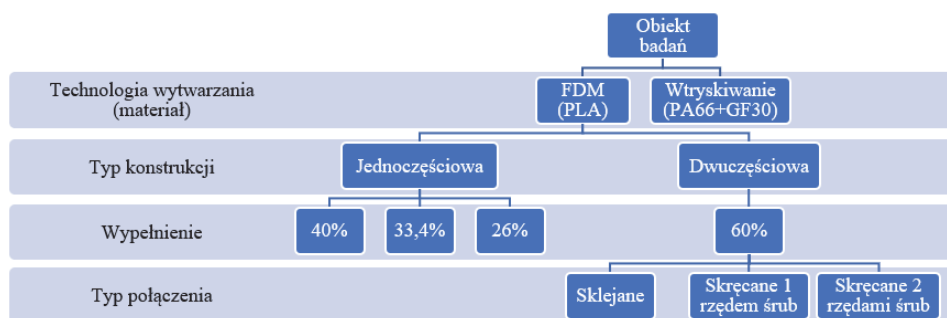


Rys. 3. Typy wytwarzanych elementów: a) skręcane 1 rzędem śrub, b) skręcane 2 rzędami śrub, c) połączenie klejone, d) jednoczęściowe
 Fig. 3. Types of produced elements: a) with 1 row of bolts, b) with 2 row of bolts, c) glued, d) one piece

Parametry wytwarzania, które były stałe dla wszystkich ramion powstałych w technologii FDM, przedstawiono w tabeli 1.

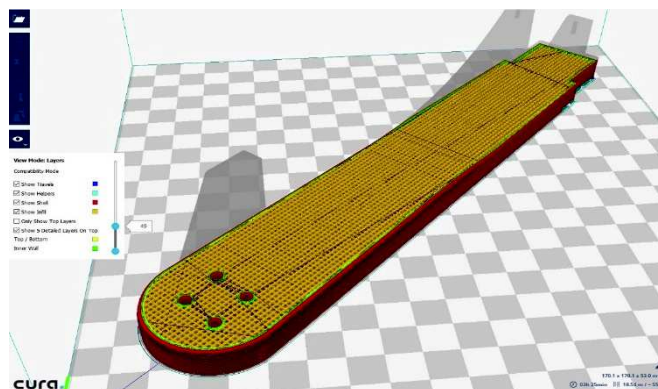
Tabela 1. Zestawienie stałych parametrów wytwarzania
 Table 1. Juxtaposition of constant production parameters

Parametr wytwarzania	Liczba ścianek w podstawie, bokach i górze elementu	Grubość warstw	Temperatura głowicy	Temperatura stołu
Wartość	2	0,2 mm	195°C	70°C



Rys. 4. Diagram przedstawiający typy wytworzonych elementów
 Fig. 4. Diagram show types of produced elements

Produkt rynkowy jest elementem pełnym wewnątrz, natomiast wypełnienie zastosowane w technologii FDM ma kształt kratownicy zaprezentowanej na rysunku 5.



Rys. 5. Wytwarzane ramię z widocznym typem wypełnienia, liczbą ścianek i przewidywaną masą
Fig. 5. Arm with visible fill type, wall number and predicted mass

Wytworzone elementy porównano z oryginalnym produktem pod względem ilości wypełnienia, typu konstrukcji, masy oraz kosztów produkcji. Dane zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie mas poszczególnych elementów
Table 2. Mass of individual elements

Nr	Materiał	Wypełnienie	Konstrukcja	Masa elementu g	Cena zł
1	PA66+GF30	100%	jednoczęściowa	56	49,00
2	PLA	60%	dwuczęściowa z połączeniem klejonym	84	6,38
3	PLA	60%	dwuczęściowa z połączeniem skręconym jednym rzędem śrub	87	10,58
4	PLA	60%	dwuczęściowa z połączeniem skręconym dwoma rzędami śrub	90	14,78
5	PLA	40%	jednoczęściowa	73	5,51
6	PLA	33%	jednoczęściowa	57	4,29
7	PLA	26%	jednoczęściowa	48	3,66

