

Włodzimierz KOŃCZEWICZ, Patryk KRAWULSKI, Adam BIESZK,
Daria DARZNIK
Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

THE ANALYSIS OF PROPERTIES SELECTED FILAMENTS FOR MAKING COMPONENTS AND PARTS OF MARINE EQUIPMENT BY FUSED DEPOSITION MODELING ON EXAMPLE OF FLEXIBLE CLUTCH COUPLING AND OIL CENTRIFUGE SCROLL

**Analiza właściwości wybranych filamentów przeznaczonych
do wykonania prototypów elementów maszyn i urządzeń
obiektów powietrznych i morskich metodą Fused Deposition
Modeling na przykładzie elastycznej wkładki sprzęgła
i ślimacznicy wirówki oleju**

Abstract: *Incremental techniques (FDM) were used to create prototype of flexible clutch coupling and oil centrifuge scroll. We carried out preliminary research of stretching, compressing and hardness material in different degree of filling. The results of our research allows to select materials which are necessary to create flexible clutch coupling and oil centrifuge scroll.*

Keywords: 3D printer, FDM method, components and parts of marine equipment, flexible clutch coupling, oil centrifuge scroll

Streszczenie: *Techniką przyrostową (FDM) wykonano prototyp wkładki elastycznej sprzęgła podatnego, ślimacznicy oraz wirówki oleju. Przeprowadzono wstępne badania wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie oraz twardości materiału przy różnym stopniu wypełnienia. Wyniki badań pozwoliły na dobór materiału o określonym stopniu wypełnienia, do wykonania prototypów wkładek sprzęgła i ślimacznicy.*

Słowa kluczowe: drukarka 3D, metoda FDM, elementy maszyn, wkładka sprzęgła, filamenty, ślimacznica wirówki oleju

1. Introduction

The development and patenting of 3D printing technology in the 1980s resulted in a very rapid development of 3D printing technology. At an early stage of development this technology was used for prototyping. Prototyping consisted of copying an element's shape regardless of its final endurance features. Further development of 3D print allowed not only producing prototypes but also sparing parts with the properties akin to those required during utilization.

A mutual feature of the techniques of producing the objects with incremental methods (SLA, FDM, SLS) is forming the elements by adding the matter layer after layer until the desired shape is obtained.

Automotive and aircraft industry has been investing in technologies of incremental production of the devices components for many years. One of the effects of using incremental print is maximisation of fuel efficiency and minimisation of carbon dioxide emission.

Marine industry has increased its interest in 3D print in order to speed the extraction of spare parts and utilization of additive technology potential to produce complex-shaped elements.

A vast majority of elements in marine industry is bigger and heavier than those in automotive and aircraft ones. The rating associations face the problem of mastering the regulations and formulating guidelines which are going to be the basis for qualification, certification, verification and approval of the grade. Only one of the rating associations-DNV (*Det Norske Veritas*) has the grade rules for incremental production, i.e. the matter, processes and AM components which can be comprised by classification regulations.

An impletion of an elastic claw coupling (Fig. 1) and a worm wheel of an oil centrifuge (Fig.2) have been printed by the incremental method. These are the components which are often damaged during a utilisation process. Endurance tests have been carried out in order to fit the matter needed to manufacture these components.



Fig. 1. An insert of the claw thruster clutch made by the FDM method



Fig. 2. Prototype of an oil centrifuge wormwheel made by FDM method

2. Material research

The matter to carry out the tests (PLA, ABS, nylon) has been chosen due to its mechanical properties and the prospect of its processing. Samples of varied impletion density have been used for the tests. During the matter tests carried out while printing the liner of a claw coupling, the density of the impletion was changed every 20 p.p. starting with 20% and ending with 100%.

During the tests carried out while printing the worm wheel, the density of liner samples sequentially totalled 50%, 75 % and 100%. A full honeycomb is the applied structure of the impletion. This type of structure is applied in many constructions due to its high endurance and small weight as well as the ability to absorb the energy. The full honeycomb structure is used in aeronautics as a liner of rotor blades of a propeller.

The selected materials are characterized by high material shrinkage, which is influenced by the temperature difference between the printing space and the print area. The nylon and ABS printing station has been equipped with a printing chamber. The temperature on the stand was controlled with a temperature sensor with a range from -50°C to 110°C and accuracy of 0.1°C.

The samples were printed with the "Prusa MK3S" printer. Before printing, nylon has undergone a drying process because it absorbs moisture from the environment, which significantly affects the printing process and the quality of the finished component.

Strength tests were carried out on a Zwick-Roell test stand. The stand consists of a dynamic and fatigue testing machine with instrumentation for controlling and reading the results. The machine enables tensile and compression tests to be carried out (Fig. 3).

Table 1

Printing parameters

Parameter	PLA	ABS	Nylon
Temp. nozzle	215°C	260°C	265°C
Temp. table	60°C	110°C	115°C
Cooling	100%	5%	0%
Fill patern	Kratka	Kratka	Kratka
Density	50/75/100%	50/75/100%	50/75/100%
Speed	60 mm/s	60 mm/s	40 mm/s
Layer height	0,15 mm	0,15 mm	0,15 mm
Nozzle diameter	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Retraction	0,8 mm	0,6 mm	0,6 mm
Additional adhesive	Nie	Nie	Tak

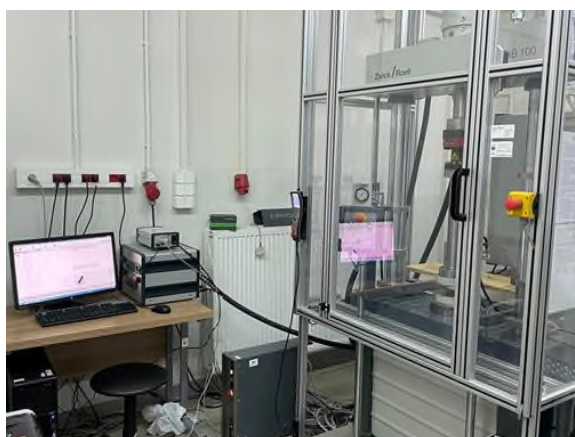


Fig. 3. Universal testing machine Zwick Roell 100 kN

The static compression test was carried out in accordance with the PN-EN ISO 604 standard. 5 samples were prepared for each material with different filling density (Fig. 4).