2.1.3. Dane materiałowe

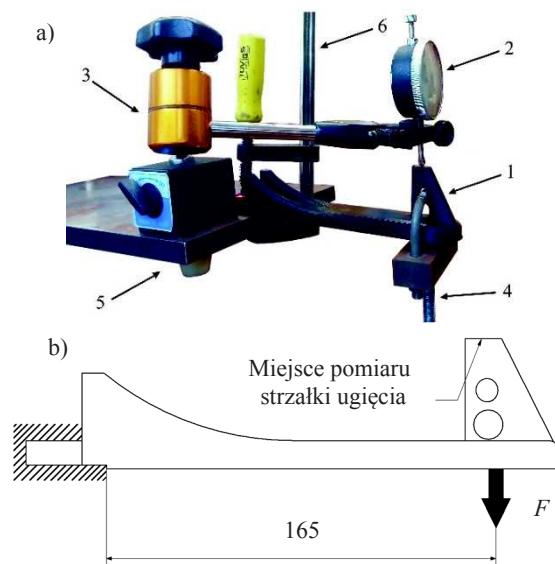
Właściwości mechaniczne i fizyczne materiałów, z których wykonane były testowane ramiona, zestawiono w tabeli 3. Można zaobserwować niewielką różnicę w wytrzymałości przy zginaniu i module sprężystości przy zginaniu dla obu materiałów. PLA cechuje się niższą temperaturą topnienia. Jest ona jednak dużo wyższa niż przewidywana temperatura mogąca wystąpić podczas eksploatacji.

Tabela 3. Zestawienie właściwości mechanicznych i przetwórczych wykorzystanych materiałów [10]
Table 3. Summary of mechanical and processing properties of used materials [10]

Właściwości	PA66+GF30	PLA
Moduł sprężystości przy rozciąganiu, MPa	5500	2346,5
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	91	49,5
Wydłużenie przy granicy plastyczności, %	8	3,3
Wydłużenie przy zerwaniu, %	14	5,2
Wytrzymałość na zginanie, MPa	135	103
Moduł sprężystości przy zginaniu, MPa	4700	3150
Temperatura zeszklenia, °C	48	60
Temperatura topnienia, °C	254	145–160

2.2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 6) składa się z elementu poddawanego badaniu (1) zamocowanego za pomocą ścisku warsztatowego (6) do sztywnej płyty (5).



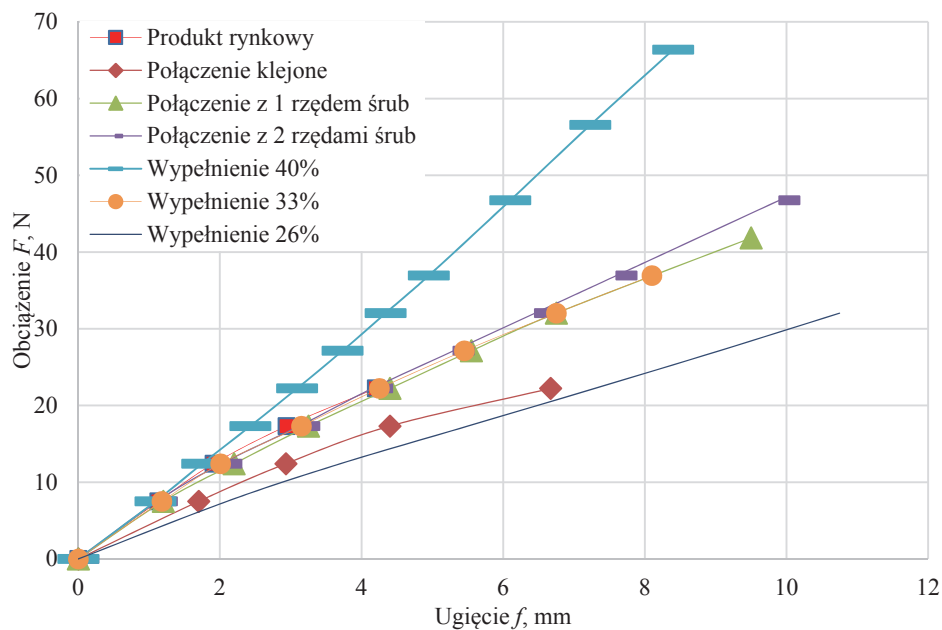
Rys. 6. Stanowisko badawcze: a) zdjęcie stanowiska badawczego, b) schemat działania stanowiska badawczego

Fig. 6. Scheme of build test stand: a) a photo of the test bench, b) scheme of working the test bench

Na płycie przytwierdzono za pomocą elektromagnesu uchwyt (3) czujnika zegarowego (2). W próbce są wywiercone otwory pozwalające na podwieszenie ucha (4), na którym zawieszane są odważniki. Czujnik zegarowy mierzy strzałkę ugięcia f ramienia z dokładnością do 0,01 mm pod wpływem zwiększającej się siły obciążającej F zadawanej ze skokiem 5 i 10 N. Miejsce obciążenia siłą i pomiaru strzałki ugięcia stanowi miejsce montażu silnika.

3. WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów zależności siły F od ugięcia f . Na wykresie (rys. 7) można zaobserwować różnice sztywności testowanych ramion oraz różne wartości obciążeń maksymalnych, które zostały przeniesione przez dany obiekt.



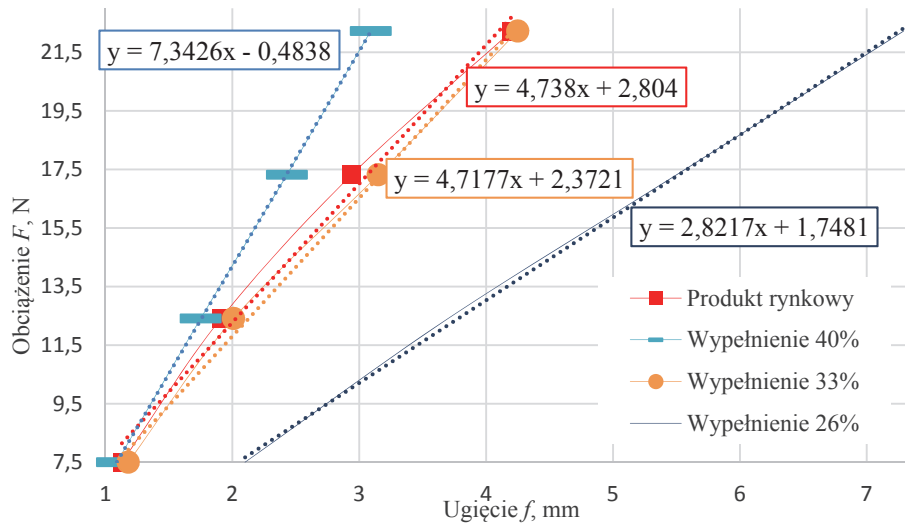
Rys. 7. Porównanie sztywności dla badanych typów konstrukcji
Fig. 7. Comparison of stiffness for examine types construction

Jedną z metod porównania sztywności łączonych elementów może być wyznaczenie współczynnika kierunkowego linii regresji dla zakresu obciążeń eksploatacyjnych przyjętych w zakresie od 7,5 N do 22 N. Otrzymane charakterystyki, linie regresji i wyznaczone równania dla konstrukcji jednoczęściowych różniących się wypełnieniem oraz dla konstrukcji rynkowej będącej odniesieniem przedstawiono na wykresie (rys. 8).

Obiekt powstały w technologii FDM o wypełnieniu 33% cechował się najbardziej zbliżoną sztywnością do oryginału wytworzonego z wykorzystaniem formowania wtryskowego. Obiekt o wypełnieniu 40% miał większą sztywność, natomiast wypełniony w 26% element badany wykazał się dużo mniejszą sztywnością.