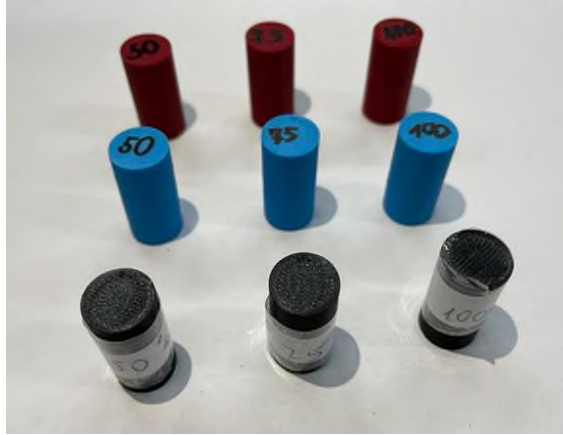


Fig. 4. Examples of samples prepared for strength tests

Compression was carried out at a speed of 5 mm/min. The compression process was carried out until the 10% relative deformation was achieved (Fig. 5).

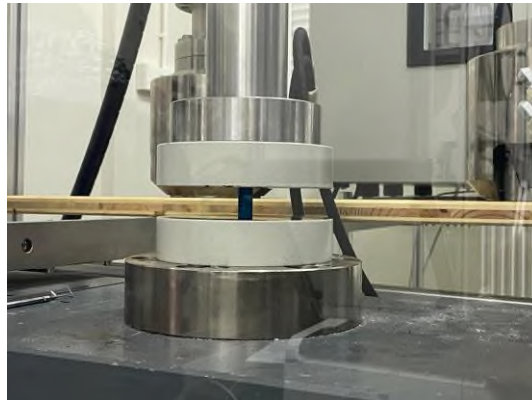


Fig. 5. An example of a sample during the compression test

Then tensile tests were performed. The tests were carried out in accordance with the PN-EN ISO 527-1 standard. The test specimens are shown in Fig. 6. The tensile process was carried out at a speed of 5 mm / min until the specimen was completely broken.



Fig. 6. Examples of samples prepared for the static tensile test

The view of the samples after the static tensile test is shown in Fig. 7.



Fig. 7. An example of a sample after a static tensile test

Graphs of tensile and compression of samples made of PLA, ABS, Nylon are shown in Fig. 8–13. Comparing Charts tensile and compression are shown in Fig. 14-15. The samples were made in three filling densities: 50%, 75% and 100% when printing the wormwheel, while in the case of the clutch insert, the filling density used was: 20%, 40%, 60%, 80% and 100%.

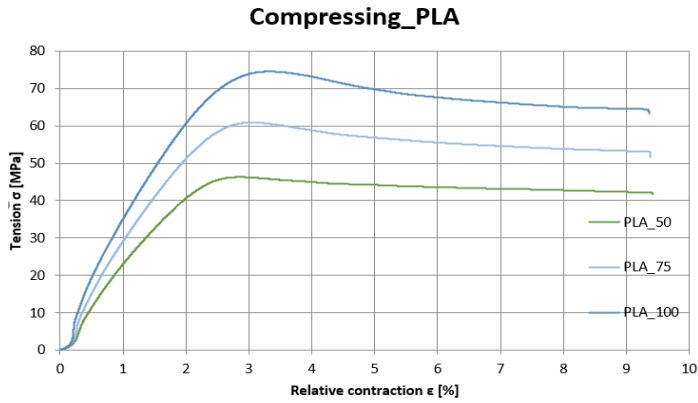


Fig. 8. A diagram of compression of a PLA material with different filling densities

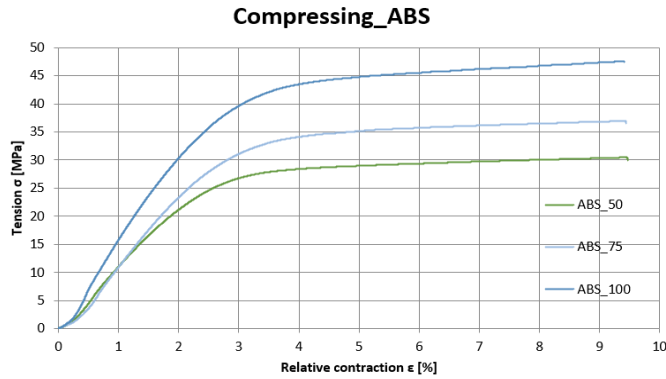


Fig. 9. Compression chart of a fitting made of ABS material with different filling densities