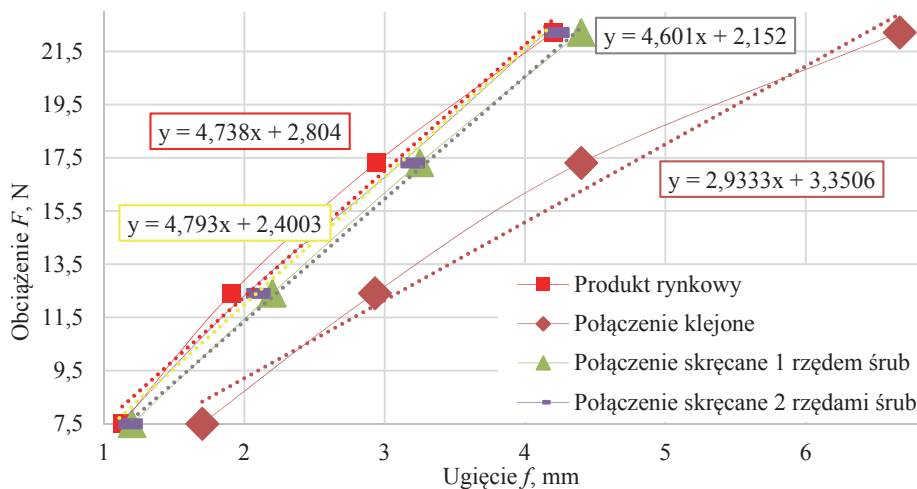
Na wykresie (rys. 9) przedstawiono wyniki dla konstrukcji ramion dwuczęściowych o różnym współczynniku wypełnienia i rodzaju łączenia oraz dla konstrukcji rynkowej.

Obiekty wytworzone w technologii FDM skręcane śrubami wykazywały zbliżoną sztywność do oryginału. Około dwukrotnie mniejszą sztywność uzyskano w obiekcie, którego części sklejkano.



Rys. 8. Porównanie sztywności dla konstrukcji rynkowej oraz konstrukcji jednoczęściowej o różnych typach wypełnień

Fig. 8. Comparison of stiffness for market construction and one piece construction with different types of fillings



Rys. 9. Porównanie sztywności dla konstrukcji rynkowej oraz konstrukcji dwuczęściowych o różnych typach połączeń

Fig. 9. Comparison of stiffness for market construction and two piece construction with different types of connection

W tabeli 4 zestawiono wartości współczynników kierunkowych i mas poszczególnych obiektów oraz współczynnik porównawczy β będący wskaźnikiem, czy dany obiekt charakteryzuje się lepszym stosunkiem sztywności i masy niż obiekt referencyjny. Pozwala w prosty sposób wskazać korzystniejsze konstrukcje. Jako podstawę porównania przyjęto produkt rynkowy, dla którego wartość współczynnika wynosi 1. Dla obiektów o mniejszej masie i większej sztywności parametr przyjmuje wartości powyżej 1, co świadczy o uzyskaniu lepszego stosunku tych wartości od oryginału. Współczynnik β o wartości poniżej 1 świadczy o niekorzystnym stosunku obu kryteriów konstrukcyjnych. Na podstawie współczynnika β można określić, czy kierunek optymalizacji ostatecznego wyrobu jest perspektywiczny. Wartość współczynnika β określono wzorem:

$$\beta = \frac{\frac{m_o}{c_o}}{\frac{m_n}{c_n}} = \frac{\beta_m}{\beta_c} \quad (1)$$

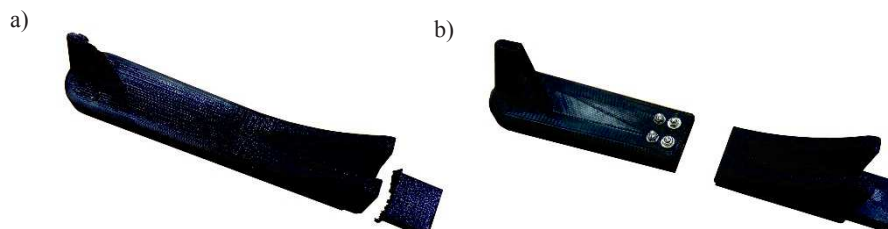
gdzie:

- m_o – masa oryginalnego ramienia,
- m_n – masa porównywanego ramienia,
- c_o – sztywność (współczynnik kierunkowy) oryginalnego ramienia,
- c_n – sztywność (współczynnik kierunkowy) porównywanego ramienia,
- β_m – współczynnik redukcji masy,
- β_c – współczynnik redukcji sztywności.

Im wyższy współczynnik redukcji masy β_m , tym konstrukcja jest korzystniejsza pod względem redukcji masy. Im niższy współczynnik redukcji sztywności β_c , tym konstrukcja jest korzystniejsza pod względem wzrostu sztywności. W przypadku konieczności wprowadzenia priorytetu jednego kryterium konstrukcyjnego nad drugim – można przyjąć współczynniki wagowe.

Sztywność zdefiniowana przez współczynnik kierunkowy linii regresji wskazuje na to, że najbardziej sztywną próbką jest konstrukcja jednoczęściowa o wypełnieniu 40%. Najmniejszą sztywnością charakteryzuje się próbka jednoczęściowa o 26% wypełnieniu. Jest to ponad 2,5-krotna różnica sztywności. Z kolei zbliżonymi do siebie próbkami pod względem sztywności okazały się: produkt rynkowy, próbki z połączeniem skręcanym jednym oraz dwoma rzędami śrub, a także próbka z 33% wypełnieniem. Ramię o najkorzystniejszym parametrze β to konstrukcja jednoczęściowa o 40% wypełnieniu cięższa od oryginału o około 30 g, lecz znacznie sztywniejsza. Próbka o 33% wypełnieniu ma bardzo zbliżony do oryginału parametr β – charakteryzuje ją możliwie zbliżona masa do produktu rynkowego. Najgorszy stosunek sztywności do masy uzyskano dla próbki dwuczęściowej z połączeniem klejonym. Największe obciążenie niszczące, tj. 76,1 N, odnotowano dla próbki jednoczęściowej o wypełnieniu 26%. Pęknięcie zaobserwowano w miejscu montażu do płyty centralnej drona, gdzie występuje największy moment gnący oraz zmniejszenie pola przekroju poprzez zmniejszenie jego wysokości (rys. 10a). Próbki dwuczęściowe skręcane śrubami ulegały zniszczeniu przy obciążeniu o wartości 46,7 N w miejscu łączenia ele-

mentów i przewężenia ich przekrojów (rys. 10b). Najmniej wytrzymałą na zginanie próbką okazała się konstrukcja dwuczęściowa z połączeniem klejonym, która uległa rozklejeniu pod wpływem obciążenia o wartości 22,2 N.



Rys. 10. Pęknięcia: a) w próbce jednoczęściowej, b) w próbce dwuczęściowej skręcanej 2 rzędami śrub

Fig. 10. Cracks a) in the one piece specimen, b) in the two pieces specimen bolted in two rows of screws

Tabela 4. Zestawienie uzyskanych współczynników kierunkowych oraz wykorzystanie przyjętego parametru sztywności do masy

Table 4. Summary obtained directional coefficients and use founded parameter stiffness to mass

Nr	Konstrukcja	Masa, m	Sztywność, c	Współ. β_m	Współ. β_c	Współ. β	Zniszczona przy sile F
		g	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	–	–	–	N
1	jednocz. PA66+GF30	56	4,7	1	1	1	niezniszczona (max. 98,1)
2	dwucz. PLA 60% klejona	84	2,9	0,67	1,62	0,41	22,2
3	dwucz. PLA 60% skręcana 1 rz.	87	4,6	0,64	1,02	0,63	46,7
4	dwucz. PLA 60% klejona 2 rz.	90	4,7	0,62	1	0,62	46,7
5	jednocz. PLA, 40%	73	7,3	0,77	0,64	1,2	niezniszczona (max. 98,1)
6	jednocz. PLA, 33%	57	4,7	0,98	1	0,98	niezniszczona (max. 98,1)
7	jednocz. PLA, 26%	48	2,8	1,17	1,68	0,69	76,1