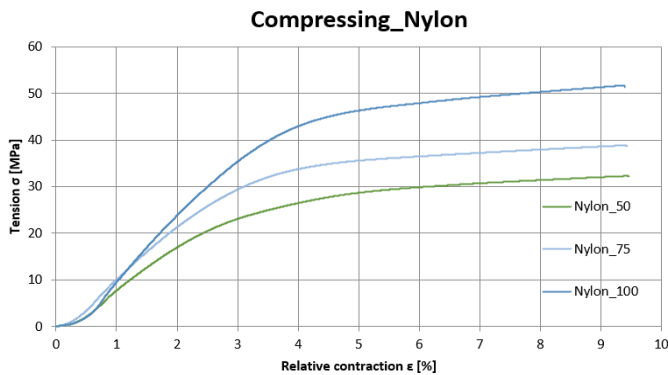


Fig. 10. Compression chart of a fitting made of Nylon material with different filling densities

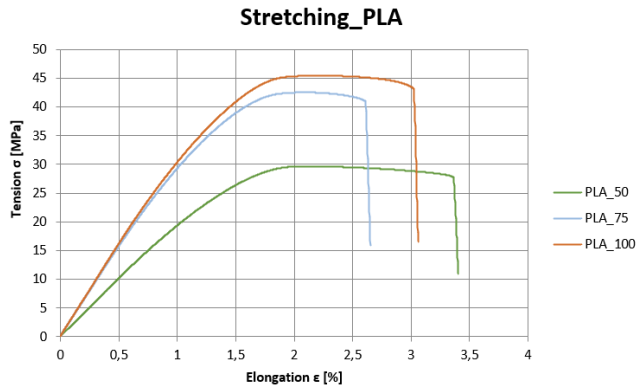


Fig. 11. Tensile diagram of a PLA material with different filling densities

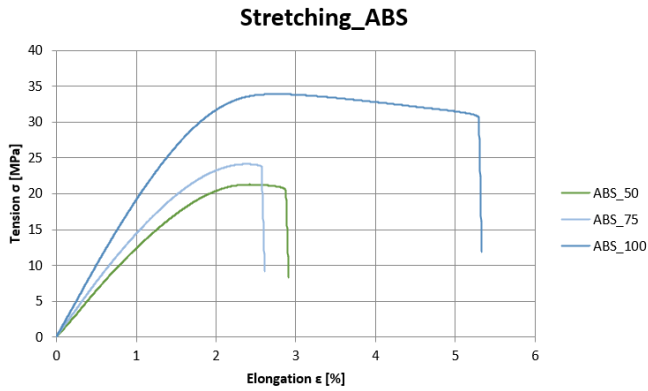


Fig. 12. Tensile diagram of a fitting made of ABS material with different filling densities

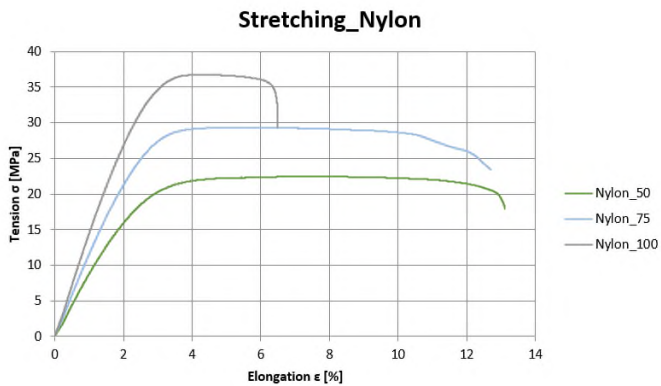


Fig. 13. Tensile diagram of a shaped fitting made of Nylon material with different filling densities

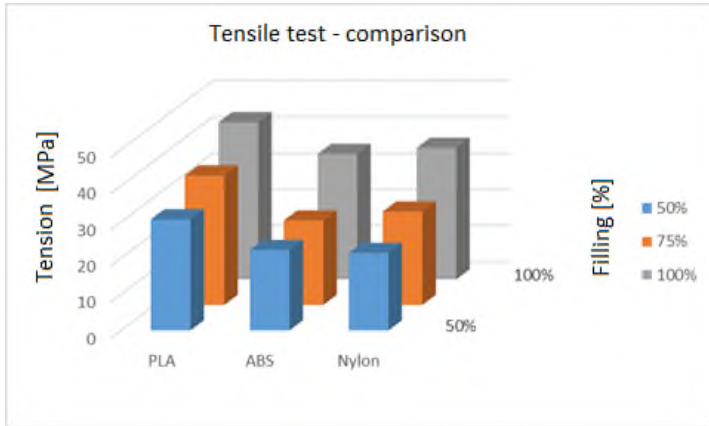


Fig. 14. Tensile diagram for various materials at a given filling density (scroll wheel)

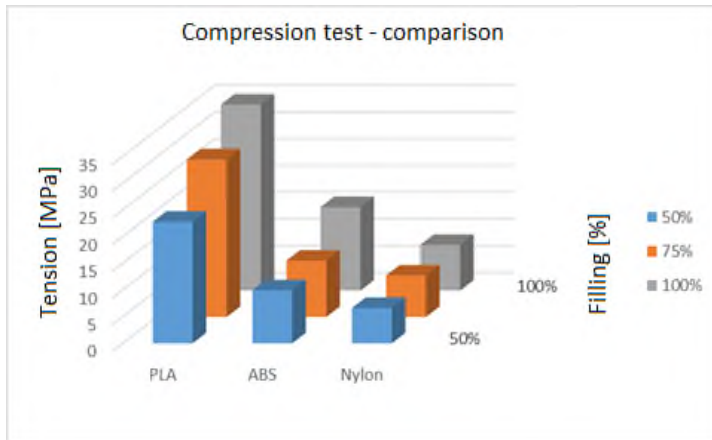


Fig. 15. Compression diagram for various materials at a given filling density (scroll wheel)