4. PODSUMOWANIE

Materiał PA66+GF30, z którego jest wykonany produkt rynkowy, ma niewiele wyższą sztywność i wytrzymałość na zginanie od PLA wykorzystywanego w technologii FDM. Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że istnieje możliwość wytworzenia w technologii FDM z PLA elementu o sztywności zbliżonej do sztywności elementu formowanego wtryskiem z PA66 wzmocnianego włóknem szklanym. Możliwe jest więc zastąpienie produktu rynkowego elementem wykonanym w technologii przyrostowej. Gdy zmienia się ułożenie po-

czątkowych i końcowych ścianek wytwarzanego obiektu na wzdłużne, czyli w kierunku działania naprężeń normalnych w zginanej belce, zwiększa się sztywność i wytrzymałość takiego elementu. W przypadku profili zginanych, jakimi są ramiona drona, o sztywności i wytrzymałości na zginanie decyduje osiowy wskaźnik przekroju i osiowy moment jego bezwładności. Najbardziej obciążane są zewnętrzne, górne i dolne ściany przekroju, zatem ich grubość i oddalenie od osi obojętnej wpływa w większej mierze na sztywność i wytrzymałość niż procentowa wartość wypełnienia.

Konstrukcje z łączonych części cechują się mniejszą wytrzymałością i sztywnością od konstrukcji jednoczęściowych.

Koszt zakupu ramienia odpowiada kwocie wytworzenia 12 ramion w technologii FDM o takiej samej sztywności jak element rynkowy. Dla posiadaczy urządzeń do szybkiego prototypowania samodzielne wytwarzanie elementów może stanowić alternatywną zakupu gotowych części.

Zaletą stosowania elementów o częściowo pustym środku jest możliwość redukcji masy przy zachowaniu własności mechanicznych obiektów. Prawdopodobne jest, iż zwiększając liczbę ścianek górnych i dolnych oraz ich grubość i jednocześnie zmniejszając ilość wypełnienia, można uzyskać sztywność wyższą niż tę, jaką cechuje się produkt rynkowy – przy zdecydowanie niższej od niego masie.

LITERATURA

- [1] DOMINGO-ESPIN M., PUIGORIOL-FORCADA J.M.: Mechanical property characterization and stimulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design* 83, 2015, 670–677.
- [2] DUDEK P.: FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials* 4, 2013, 1415–1418.
- [3] DZIUBEK T., FILIP M.: Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania. *Mechanik* 12, 2015, 54–61.
- [4] GARG A., BHATTACHARYA A.: An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study. *International Journal of Mechanical Sciences* 120, 2017, 225–236.
- [5] KOTYK M., MAĆKOWIAK P.: Badanie podstawowych właściwości mechanicznych próbek z tworzywa ABS wykonanych za pomocą drukarki 3D w zależności od stopnia ich wypełnienia. *Nauka nie jedno ma imię...*, Tom III, Wyd. Uczelniane UTP w Bydgoszczy, 2015, 43–52.
- [6] MAĆKOWIAK P., MAGDZIARZ D.: Wielkość i liczba wad w elementach wyprodukowanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej* 7(4), 2016, 17–31.
- [7] <http://bazar.coptershop.cz/cz/bazarVypis/novy-dji-f550-naza-fpv-2d-gimbal-11249>.
- [8] <http://sklep.modelarnia.pl/p5662,f550-arf-kit-hexacopter-0550-dji-hobby.html>.
- [9] <http://www.modelaviation.com/djiflamewheel>.
- [10] <https://www.ensingerplastics.com/pl-pl/polwyroby/produkty/pa66-tecamid-66-gf30-black>.

VERIFICATION OF SELECTED CONSTRUCTION OF DRONE ARMS PRODUCED IN FDM TECHNOLOGY

Summary: The paper presents the various types of drone arm construction manufactured in FDM technology. The arm model is based on the original DJI F550 drone arm. It was assumed that the final construction should have the same or reduced mass preserving or increasing stiffness during exploitation. Presented and compared results of deflection, stiffness and mass of individual arms depending on the: fill, construction maintaining the same external dimensions as the original. The aim of the scientific work was to demonstrate using FDM technology as alternative method in the manufactured of elements to other technologies.

Key words: FDM (fused deposition modeling), rapid prototyping, testing construction elements, examination connections