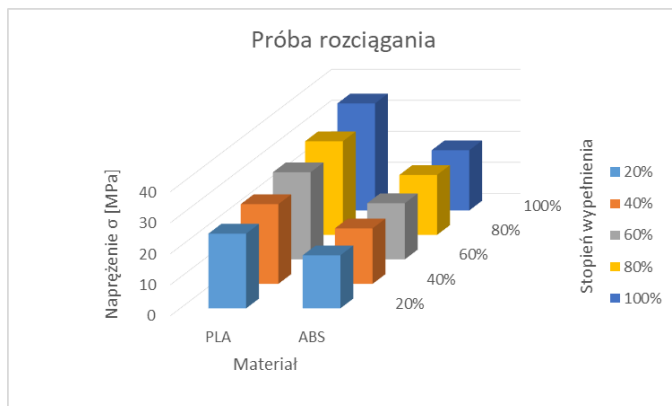


Fig. 16. Tensile diagram for different types of materials with a given filling density (clutch liner)

The highest value of tension for the PLA matter has been reached for a sample with 100% impletion density. The samples made of ABS matter carry much smaller compressive burden than the samples made of PLA. As far as nylon samples are concerned, it was noticed that with the increase of the impletion density, the results diverged from one another. This casus comes from an extraordinary elasticity characteristic for nylon. The biggest distortion of the samples was observed for the PLA matter.

In the case of an endurance test for elongating, the value of the elongating force equals the value of 50% and 75 % of impletion. The highest value of the force was obtained for 100% of impletion density. Slightly lower values of the elongating forces were reached for the ABS matter in comparison to PLA matter. The elongating endurance of nylon was similar to that of ABS. It was noticed that the samples did not reach the moment of final rapture with the 50% and 75 % of impletion but their single fibres stretched.

3. Summary

Due to the research it comes out that, in the case of elements which transfer small burden, a smaller density of the element impletion can be applied. This measure will have a direct impact on shortening the production time and decrease the amount of the matter used with saving the desired endurance features of a finished product at the same time.

As far as the liner of an elastic claw coupling, the endurance tests of the ABS matter showed that a density of the element impletion has an impact on the elongating endurance. The highest endurance is reached with 100 % of impletion. The elongating endurance for the PLA matter is much higher than for the ABS one.

During a tension test for both matter, the density of the impletion did not have a significant impact on the tension endurance results.

In both cases of printing the wormwheel and the clutch insert, the PLA material showed the best strength properties.

The production of the components and machine elements with incremental methods allows producing the elements in emergency situations. The development of a project schedule for a particular element is a basis to make complicated elements of devices by the use spacial print.

4. References

1. Bourell D., Kruth J.P, Leu M. Levy G., Rosen D., Beese A.M, Clare A.: Materials for additive manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 66, pp. 659-681, 2017.
2. Brischetto S., Maggiore P., Ferro C.G.: Additive manufacturing technologies and applications. Wydawnictwo MDPI, Basel 2017.
3. Dynowski A.: Analiza możliwości wykorzystania drukarki 3D do wytwarzania elementów i części urządzeń okrętowych na przykładzie wkładki do sprzęgła kłowego, Praca dyplomowa, Gdynia 2018.
4. Fiał Ch., Pieknik M.: Druk 3D jako technologia przyszłości – część 2. Technologia i Jakość Wyrobów, nr 65/2020, s. 106-115, 2020.
5. Fiał Ch., Piekut M.: Druk 3D jako technologia przyszłości – część 1. Technologia i Jakość Wyrobów nr 65/2020, s. 92-105, 2020.
6. Gebhardt A., Hötter J. S.: Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Hanser Publishers, Monachium 2016.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B.: Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition. Springer, Berlin 2015.
8. Kaziunas France A.: Świat druku 3D. Przewodnik. Wydawnictwo Helion, 2014.
9. Kyzioł L., Kończewicz W., Dynowski A., Journal of Konbin, Volume 49, Issue 3, 2019.
10. Mikoś J.: Przegląd technologii druku 3D jako produkcji dodatkowej (przyrostowa) do wykonywania prototypów małych maszyn elektrycznych. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 2/2021, s. 1-7, Katowice 2021.
11. PN EN ISO 604:2006 – Oznaczenie właściwości mechanicznych podczas ściskania.
12. Siemiński P., Budzik G.: Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D. Wydawnictwo OWPW, 2015.
13. Stritesky O.: Podstawy Druku 3D z Josefem Prusą. Prusa Research a.s., Praga 2020.

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI WYBRANYCH FILAMENTÓW PRZEZNACZONYCH DO WYKONANIA PROTOTYPÓW ELEMENTÓW MASZYN I URZĄDZEŃ OBIEKTÓW POWIETRZNYCH I MORSKICH METODĄ FUSED DEPOSITION MODELING NA PRZYKŁADZIE ELASTYCZNEJ WKŁADKI SPRZĘGŁA I ŚLIMACZNICZY WIRÓWKI OLEJU

1. Wprowadzenie

Opracowanie i opatentowanie technologii druku przestrzennego w latach osiemdziesiątych XX wieku wpłynęło na bardzo szybki rozwój technologii drukowania 3D. W początkowej fazie rozwoju technologii tę wykorzystywano do prototypowania. Prototypowanie polegało na odwzorowaniu kształtu danego elementu, bez względu na jego docelowe własności wytrzymałościowe. Dalszy rozwój technologii drukowania 3D pozwolił na wytwarzanie nie tylko prototypów, ale także części zamiennych o właściwościach zbliżonych do tych wymaganych podczas eksploatacji.

Cechą wspólną technik wytwarzania obiektów metodami przyrostowymi (SLA - Stereolithography, FDM - Fused Deposition Modeling, SLS - Selective Laser Sintering) jest tworzenie elementów poprzez dodawanie materiału warstwa po warstwie, aż do uzyskaniażądanego kształtu.

Przemysł motoryzacyjny i lotniczy od wielu lat inwestuje w technologie wytwarzania przyrostowego części urządzeń. Jednym z efektów stosowania drukowania przyrostowego jest maksymalizacja wydajności paliwowej i minimalizacja emisji dwutlenku węgla.

Przemysł morski zaczął intensyfikować swoje zainteresowania drukiem 3D w celu przyspieszenia pozyskiwania części zamiennych i wykorzystania możliwości technologii addytywnej do wytwarzania elementów o bardzo skomplikowanych kształtach.

W przemyśle morskim wiele części jest znacznie większych i cięższych niż w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym. Towarzystwa klasyfikacyjne stoją przed problemem opanowania zasad i opracowania wytycznych, które będą podstawą działań w zakresie kwalifikacji, certyfikacji, weryfikacji i zatwierdzenia klasy. Tylko jedno towarzystwo klasyfikacyjne – DNV (Det Norske Veritas) przyjęło reguły klasy dla wytwarzania przyrostowego, tzn. materiały, procesy i komponenty AM, które mogą być objęte przepisami klasyfikacji.

Za pomocą techniki przyrostowej wydrukowano wkładkę sprzęgła kłowego elastycznego (rys. 1) oraz ślimacznice wirówki oleju (rys. 2). Dobierając materiał do wytworzenia tych elementów, przeprowadzono badania wytrzymałościowe.



Rys. 1. Wkładka sprzęgła kłowego steru strumieniowego wykonana metodą FDM



Rys. 2. Prototyp ślimacznicy wirówki oleju wykonany metodą FDM

2. Badania materiałowe

Materiały do badań (PLA, ABS, nylon) wytypowano ze względu na ich właściwości mechaniczne oraz możliwość ich przetworzenia. Do badań wykonano próbki o różnych gęstościach wypełnienia. Przy badaniach materiałowych przeprowadzonych podczas druku wkładki sprzęgła gęstość wypełnienia zmieniano co 20 p.p, zaczynając od 20%, kończąc na 100%.

Podczas badań prowadzonych przy drukowaniu ślimacznicy gęstości wypełnienia próbek wynosiły kolejno: 50%, 75% oraz 100%. Zastosowana struktura wypełnienia to „pełen plaster miodu” (*Full Honeycomb*). Ten typ struktury wykorzystywany jest w wielu konstrukcjach, ze względu na swoją wysoką wytrzymałość przy niewielkiej masie

i zdolność do absorpcji energii. Struktura plastra miodu znajduje zastosowanie w lotnictwie jako wypełnienie różnych elementów płatowca.

Materiały wytypowane do badań charakteryzują się dużym skurczem materiałowym, na który ma wpływ różnica temperatur występujących między przestrzenią drukowania a obszarem wydruku. Temperaturę na stanowisku kontrolowano za pomocą czujnika o zakresie od -50°C do 110°C i dokładności $0,1^{\circ}\text{C}$.

Do wydruku próbek użyto drukarki Prusa MK3S. Nylon przed wydrukiem dodatkowo poddano procesowi suszenia, ponieważ pochłania on wilgoć z otoczenia, co znacząco wpływa na proces wydruku i jakość gotowego komponentu.

Parametry drukowania ślimacznicy i wkładki elastycznej sprzęgła były zbliżone dla zastosowanych materiałów. Wyniki badań dla wkładki sprzęgła przedstawione zostały w materiałach [9].

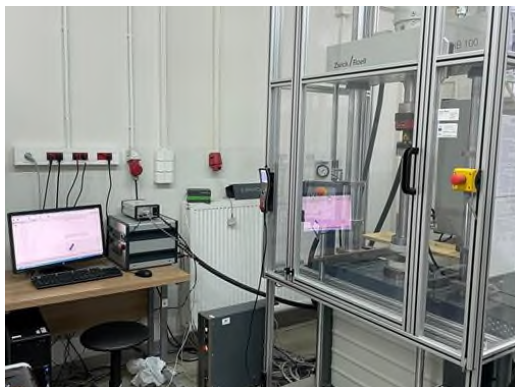
W tabeli 1 przedstawiono parametry drukowania.

Tabela 1

Parametry drukowania ślimacznicy

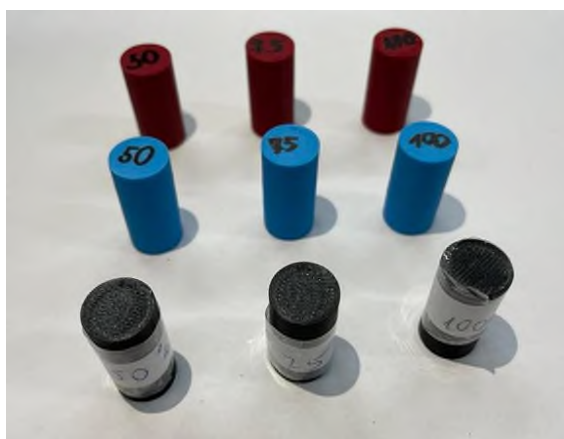
Parametr	PLA	ABS	Nylon
Temp. dyszy	215°C	260°C	265°C
Temp. blatu	60°C	110°C	115°C
Chłodzenie	100%	5%	0%
Wzór wypełnienia	kratka	kratka	kratka
Gęstość wypełnienia	50/75/100%	50/75/100%	50/75/100%
Prędkość	60 mm/s	60 mm/s	40 mm/s
Wysokość warstwy	0,15 mm	0,15 mm	0,15 mm
Średnica dyszy	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Retrakcja	0,8 mm	0,6 mm	0,6 mm
Dodatkowy środek adhezyjny	nie	nie	tak

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na stanowisku pomiarowym firmy Zwick-Roell. Stanowisko składa się z maszyny wytrzymałościowej dynamiczno-zmęczeniowej z przyrządowaniem służącym do sterowania i odczytu wyników. Maszyna umożliwia wykonanie próby rozciągania i ściskania (rys. 3).



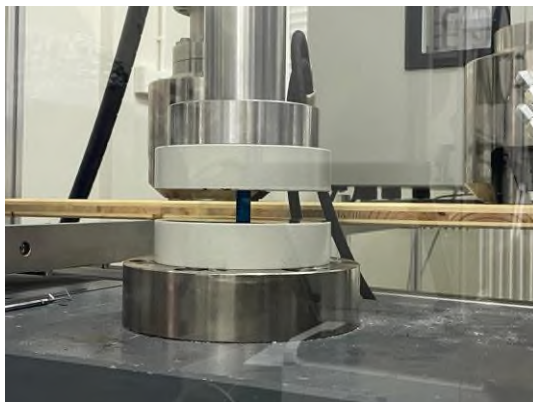
Rys. 3. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa Zwick&Roell 100 kN

Stacyczną próbę ściskania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 604:2006. Do badania przygotowano pięć próbek dla każdego materiału, o różnej gęstości wypełnienia (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowe próbki przygotowane do badań wytrzymałościowych

Ściskanie przeprowadzono z prędkością 5 mm/min. Proces ściskania prowadzono do chwili, kiedy osiągnięto 10% odkształcenia względnego (rys. 5).



Rys. 5. Przykładowa próbka podczas próby ściskania

Następnie wykonano próby rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 604:2006. Próbki przeznaczone do badań przedstawiono na rys. 6, a po statycznej próbie rozciągania – na rys. 7. Proces rozciągania przeprowadzono z prędkością 5 mm/min aż do całkowitego zerwania próbki.



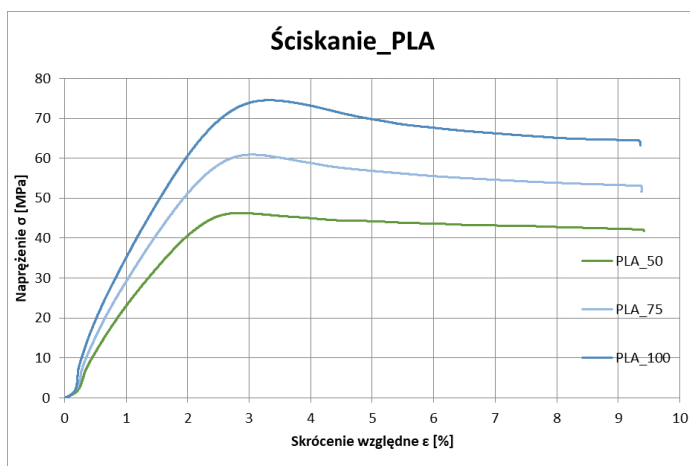
Rys. 6. Przykładowe próbki przygotowane do statycznej próby rozciągania



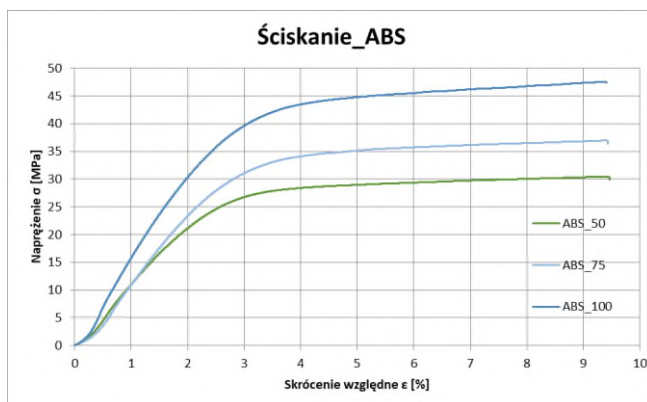
Rys. 7. Przykładowa próbka po przeprowadzeniu statycznej próby rozciągania

Wykresy ściskania i rozciągania próbek wykonanych z PLA, ABS oraz nylonu przedstawiono na rys. 8–13.

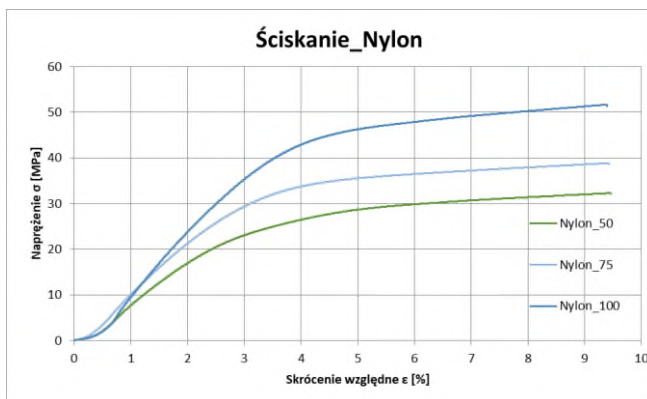
Wykresy zestawieniowe dla różnych materiałów i różnej gęstości wypełnienia dla ślimacznicy i wkładki elastycznej sprzęgła przedstawiono na rys. 14–15.



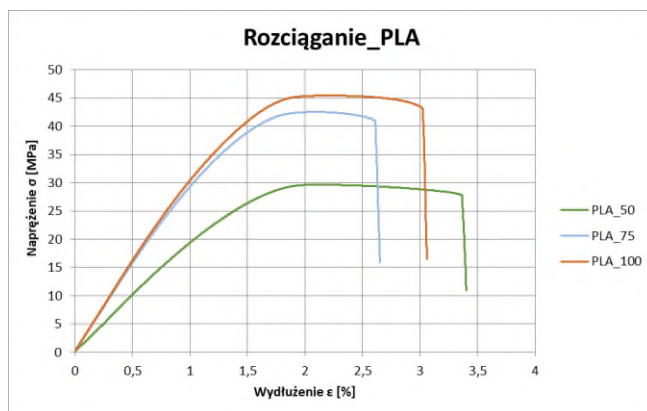
Rys. 8. Wykres ściskania kształtki z materiału PLA o różnych gęstościach wypełnienia



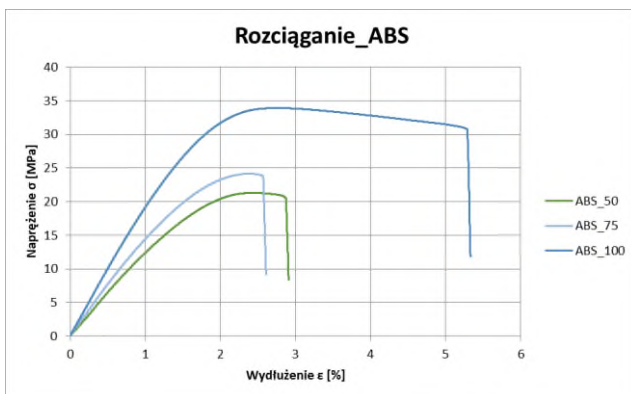
Rys. 9. Wykres ściskania kształtki z materiału ABS o różnych gęstościach wypełnienia



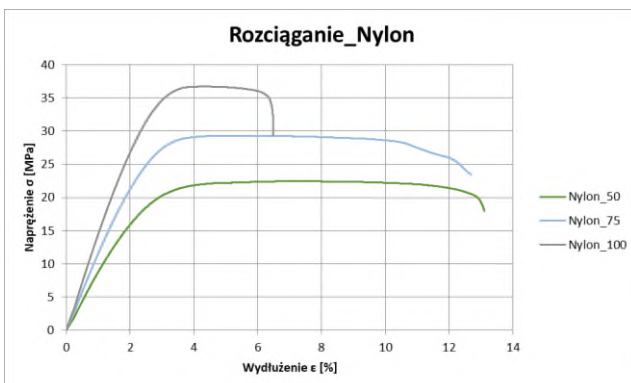
Rys. 10. Wykres ściskania kształtki z materiału Nylon o różnych gęstościach wypełnienia



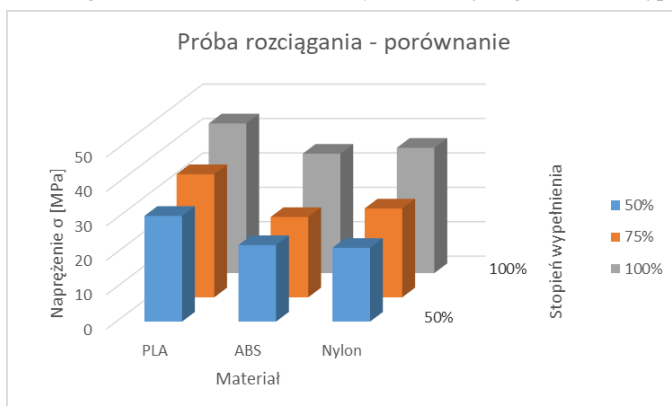
Rys. 11. Wykres rozciągania kształtki z materiału PLA o różnych gęstościach wypełnienia



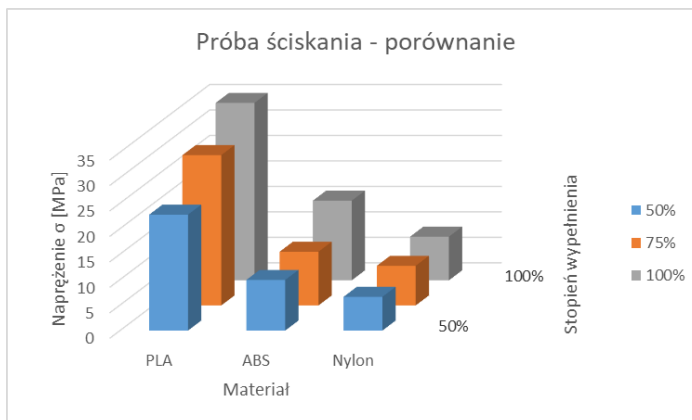
Rys. 12. Wykres rozciągania kształtki z materiału ABS o różnych gęstościach wypełnienia



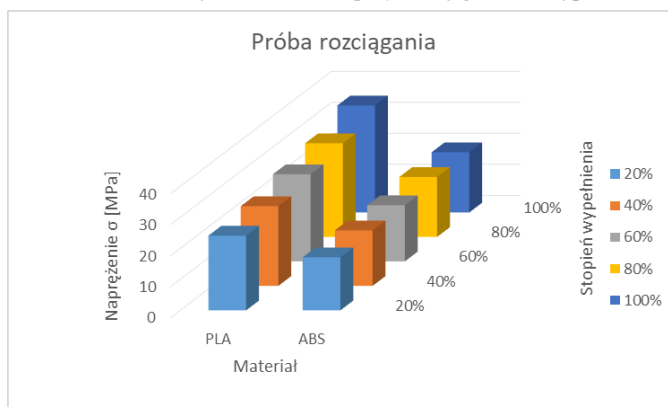
Rys. 13. Wykres rozciągania kształtki z materiału Nylon o różnych gęstościach wypełnienia



Rys. 14. Wykres rozciągania dla różnych materiałów przy danej gęstości wypełnienia (ślimacznica)



Rys. 15. Wykres ściskania dla różnych materiałów przy danej gęstości wypełnienia (ślimacznica)



Rys. 16. Wykres rozciągania dla różnych rodzajów materiałów przy danej gęstości wypełnienia (wkładka sprzęgła)

Największą wartość naprężeń dla materiału PLA osiągnięto dla próbki o gęstości wypełnienia 100%. Próbki wykonane z materiału ABS przenoszą znacznie mniejsze obciążenia ścisające z materiału PLA. W przypadku próbek wykonanych z nylonu zaobserwowano, że wraz ze wzrostem gęstości wypełnienia wyniki od siebie odbiegają. Zjawisko to wynika z wyjątkowej elastyczności, jaką charakteryzuje się nylon. Największe zniekształcenia próbek zaobserwowano dla materiału PLA.

W przypadku próby wytrzymałości na rozciąganie wartość siły rozciągającej jest równa dla wartości wypełnienia 50% oraz 75%. Największą wartość siły uzyskano dla gęstości wypełnienia 100%. Dla materiału ABS w porównaniu do PLA uzyskano nieznacznie niższe wartości sił rozciągających. Wytrzymałość na rozciąganie nylonu była podobna jak ABS. Zaobserwowano, że próbki nie dochodziły do momentu całkowitego zerwania przy wypełnieniu 50% i 75%, a ich pojedyncze włókna rozciągały się.

3. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku elementów, które przenoszą niewielkie obciążenia, zastosować można mniejszą gęstość wypełnienia elementu. Zabieg ten wpłynie bezpośrednio na skrócenie czasu produkcji oraz zmniejszenie ilości wykorzystanego materiału, zachowując jednak pożądane właściwości wytrzymałościowe gotowego wyrobu.

W przypadku wkładki sprzęgła elastycznego próby wytrzymałościowe materiału ABS wykazały, że na wytrzymałość na rozciąganie ma wpływ gęstość wypełnienia elementu. Największa występuje przy 100% wypełnieniu. Dla materiału PLA wytrzymałość na rozciąganie jest znacznie większa niż dla ABS.

Podczas przeprowadzania próby na ściskanie dla obu materiałów gęstość wypełnienia nie miała znaczącego wpływu na wartość wytrzymałości na ściskanie.

W obu przypadkach drukowania ślimacznicy i wkładki sprzęgła materiał PLA wykazał się najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Wykonywanie elementów i części maszyn technikami przyrostowymi pozwala na wytworzenie części w sytuacjach awaryjnych. Opracowanie planu projektowego dla określonego rodzaju części jest podstawą do wykonania za pomocą druku przestrzennego skomplikowanych części urządzeń.

4. Literatura

1. Bourell D., Kruth J.P, Leu M. Levy G., Rosen D., Beese A.M, Clare A.: Materials for additive manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 66, pp. 659-681, 2017.
2. Brischetto S., Maggiore P., Ferro C.G.: Additive manufacturing technologies and applications. Wydawnictwo MDPI, Basel 2017.
3. Dynowski A.: Analiza możliwości wykorzystania drukarki 3D do wytwarzania elementów i części urządzeń okrętowych na przykładzie wkładki do sprzęgła kłowego, Praca dyplomowa, Gdynia 2018.
4. Fiał Ch., Pieknik M.: Druk 3D jako technologia przyszłości – część 2. Technologia i Jakość Wyrobów, nr 65/2020, s. 106-115, 2020.
5. Fiał Ch., Piekut M.: Druk 3D jako technologia przyszłości – część 1. Technologia i Jakość Wyrobów nr 65/2020, s. 92-105, 2020.
6. Gebhardt A., Hötter J. S.: Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Hanser Publishers, Monachium 2016.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B.: Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition. Springer, Berlin 2015.
8. Kaziunas France A.: Świat druku 3D. Przewodnik. Wydawnictwo Helion, 2014.

9. Kyzioł L., Kończewicz W., Dynowski A., Journal of Konbin, Volume 49, Issue 3, 2019.
10. Mikoś J.: Przegląd technologii druku 3D jako produkcji dodatkowej (przyrostowa) do wykonywania prototypów małych maszyn elektrycznych. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 2/2021, s. 1-7, Katowice 2021.
11. PN EN ISO 604:2006 – Oznaczenie właściwości mechanicznych podczas ściskania.
12. Siemiński P., Budzik G.: Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D. Wydawnictwo OWPW, 2015.
13. Stritesky O.: Podstawy Druku 3D z Josefem Prusą. Prusa Research a.s., Praga 2020.